



Research Paper

Investigating and Analyzing the Performance of Spectral Indices in Urban Extraction by Multi-spectral Satellite Images

Maryam, Kouhani ¹ , Fatemeh Ahmadi ² , Abbas Kiani ^{*3} , Yasser, Ebrahimian Ghajari ⁴ 

¹ MSc student of Photogrammetry, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol Iran.

² MSc student in photogrammetry, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

³ Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.

⁴ Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.



10.22080/USFS.2023.25133.2344

Received:

March 19, 2023

Accepted:

October 1, 2023

Available online:

November 29, 2023

Keywords:

Urban detection, Spectral indices, Automatic thresholding, Satellite images, Landsat and Sentinel.

Abstract

Population growth has resulted in rapid changes in urban landscapes in many countries, including Iran. Monitoring urban areas can be accelerated by utilizing remote sensing images and spectral indices in urban planning. This requires evaluating the performance of indices according to the application in different conditions, which can be challenging for users. This study was conducted to compare and analyze suitable solutions for analyzing urban indicators using satellite imagery and their effectiveness. For this purpose, Landsat-8 and Sentinel-2 images were first analyzed to extract spectral index; then automated threshold algorithms were applied to separate constructed areas. Results indicate that Sentinel-2 images perform better than Landsat images in general. Among the spectral indices, the UI index for Landsat and Sentinel-2 images in Rafsanjan with overall accuracy of 86.28 and 98.19, the NBI index for Landsat and Sentinel-2 images in Amol city with overall accuracy of 87.21 and 97.48, and the UI index in Landsat and IBI in Sentinel-2 for Isfahan with overall accuracy of 78.73 and 91.69 have the best performance. Furthermore, applying the manual threshold limit to weak indicators has increased accuracy in most cases. Another study used Sentinel-1 images with user-controlled thresholds to identify built-up areas, and the results for Amol, Rafsanjan, and Isfahan were 89.24, 80.03, and 76.10, respectively. The findings of this study revealed that the performance accuracy of indices can vary depending on parameters such as the type of climate, different sensors, and thresholds. Therefore, as a strategic model, the results of this analysis can provide researchers with a better understanding of indicators as a result of considering different parameters.

***Corresponding Author:** Abbas Kiani

Address: Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Email: a.kiani@nit.ac.ir

Extended Abstract

1. Introduction

Urbanization in the world is accelerating and the process of construction and urbanization has replaced significant amounts of natural areas. Due to the spatial and temporal distributions of built-up areas, the increase of built-up areas affects land-cover change significantly and plays an important role in environmental changes and ecosystem services. Therefore, it is necessary to monitor and evaluate the pattern of settlement dispersion and urban expansion. Mapping of built-up areas is not only crucial for monitoring urban development, but also a key parameter for evaluating environmental problems. Satellite images provide a wide and comprehensive view of urban areas that can't be obtained using ground-based methods, regardless of cost and energy requirements. Another advantage of using remote sensing data to examine urban growth and sprawl over time is the easy access to long-history data sets that help map and understand urban growth and sprawl over time. Therefore, the use of remote sensing images with faster data acquisition, validation, and cost-effectiveness is of particular importance. This research aims to investigate and compare the performance of spectral indices for estimating urban built-up areas in different climatic conditions using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 images. For this purpose, several urban built-up areas were identified and separated using NDBI, VBSWIR-BI, MBI, NBI, UI, and IBI indices. Accordingly, this study attempts to compare the accuracy of the method of extracting urban built areas from different indices based on climate, spatial and

spectral resolution of the sensor, and threshold limits.

2. Research Methodology

An urban area is a complex ecosystem with a variety of surfaces and vegetation and can be divided into three parts, i.e. impervious surfaces, green vegetation, and soil. A more general classification of urban areas can be divided into two main categories, including built and unbuilt areas. In recent decades, spectral indices have been introduced to distinguish built-up from non-built-up areas. Spectral indices involving multiple bands create a special feature in the generated image and are often used to illustrate coverage in a specific manner. Consequently, this research aims to separate urban areas from non-urban areas using remote sensing images and spectral indicators available in the urban issues field or automatic thresholds. In general, this research consists of five study steps. The first step is related to obtaining and collecting data. The second step involves preprocessing raw Sentinel-2 and Landsat-8 images. In the third step, urban indicators are extracted from the pre-processed images, and then in the next step, an urban mask is created by applying the appropriate threshold. Similarly, in the Google Earth Engine environment, the average and standard deviation are applied to the set of Sentinel-1 images, followed by taking the appropriate threshold limit for PUL calculation. Finally, the results are evaluated using the available maps.

3. Research Findings

The findings revealed that the three investigated cities of Rafsanjan, Amol, and Isfahan have different climatic conditions; around Amol, there is a large amount of agricultural land, which is always covered with green vegetation in the summer. In

contrast, there is a dry and semi-arid climate in the cities of Isfahan and Rafsanjan, which has caused the soil to cover the majority of the area surrounding the city and the lands to remain barren. Since soil covers are spectrally similar to built-up areas, it may be more challenging to identify built-up areas in these places. Meanwhile, in Amol, due to differences between the spectral behavior of the bands between the two built-up areas and vegetation, the identification of the built-up areas is done with more power and accuracy. Each of the indicators can provide different accuracies according to the environmental conditions of the studied area, and since green vegetation and built-up areas are among the predominant covers in Amol, indices based on SWIR and NIR bands are more accurate. In the NIR band, vegetation is more reflective than built-up areas, so the difference between the two makes it possible to easily distinguish the built-up area from the vegetation. IBI, NDBI, and UI indices are useful for distinguishing built-up areas from vegetation in such areas. In a general comparison between indices in different cities by two sensors, it can be found that the indices have always been more accurate when they are obtained from the Sentinel image and will perform better in identifying built-up areas, and in a more detailed comparison between cities, it can be noted that the indices in the Amol city have been quite satisfactory, even with Landsat images. As a result, the average accuracy of all indicators in this city has always been acceptable; therefore, one of the key parameters in this field is the city's climate.

Additionally, in another study, the average and standard deviation of each indicator were calculated in three cities to evaluate their success rate, and the results

were presented. According to the results presented in the comparison between average indices, the UI index had the highest average value, while the MBI index had the lowest. In another approach, where a comparison was made between the standard deviation of each index, the MBI and UI indices had the highest and lowest standard deviations, respectively. This study shows that the UI index, which has a higher average and a lower standard deviation, has a higher accuracy, while the MBI index has a lower accuracy. Therefore, it can be said that many factors, such as the type of sensors, spectral indices, thresholds, and climatic conditions, can influence the accuracy of the results of identifying built-up areas.

4. Conclusion

The rapid growth of cities and population expansion are significantly affecting the environment and ecosystem. In an urban environment, where the population is increasingly occupied and needs residential, commercial, and recreational areas, urbanization increases built-up areas. Therefore, discovering and extracting such areas is important in achieving this goal. The studied areas in this research included Amol, Isfahan, and Rafsanjan, which have different climates, and satellite images from Landsat-8 and Sentinel-2 were used. The purpose of examining three different cities, threshold limits, and satellite sensors with different spatial resolutions in this research was to determine the effect of each of the mentioned parameters on the performance accuracy of indicators. Spectral indices need to be selected based on dispersion, urban texture, and vegetative status so that urban areas can be distinguished accurately from other land uses. According to the obtained results, it can be concluded that UI

indexes perform best in dry areas with weak vegetation, while in humid and moderate climates, NBI indexes are most effective. Additionally, Sentinel-2 was more accurate and reliable at separating built and unbuilt areas than Landsat-8.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

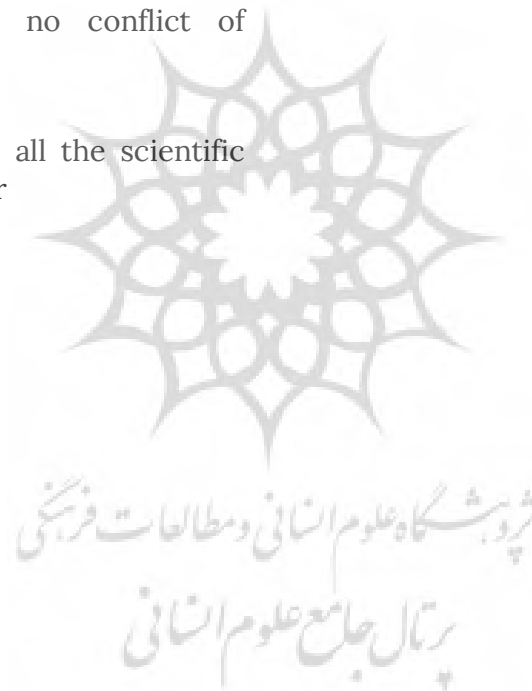
The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work

Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors appreciate all the scientific consultants in this paper



علمی پژوهشی

بررسی و تحلیل عملکرد شاخص‌های طیفی در استخراج مناطق شهری براساس تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی

مریم کوهانی^۱ ID، فاطمه احمدی^۲ ID، عباس کیانی^{۳*} ID، یاسر ابراهیمیان قاجاری^۴ ID

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران
^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران
^۴ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

doi 10.22080/USFS.2023.25133.2344

چکیده

افزایش بی‌رویه جمعیت در بسیاری از جوامع از جمله ایران منجر به تغییرات سریع چشم‌اندازهای شهری شده است. در برنامه‌ریزی‌های شهری استفاده از تصاویر سنجش‌ازدوری و به‌کارگیری شاخص‌های طیفی نقش بسزایی در تسریع روند نظارت شهری دارد. بررسی این امر نیازمند به ارزیابی عملکرد شاخص‌ها در شرایط مختلف متناسب با کاربرد است که می‌تواند یکی از چالش‌های کاربران در این زمینه باشد. هدف از این پژوهش، یک مطالعه تطبیقی و تحلیل راه‌کارهای مناسب جهت به‌کارگیری شاخص‌های مطرح شهری با کمک تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل عملکرد آنهاست. در این راستا، ابتدا شاخص‌های طیفی از تصاویر لندست ۸، سنتینل ۲ و ۱ استخراج و سپس به جهت جداسازی مناطق ساخته‌شده، الگوریتم حدآستانه خودکار بر روی تصاویر اعمال شد. نتایج حاکی از آن است که به‌طور کلی تصاویر سنتینل-۲ عملکرد بهتری نسبت تصاویر لندست از خود نشان دادند. از بین شاخص‌های طیفی، شاخص UI برای تصاویر لندست و سنتینل-۲ در رفسنجان با دقت کلی (۸۶/۲۸ و ۹۸/۱۹)، شاخص NBI برای تصاویر لندست و سنتینل-۲ در شهر آمل با دقت کلی (۸۷/۲۱ و ۹۷/۴۸)، شاخص UI در لندست و IBI در سنتینل-۲ برای اصفهان با دقت کلی (۷۸/۷۳ و ۹۱/۶۹) دارای بهترین عملکرد بوده‌اند. همچنین با هدف ارزیابی عملکرد شاخص‌های ضعیف با اعمال حدآستانه دستی این نتیجه حاصل شد که اغلب موارد حدآستانه دستی باعث افزایش دقت خواهد شد. در یک بررسی دیگر با به‌کارگیری تصاویر سنتینل-۱ با حدآستانه نظارت‌شده توسط کاربر اقدام به شناسایی مناطق ساخته‌شده، شد که نتایج برای سه شهر آمل، رفسنجان و اصفهان به‌ترتیب دقت‌های کلی ۸۹/۲۴، ۸۰/۰۳ و ۷۶/۱۰ حاصل شد. یافته‌های این تحقیق نشان داد که دقت عملکرد شاخص‌ها با توجه به پارامترهایی مانند نوع اقلیم، سنسورهای مختلف و حدآستانه می‌تواند متغیر باشد. لذا نتایج این تحلیل می‌تواند به‌عنوان یک الگوی راهبردی محققان را در جهت شناخت و درک بهتر شاخص‌ها با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف یاری کند.

تاریخ دریافت:

۲۸ اسفند ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش:

۹ مهر ۱۴۰۲

تاریخ انتشار:

۸ آذر ۱۴۰۲

کلیدواژه‌ها:

پایش شهری، شاخص‌های طیفی، حدآستانه خودکار، تصاویر ماهواره‌ای، سنجنده لندست و سنتینل

* نویسنده مسئول: عباس کیانی

آدرس: استادیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، ایمیل: a.kiani@nit.ac.ir
 دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.



۱ مقدمه

برای مطالعات شهری، دسترسی آسان به مجموعه داده‌هایی با تاریخچه طولانی است که به نقشه‌برداری و درک رشد و پراکندگی شهری در طول زمان کمک می‌کند. بنابراین استفاده از تصاویر سنجش‌ازدوری با اخذ سریع‌تر داده، اعتبارسنجی و مقرون‌به‌صرفه بودن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور در زمینه‌ی نقشه‌برداری از مناطق ساخته‌شده مطالعات زیادی با معرفی شاخص‌های شهری در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. یانوار و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مقاله‌ای قابلیت ۵ شاخص شهری را با استفاده از لندست-۷ و ۸ در طی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۵ مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی تمام شاخص‌های طیفی نشان داد که تراکم منطقه ساخته‌شده در محدوده مورد مطالعه در بازه ۱۳ ساله افزایش داشته است (Risk et al., 2017). یانتایو و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲، پنج شاخص شهری را مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. بر روی تمام شاخص‌های استخراج‌شده حدآستانه اتسو اعمال شد. علاوه بر آن از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نیز برای طبقه‌بندی دو تصویر استفاده شد که نتایج ارزیابی دقت نشان داد که تمام شاخص‌های ساخته‌شده از تصویر سنتینل دقت کلی بالاتری در مقایسه با SVM داشته است (Xi et al., 2019). پاندی و همکاران (Pandey & Tiwari, 2020) در مقاله‌ای از تصاویر فرا طیفی و باندهای طیفی برای تشخیص سطوح ساخته‌شده و زیر کلاس‌های آن مانند جاده و سقف استفاده کردند. نتایج حاکی از آن است که شاخص NBI یکی از شاخص‌های مناسب است که می‌تواند برای استخراج مناطق ساخته‌شده مؤثر باشد. احمدعلی و همکاران در مقاله‌ای (Ali & Nayyar, 2021) در سال ۲۰۲۱ با استفاده از تصاویر لندست-۸ و شاخص‌های ساخته‌شده به استخراج خودکار و تفکیک مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده پرداختند. در این تحقیق

شهرنشینی در جهان با سرعت زیادی در حال گسترش است و فرایند شهرنشینی و ساخت‌وساز جایگزین مقدار قابل‌توجهی از مناطق طبیعی شده است (Xi et al., 2019). افزایش مناطق ساخته‌شده، تغییر کاربری پوشش زمین را در مقیاس وسیع تحت تأثیر قرار می‌دهد، زیرا توزیع مکانی و زمانی مناطق ساخته‌شده نقش مهمی در تغییرات محیطی و خدمات اکوسیستم ایفا می‌کند. لذا نظارت و ارزیابی الگوی پراکندگی و گسترش شهری مناطق ساخته‌شده امری ضروری است (Masek et al., 2000). به طوری که در سال‌های اخیر به دلیل افزایش آگاهی از این مشکلات، نیاز فوری به نظارت بر گسترش شهرها و اجرای سیاست‌های کارآمد در دستور کار مدیران قرار گرفته است (عبدی و همکاران، ۲۰۱۹). تهیه نقشه از مناطق ساخته‌شده نه تنها برای نظارت بر توسعه شهری امری مهم است، بلکه یک پارامتر کلیدی برای ارزیابی مشکلات زیست‌محیطی نیز به شمار می‌آید. از این رو رشد سریع شهری که باعث تغییرات زیاد در سراسر جهان شده است، نیاز به تهیه نقشه مناطق ساخته‌شده را به امری ضروری تبدیل کرده است (Ali & Nayyar, 2021). شناسایی تراکم و توسعه شهری با استفاده از روش‌های سنتی همچون نقشه‌برداری زمینی و عکس‌برداری هوایی علاوه بر زمان‌بر بودن نیازمند به صرف هزینه و انرژی قابل‌توجهی است. افزون بر آن امروزه با رشد و توسعه سریع شهرها، تهیه نقشه از مناطق ساخته‌شده شهری به صورت سنتی به امری دشوار مبدل شده است. استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور به دلایل متعددی از اهمیت ویژه‌ای در مباحث شهری برخوردار است. زیرا تصاویر ماهواره‌ای دید وسیع و جامعی از مناطق شهری ارائه می‌دهند در حالی که این کار صرف‌نظر از هزینه و انرژی زیاد، عموماً از طریق روش‌های زمینی امکان‌پذیر نیست. مزیت دیگر استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری

¹ Abdi et al



مناطق شهری استفاده شد. نتایج نشان داد که تصاویر نزولی صرف‌نظر از قطبش، دقت بالاتری نسبت به تصاویر صعودی داشته‌اند و دقت کلی باندهای VH و VV برای تصاویر نزولی برابر ۹۱٪ و ۷۴٪ بوده است. همچنین تصاویر باند VV در هر دو مدار تصویربرداری در مقایسه با باند VH کارایی بهتری در استخراج مناطق ساخته‌شده داشته است. عزیمند و همکاران در مقاله‌ای (عزیمند^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷) با استفاده از تصاویر لندست ۷ و ۸ و شاخص‌های طیفی اقدام به تفکیک مناطق ساخته‌شده شهر تهران کردند. در این مطالعه از ۷ شاخص طیفی در طبقه‌بندی و تغییر اراضی ساخته‌شده استفاده شد همچنین برای تشخیص پیش‌زمینه و پس‌زمینه روش اتسو به کار برده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که VBSWIR-BI با دقت کلی ۹۲/۸۸ برای تصاویر لندست ۷ و ۹۱/۶۸ برای تصاویر لندست ۸ دقت بالاتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. عیسی زاده و همکاران در مقاله‌ای (عیسی زاده و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۲) کارایی شش شاخص طیفی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ برای سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۹ در شهر تهران پرداختند. با استفاده از شاخص‌های استخراج‌شده، مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده تفکیک شدند. همچنین در این تحقیق بررسی کارایی شاخص‌های مختلف طیفی و دمایی سطح زمین را نیز مورد ارزیابی قراردادند و جهت بارزتر کردن پدیده‌ها و افزایش قدرت تفکیک مکانی از روش تلفیق داده‌های Pan و Multispectral به روش گرام اشمیت استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های VBSWIR-BI و IBI با دقت به‌ترتیب ۶۱/۱۳ و ۶۸/۲۷ درصد بالاترین دقت را نسبت به سایر شاخص‌ها کسب کردند.

از شاخص جدید تصحیح‌شده^۱ به کار گرفته شد که با ترکیب شاخص ساخته‌شده^۲، شاخص تفاوت نرمال شده^۳ آب، شاخص پوشش گیاهی تنظیم خاک^۴ و دمای روشنایی^۵ توسعه‌یافته و با استفاده از حدآستانه‌های اتسو و روش دومرحله‌ای چند آستانه‌ای^۶ به دست آمده است. نتایج نشان داد شاخص MBI قادر است مناطق ساخته‌شده را از زمین بایر جدا کند و با دقت ۹۷/۸٪ منجر به بالاترین دقت در فصل بهار شده است. عزت‌آبادی پور و همکاران در مقاله‌ای (عزت‌آبادی پور و نجفی^۷، ۱۳۹۶) با استفاده از تصاویر سنتینل، مناطق ساخته‌شده شهر را در محدوده سیرجان استخراج کردند. روش تحقیق به این صورت بوده است که ابتدا شاخص‌های NDBI و MNDWI محاسبه شده و سپس شاخص IBI به دست آمده است. این مقاله نشان داد که شاخص IBI با ترکیب سه شاخص SAVI، NDBI و MNDWI قابلیت شناسایی و آشکارسازی مناطق ساخته‌شده را افزایش می‌دهد. عطارچی و همکاران در مقاله‌ای (عطارچی و همکاران^۸، ۲۰۲۰) به بررسی و عملکرد چهار شاخص طیفی با نتایج طبقه‌بندی شیء‌گرا به تفکیک مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده در دو شهر تهران و گرگان پرداختند. شاخص‌های طیفی از تصاویر لندست-۸ استخراج شدند سپس با استفاده از روش آستانه‌گذاری اتسو مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده جدا شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی در مناطق شهری مختلف دارای عملکرد یکسانی نبوده‌اند.

جعفری و همکاران در مقاله‌ای (جعفری و عطارچی^۹، ۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر راداری صعودی و نزولی سنتینل-۱ به ارزیابی عملکرد دو باند VV و VH، در استخراج مناطق ساخته‌شده پرداختند. در این تحقیق از روش اتسو برای تفکیک

^۷ TSMO

^۸ Ezzat abadi pour and Najafi

^۹ Attarchi et al

^{۱۰} Jafari and Attarchi

^{۱۱} Ezimand

^{۱۲} Isazade et al

^۱ MBI

^۲ ASIT-BI

^۳ NDWI

^۴ SAVI

^۵ TB



۲ مبانی نظری

۲،۱ پیش‌پردازش‌های تصویری

تصاویر خام به علت داشتن خطاهای اتمسفری و رادیومتریکی به صورت مستقیم نمی‌توانند مورد استفاده تحقیقاتی قرار بگیرند، زیرا شرایط جوی و ذرات معلق در فضا و زمان متغیر بوده و قابل توجه است به همین دلیل انجام کالیبراسیون رادیومتریکی و تصحیح اتمسفری قبل از استخراج شاخص‌های طیفی الزامی است. از سوی دیگر در مواقعی که هدف، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور بررسی رفتارهای طیفی پوشش‌های سطح زمین است، تصحیحات اتمسفری امری اجتناب‌ناپذیر است؛ زیرا اگر رفتار طیفی تصویر اشتباه باشد، نتایج به دست آمده شاخص‌ها نیز اشتباه می‌شود. بدین منظور پیش از استفاده از این تصاویر لازم است تا تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری بر روی آنها صورت گیرد. در این تحقیق تصحیحات تصویر لندست در نرم‌افزار انوی انجام می‌گیرد ابتدا تصحیح رادیومتریکی بر روی تصاویر صورت گرفته و سپس بر روی تصاویر تصحیح رادیومتریکی شده با استفاده از روش FLAASH^۲ تصحیح اتمسفری اعمال می‌شود و پس از آن تصاویر نرمالایز شده و بین ۰ تا ۱ قرار می‌گیرند. همچنین تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر سنتینل-۲ در نرم‌افزار SNAP صورت گرفته است و تمامی باندهای آن به ۱۰ متر ریسپل شده و سپس مقادیر باندها به ۰ و ۱ نرمال شدند. در نهایت بر روی تمامی تصاویر، برش مکانی اعمال شده است. لازم به ذکر است در انتخاب تصاویر سنتینل و لندست سعی بر آن شده است که تصویری با کمترین پوشش ابر انتخاب شود.

۲،۲ شاخص‌های طیفی

منطقه شهری یک اکوسیستم پیچیده است که از مناطق و پوشش‌های مختلفی تشکیل شده است و می‌توان مناطق شهری را به سه جزء یعنی مواد

از این رو مطابق مطالب گفته شده در فوق، مطالعات بسیاری در زمینه بررسی شاخص‌های طیفی شهری با کمک داده‌های سنجنش‌ازدور انجام شده است؛ اما مطالعات اندکی به بررسی عملکرد شاخص‌های شهری با مقایسه چند سنجنده در اقلیم‌های متفاوت پرداخته‌اند. از آنجایی که ممکن است شاخص‌ها در مناطق مختلف دارای عملکرد متفاوتی باشند، نیاز به این موضوع که شاخص‌ها در اقلیم‌های متفاوت مورد بررسی قرار گیرند همچنان مورد توجه است؛ بنابراین هدف اصلی ما از این تحقیق بررسی و مقایسه عملکرد شاخص‌های طیفی برای استخراج مناطق ساخته شده شهری است که با استفاده از تصاویر ماهواره لندست-۸ سنجنده OLI و سنتینل-۲ در اقلیم‌های متفاوت است. بدین منظور از شاخص‌های MBI، VBSWIR-BI، NDBI، UI و IBI برای شناسایی و جداسازی مناطق ساخته شده شهری استفاده شد. با استفاده از الگوریتم حدآستانه اتسوا^۳، مناطق شهری از سایر مناطق تفکیک شد. این تحقیق کارایی شاخص‌های مختلف شهری در شهرهای مختلف ایران را مورد ارزیابی قرار می‌دهد که بدین جهت سه شهر رفسنجان، اصفهان و آمل که دارای بافت شهری و پوشش گیاهی متفاوت است در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از حدآستانه دستی بر روی ضعیف‌ترین شاخص‌ها سعی شده است تا دقت استخراج مناطق ساخته شده از روی شاخص‌ها را افزایش داد، همچنین در یک بررسی دیگر با استفاده از حدآستانه دستی بر روی تصاویر سنتینل-۱ به تفکیک مناطق ساخته شده از ساخته نشده پرداخته شده است؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده است تأثیر اقلیم، قدرت تفکیک مکانی و طیفی سنجنده و حدآستانه‌ها در میزان دقت استخراج مناطق ساخته شده شهری از روی شاخص‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of^۲
Spectral Hypercubes

^۳ Otsu's thresholding method



در سال ۲۰۱۰ شاخص جدید مناطق ساخته شده با نام (NBI) برای خودکار کردن فرایند نقشه برداری از مناطق مسکونی پیشنهاد داده شده است. پاسخ طیفی منحصربه فرد پوشش های سطح زمین برای هر نوع از پوشش در باندهای NIR, SWIR1, SWIR2، باعث موفقیت شاخص NBI در حل تمایز مناطق بایر و خالی از پوشش نسبت به مناطق مسکونی شد. شاخص NBI از ضرب و تقسیم استفاده می کند که باعث می شود تا مقدار طیفی مناطق ساخته شده در آن به طور کامل افزایش پیدا کند و برای به دست آوردن آستانه بسیار بهتر است (Jieli et al., 2010). این شاخص برای افزایش مقیاس روشنایی ویژگی های شهری در یک تصویر ماهواره ای توسعه داده شده است که محدوده های ارزشی برای این شاخص، براساس روشنایی ویژگی، توصیفی از انواع کاربری های گسسته زمین محاسبه شده است (Lynch et al., 2020). در سال ۲۰۱۴ شاخصی با نام MBI توسط لی و همکاران ارائه شد که این شاخص می تواند کنتراست بین مناطق ساخته شده و پوشش گیاهی، خاک برهنه، بدنه های آبی و سایر طبقات پوششی زمین را بهبود ببخشد و از یکدیگر تفکیک کند (Liu et al., 2014a). همچنین در سال های اخیر شاخص جدیدی با نام VBSWIR1-BI برای استخراج مناطق ساخته شده براساس باند آبی و SWIR1 ارائه شده است در باند مادون قرمز موج کوتاه، زمین ساخته شده دارای بازتابی بالایی است که امکان جداسازی آنها از سایر ویژگی ها را فراهم می کند و به همین دلیل است که این باند در مطالعات شهری اهمیت دارد (Ezimand et al., 2018) مشخصات و فرمول های مربوط با شاخص های گفته شده در مطالب فوق در

سطحی غیرقابل نفوذ، پوشش گیاهی سبز و خاک تقسیم کرد (Xu, 2007). در یک دسته بندی کلی تر در مباحث و تحقیقاتی که هدف اصلی مناطق شهری است می توان به دو بخش مناطق ساخته شده و مناطق ساخته نشده تقسیم کرد. همواره از دهه های گذشته تاکنون به کارگیری شاخص های طیفی به جهت تفکیک مناطق ساخته شده از مناطق ساخته نشده از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. شاخص های طیفی با اجرایی آسان با استفاده از چند باند، ویژگی خاصی را در تصویر تولید شده به وجود می آورند که در تصویر اولیه وجود ندارد و به این ترتیب یک نوع پوشش خاص اغلب در شاخص های طیفی به صورت برجسته نمایش داده می شود. در دهه ۱۹۹۰، UI به عنوان یک شاخص مناطق ساخته شده برای تولید اطلاعات و ارزیابی وضعیت و الگوی پراکندگی مناطق ساخته شده از داده های سنجنش از دور استخراج شد که از رابطه معکوس رفتار مناطق ساخته شده بین دو باند NIR و SWIR استفاده کامل می کند (Xi et al., 2019). شاخص NDBI از پاسخ طیفی منحصربه فرد مناطق ساخته شده و سایر پوشش های زمین بهره می برد (Zha et al., 2003). توسعه شاخص براساس پاسخ طیفی زمین های ساخته شده است که بازتاب بیشتری در محدوده طول موج SWIR نسبت به محدوده طول موج NIR دارند (Xu, 2008). همچنین در سال ۲۰۰۸ شاخصی با نام IBI ارائه شده است که این شاخص براساس سایر شاخص های موجود از باندهای تصویر اصلی ساخته شده است و با شاخص های معمولی متفاوت است (Xi et al., 2019). تصویر جدید، متشکل از سه باند شاخص موضوعی، می تواند ابعاد داده و افزودگی تصویر چندطیفی اصلی را تا حد زیادی کاهش دهد و بنابراین از سردرگمی طیفی بین طبقات کاربری زمین جلوگیری می کند (Xu, 2008). جدول ۱ ارائه شده است.



جدول ۱: معرفی شاخص‌های طیفی

منابع	فرمول	شاخص	نام کامل
Kawamura,) (1996)	$\frac{SWIR2 - NIR}{SWIR2 + NIR}$	UI	Urban index
Zha et al.,) (2003)	$\frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR}$	NDBI	Normalized Difference Built-up Index
(Xu, 2008)	$\frac{2SWIR1}{SWIR1 + NIR} - \left[\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{GREEN}{SWIR1 + GREEN} \right]$	IBI	Index-based Built-up Index
Liu et al.,) (2014b)	$\frac{(SWIR1 \times RED - (NIR^2))}{RED + NIR + SWIR1}$	MBI	Modified built-up index
Jieli et al.,) (2010)	$\frac{(RED \times SWIR1)}{NIR}$	NBI	New built-up index
Ezimand et) (al., 2018)	$\frac{SWIR1 - BLUE}{SWIR1 + BLUE}$	VBSWIR1-BI	Visible Blue-based Built-up Index

یافتن نقطه‌ای است که کمترین ادغام بین دو کلاس را داشته باشد (Ezimand et al., 2017).

۲٫۴ صحت سنجی

برای ارزیابی صحت خروجی به‌دست‌آمده، مقایسه آن با داده‌های میدانی یا تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر ضروری است. در روش‌های میدانی نقاط با دقت بالا برداشت می‌شوند، اما این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه است. در مطالعات سنجش‌ازدوری در صورت در دسترس نبودن داده‌های میدانی می‌توان از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در همان بازه زمانی استفاده کرد (Jafari & Attarchi, 2021). به همین منظور پس از تولید داده واقعیت زمینی^۱ از تصاویر باکیفیت بالا توسط فردی خبره، اعتبارسنجی توسط ماتریس ابهام انجام می‌گیرد که با ضریب کاپا، دقت کلی، دقت تولیدکننده، خطای مشارکت و خطای نادیده گرفتن تحلیل خواهد شد. از این جهت که هر اختلافی بیانگر معنادار بودن نتایج به‌دست‌آمده نیست، به‌کارگیری آزمون‌های معناداری آماری ضروری و غیرقابل‌اجتناب است (کیانی و همکاران،^۲ ۲۰۱۹). یکی از روش‌های

۲٫۳ حدآستانه‌گذاری خودکار

باینری کردن یک مرحله کلیدی برای استخراج زمین ساخته‌شده از روی تصاویر مربوط به شاخص‌های مختلف شهری است؛ بنابراین طی این فرایند، حدآستانه نقش مهمی ایفا می‌کند (Xi et al., 2019). در واقع روش‌های مختلفی برای حدآستانه‌گذاری به‌صورت خودکار وجود دارد، این روش‌ها به‌صورت خودکار بدون دخالت کاربر این کار را انجام می‌دهند و در این صورت است که عملکرد شاخص‌ها در زمینه استخراج مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده با یکدیگر قابل‌مقایسه خواهند شد و می‌توان به‌صورت مطمئن در مورد شاخص کاربردی‌تر نظر داد. بنابراین از بین روش‌های مختلف آستانه‌گذاری خودکار، روش اتسو (Otsu, 1979) که یک روش ناپارامتریک و بدون نظارت است برای انتخاب آستانه خودکار در تقسیم‌بندی تصویر ارائه‌شده انتخاب شده است. یک آستانه بهینه با معیار تفکیک انتخاب می‌شود، یعنی به‌گونه‌ای که تفکیک‌پذیری طبقات حاصل در سطوح خاکستری را به حداکثر برساند. در واقع هدف این الگوریتم

^۲Abbas Kiani et al

^۱ Ground truth



سالیانه آن به ترتیب برابر ۱۲۱/۱ میلی‌متر و ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد است. شهر اصفهان در بخش شمالی و جنوبی به اراضی بیابانی و در بخش شرقی و غربی به اراضی کشاورزی منتهی است (سفیانیان^۱، ۲۰۰۹).

بسیار پرکاربرد در مقایسه نقشه‌های موضوعی، استفاده از آزمون مک‌نمار است (Foody, 2004; McNemar, 1947). بدین منظور در این تحقیق، برای مقایسه نتایج طبقه‌بندی مربوط به دو تصویر لندست و سنتینل از نظر آماری از آزمون مک‌نمار استفاده شد.

۳ روش تحقیق

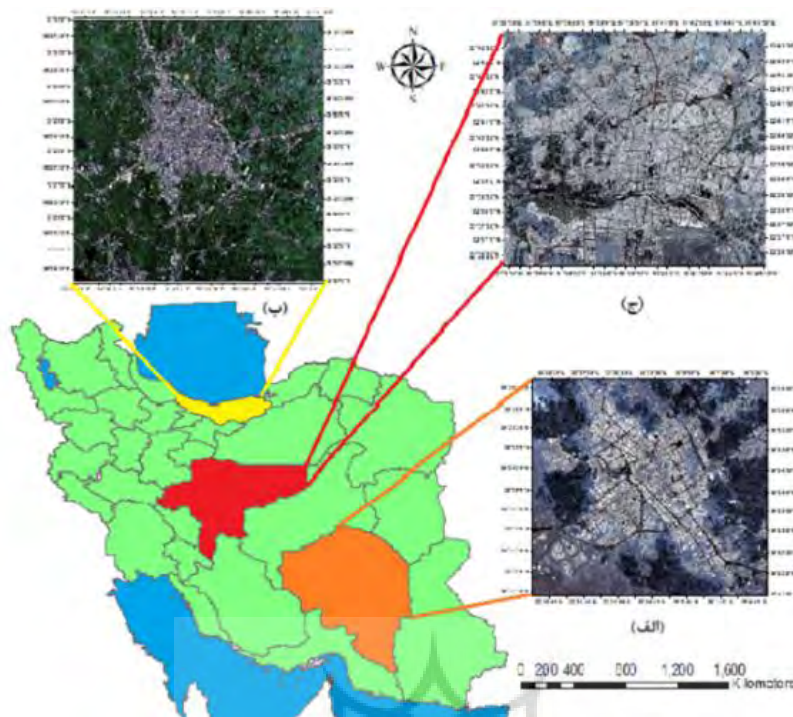
۳،۱ منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه مطابق شکل ۱ سه منطقه آمل، اصفهان و رفسنجان مورد مطالعه قرار گرفته است. منطقه اول مورد مطالعه شهر رفسنجان است که از نظر جغرافیایی در ۵۵ درجه ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه ۲۴ دقیقه عرض شمالی در شمال غرب استان کرمان واقع شده است. این شهر با وسعتی حدود ۷۶۷۸ کیلومترمربع و جمعیت ۱۶۱۹۰۹ نفر براساس سرشماری در سال ۱۳۹۵ گزارش شده است. شهر رفسنجان دارای آب‌وهوای نیمه‌کوبیری است که تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های سردی دارد.

منطقه دوم شهرستان آمل است که از نظر جغرافیایی در ۵۲ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی در استان مازندران قرار دارد. این منطقه در دامنه البرز با جمعیت ۴۰۱۶۳۹ و مساحتی برابر ۳۰۷۴/۴ کیلومترمربع واقع شده است و دارای آب‌وهوای مرطوب است و به علت شرایط مساعد آب‌وهوایی دارای زمین‌های کشاورزی پوشیده از پوشش گیاهی در اطراف شهر است.

منطقه سوم مورد مطالعه شهر اصفهان است که در ازنظر جغرافیایی در ۵۱ درجه ۳۶ دقیقه تا ۵۱ درجه ۴۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی قرار دارد. این شهر با وسعتی برابر ۱۰۷۰۴۵ کیلومتر و جمعیتی ۱۹۶۱۲۱۱ است که میانگین بارندگی و دمای

¹ Soffianian

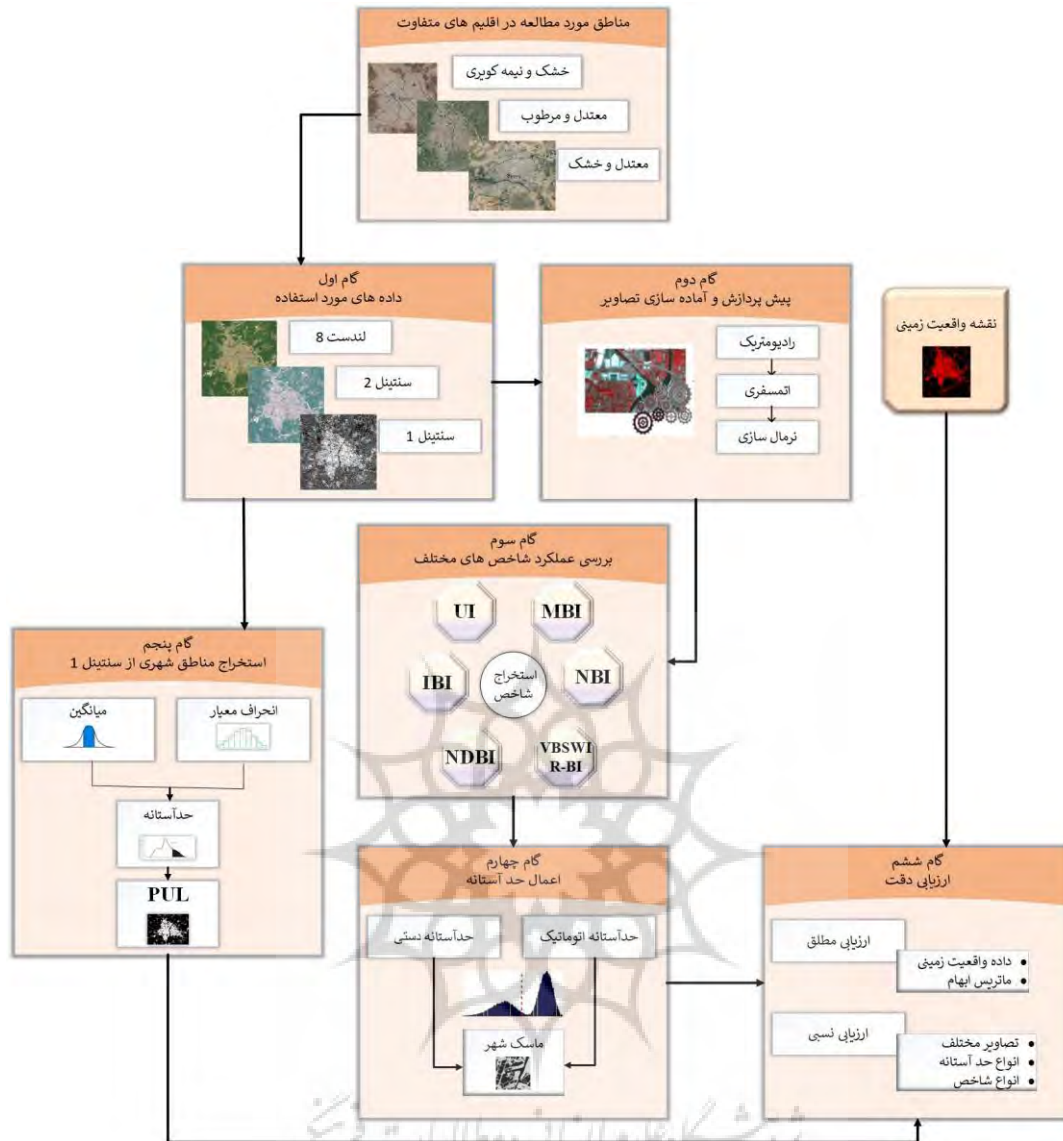


شکل ۱: مناطق مورد مطالعه

۳،۲ پیاده‌سازی روش

تحقیق حاضر مطابق شکل ۲ از ۵ گام مطالعاتی تشکیل شده است. گام نخست اخذ و جمع‌آوری داده‌ها است. گام دوم بر روی تصاویر خام سنتینل-۲ و لندست-۸ پیش‌پردازش‌هایی اعمال می‌شود. در گام سوم بر روی تصاویر پیش‌پردازش شده شاخص‌های شهری استخراج شده است و سپس در گام بعدی با اعمال حدآستانه مناسب، ماسک شهری به دست می‌آید. همچنین بر روی مجموعه از تصاویر سنتینل-۱ میانگین و انحراف معیار اعمال شده و سپس با گرفتن حدآستانه مناسب ¹PUL به دست می‌آید. در گام نهایی با استفاده از نقشه‌های موجود به‌دقت ارزیابی هر یک از نتایج پرداخته می‌شود که در ادامه هرکدام از بخش‌ها به‌تفصیل توضیح داده شده است.

¹ Potential Urban Land



شکل ۲: روند نمای کلی تحقیق

۳،۳ اخذ داده و پیش پردازش

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق لندست-۸، سنیتیل-۲، سنیتیل-۱ است. تصاویر لندست^۱ و سنیتیل^۲ در یک بازه زمانی (جولای تا اگوست سال ۲۰۲۱) اخذ شده‌اند که در این پژوهش از ۶ باند طیفی تصاویر شامل (باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه) استفاده شده است که باندهای تصاویر لندست ۸ دارای قدرت تفکیک

مکانی ۳۰ متر و باندهای تصاویر سنیتیل ۲ دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌باشند (جدول ۲). همچنین تصاویر سنیتیل-۱ در محیط گوگل ارث انجین اخذ و پردازش داده شد. همچنین از آنجایی که هر پژوهشی نیازمند به بررسی و کسب اطمینان از صحت و درستی نتایج به دست آمده است، در این تحقیق نیز این ارزیابی نیازمند به تهیه داده‌های اعتبارسنجی است. همان‌طور که در بخش صحت

² <https://scihub.copernicus.eu>

¹ <https://earthexplorer.usgs.gov>



خبره به صورت دستی و با کمک تصاویر گوگل ارث با دقت بالا تهیه گشته است و براساس آن ارزیابی‌ها صورت گرفته است.

سنجی نیز ذکر شد، داده‌های اعتبارسنجی حاوی اطلاعاتی حقیقی از پیکسل‌های یک کلاس از سطح زمین می‌باشند که در منابع سنجش‌ازدوری معمولاً تحت عنوان نقشه واقعیت زمینی یاد می‌شود. در پژوهش پیش رو، نقشه واقعیت زمینی توسط فردی

جدول ۲): مقایسه مشخصات بین دو سنجنده لندست و سنتینل

باند	لندست ۸		سنتینل ۲	
	قدرت تفکیک مکانی (متر)	طول موج (نانومتر)	قدرت تفکیک مکانی (متر)	طول موج (نانومتر)
Blue	۳۰	۴۵۰-۵۱۵	۱۰	۴۵۸-۵۲۳
Green	۳۰	۵۲۶-۶۰۰	۱۰	۵۴۳-۵۷۸
Red	۳۰	۶۳۰-۶۸۰	۱۰	۶۵۰-۶۸۰
NIR	۳۰	۸۴۵-۸۸۵	۱۰	۸۵۵-۸۷۵
SWIR1	۳۰	۱۵۶۰-۱۶۶۰	۲۰	۱۵۶۵-۱۶۵۵
SWIR2	۳۰	۲۱۰۰-۲۳۰۰	۲۰	۲۱۰۰-۲۲۸۰

۳/۵ ارزیابی نتایج

در این تحقیق از دو رویکرد مقایسه‌ای براساس سنجنده و شاخص‌های طیفی برای ارزیابی نتایج استفاده شده است. در ابتدا مناطق ساخته‌شده از روی تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ با شاخص‌های طیفی توسط حدآستانه خودکار جدا می‌شوند و یک ارزیابی بین نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های مختلف در هر تصویر انجام می‌شود و سپس نتایج کلی به‌دست‌آمده از دو سنجنده با یکدیگر مقایسه شدند تا توانایی هر یک از سنجنده‌ها مشخص شود.

۴ یافته‌ها و بحث


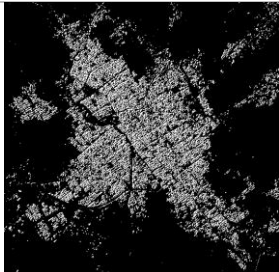



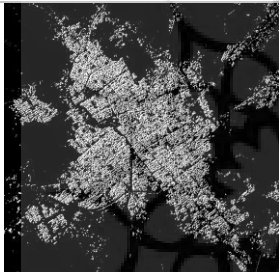
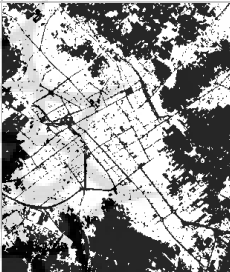


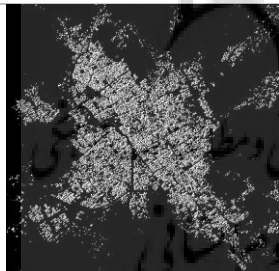
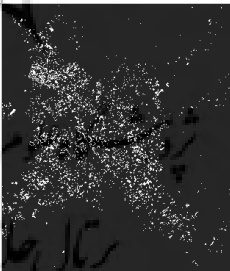
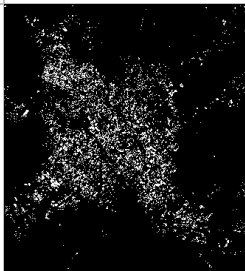
۴/۱ نتایج

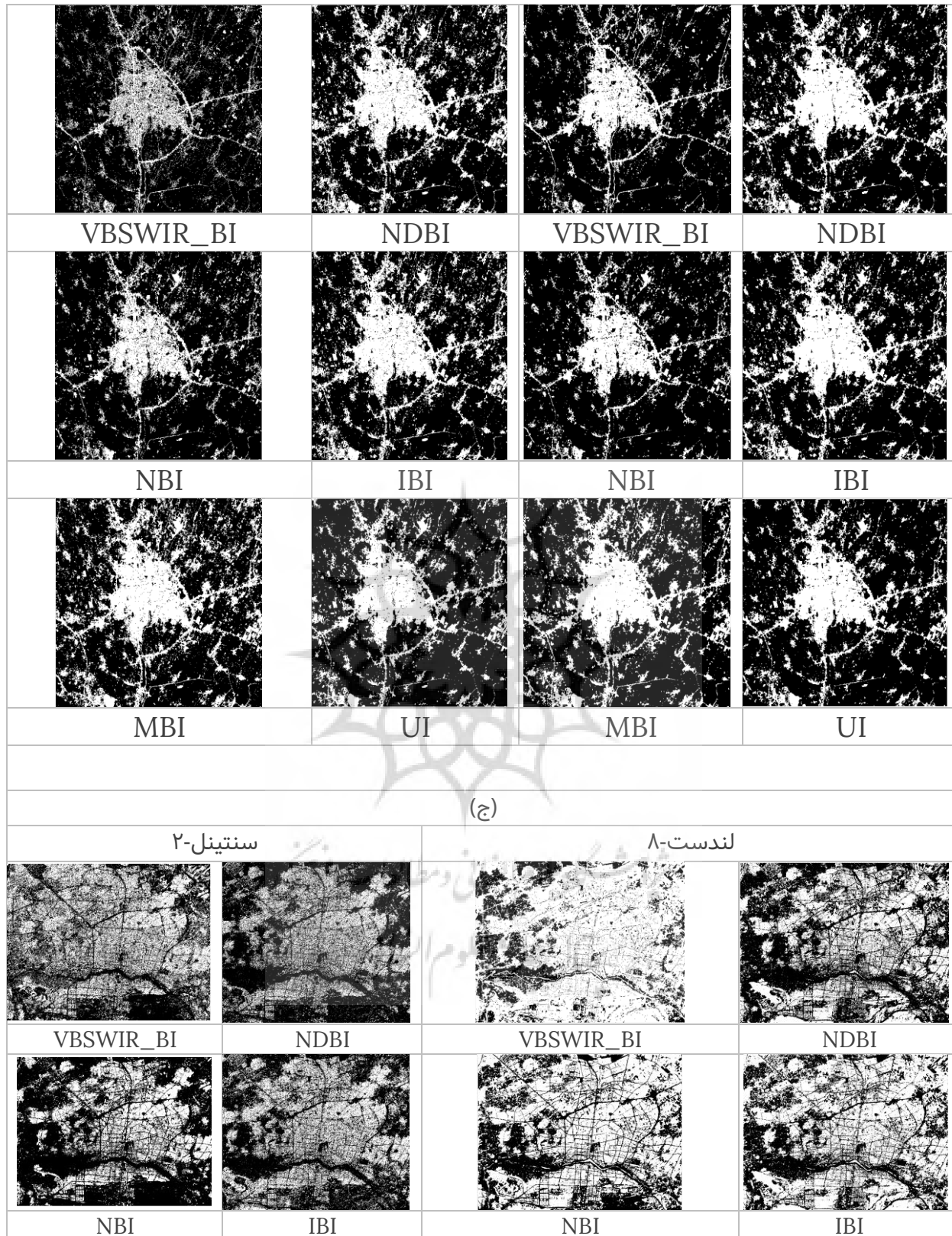
به‌منظور جداسازی مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده براساس شاخص‌های طیفی و بررسی نتایج حاصل از آن نیاز است تا یک فرایندی طی شود. به صورت کلی، مناطق غیرساخته‌شده شامل جنگل، علفزار و زمین‌های زراعی و مناطق ساخته‌شده شامل مناطق مسکونی، پارکینگ، جاده و سایر سطوح غیرقابل نفوذ است. بدین ترتیب پس از تفکیک مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده در این

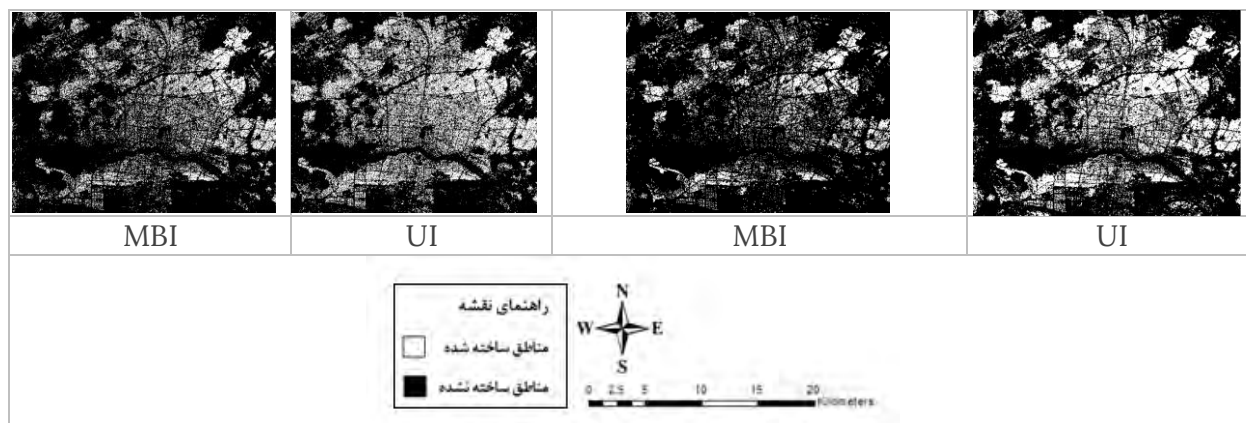
۳/۴ استخراج مناطق شهری

هدف از این بخش استخراج سریع مناطق ساخته‌شده براساس تصاویر سری زمانی سنتینل-۱ است. همان‌طور که از فلوچارت مشخص است ابتدا تصاویر سری زمانی سنتینل-۱ به صورت نزولی و صعودی در بازه زمانی مشخص اخذ شدند، در این پژوهش فقط باند ۷۷ تصاویر مورد استفاده قرار گرفت. سپس بر روی تصاویر سنتینل-۱ عملگرهای میانگین و انحراف معیار استاندارد اعمال شد. سپس با کمک هیستوگرام تصاویر میانگین و انحراف معیار و اعمال آستانه‌گذاری بر روی آنها می‌توان بهترین حدآستانه را به دست آورد. لازم به ذکر است که آستانه‌گذاری وابسته به هر یک از مناطق مورد مطالعه است و این کار به صورت دستی و آزمون خطا صورت می‌گیرد تا درنهایت بهترین نتیجه حاصل شود. در انتها با کمک تصاویر هیستوگرام، پیدا کردن مقادیر به صورت دستی و آستانه‌گذاری بر روی تصویر میانگین، تصویر PUL به دست می‌آید (Sun et al., 2019).

بخش نتایج به صورت بصری به تفکیک هر شهر برای دو سنجنده سنتینل و لندست مطابق شکل ۳ ارائه شده است

(الف)			
سنتینل-۲		لندست-۸	
			
VBSWIR_BI	NDBI	VBSWIR_BI	NDBI
			
NBI	IBI	NBI	IBI
			
MBI	UI	MBI	UI
(ب)			
سنتینل-۲		لندست-۸	





شکل ۳: شاخص‌های به‌دست‌آمده از تصاویر سنتینل و لندست (الف): رفسنجان (ب) آمل (ج): اصفهان

مربوط به هر شهر و هر سنجنده در جدول ۳
تاجدول ۵ ارائه شده است.

به‌منظور ارزیابی کمی دقت هر یک از شاخص‌های
شهری، اقدام به ارزیابی و اعتبارسنجی با نقشه
واقعیت زمینی‌شده توسط ماتریس ابهام و
پارامترهای آن شده است که نتایج به‌دست‌آمده

جدول ۳: نتایج مربوط به شهرستان رفسنجان

شاخص‌ها	سنتینل ۲			لندست ۸			مقایسه آماري
	خطای نادیده گرفتن	خطای مشارکت	دقت کلی	خطای نادیده گرفتن	خطای مشارکت	دقت کلی	مک‌نمار
NDBI	۱۴/۰۹	۳/۲۳	۹۴/۶۴	۳۰/۶۵	۲۸/۶۱	۸۵/۳۳	۱۱۹/۴۳
VBSWIR1_BI	۱۶/۲۸	۸/۷۰	۹۳/۱۱	۳۹/۶۹	۲۸/۴۸	۵۴/۵۵	۲۱۲/۰۶
IBI	۹/۲۹	۲/۶۸	۹۶/۷۵	۳۸/۵۴	۲۶/۴۴	۶۸/۰۳	۱۹۰/۴۴
UI	۱/۲۹	۶/۴۱	۹۸/۱۹	۳۱/۲۶	۴۰/۵۲	۸۶/۲۸	۱۲۳/۰۲
NBI	۲۱/۱۶	۱۵/۹۳	۹۰/۲۷	۳۸/۸۶	۲۶/۲۱	۶۰/۴۸	۱۸۵/۲۳
MBI	۲۴/۱۵	۳۴/۶۱	۷۲/۹۹	۴۰/۹۵	۳۴/۲۱	۴۱/۷۶	۲۴۹/۲۸



جدول ۴: نتایج مربوط به شهرستان آمل

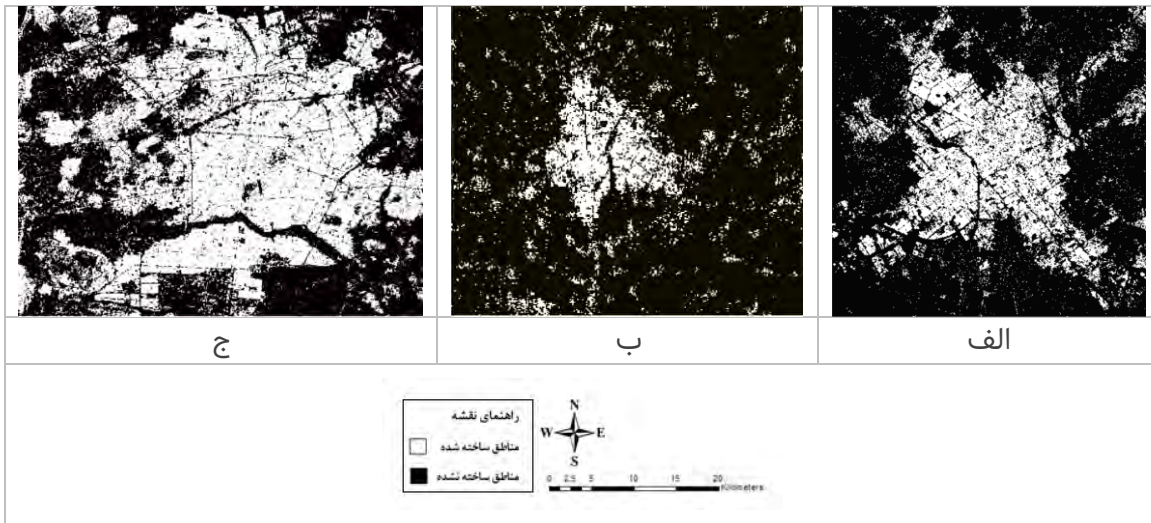
سنتینل ۲				لندست ۸			مقایسه آماري
شاخص‌ها	خطای نادیده گرفتن	خطای مشارکت	دقت کلی	خطای نادیده گرفتن	خطای مشارکت	دقت کلی	مک‌نمار
NDBI	۱۸/۶۳	۸/۳۸	۸۸/۵۱	۲۴/۶۴	۱۷/۰۲	۸۳/۷۱	۶۲/۱۳
VBSWIR1_BI	۱۱/۵۲	۱۳/۵۰	۹۲/۲۷	۲۱/۷۵	۲۰/۵۰	۸۶/۳۸	۶۹/۶۲
IBI	۱۸/۷۷	۸/۲۱	۸۸/۳۴	۲۴/۸۰	۱۶/۹۷	۸۳/۵۰	۶۲/۵۹
UI	۱۵/۶۶	۷/۱۵	۹۱/۰۴	۲۲/۸۰	۱۶/۶۰	۸۵/۵۵	۷۶/۴۶
NBI	۴/۹۴	۳/۳۳	۹۷/۴۸	۲۰/۴۸	۱۹/۱۷	۸۷/۲۱	۱۳۳/۳۱
MBI	۲۱/۱۹	۹/۰۰	۸۵/۵۶	۲۶/۱۵	۱۶/۹۰	۸۱/۶۴	۵۱/۱۶

جدول ۵: نتایج مربوط به شهرستان اصفهان

سنتینل ۲				لندست ۸			مقایسه آماري
شاخص‌ها	خطای نادیده گرفتن	خطای مشارکت	دقت کلی	خطای نادیده گرفتن	خطای مشارکت	دقت کلی	مک‌نمار
NDBI	۶/۶۴	۱۰/۸۰	۹۱/۶۹	۲۹/۵۰	۲۸/۱۱	۷۱/۲۵	۱۷۸/۵۴
VBSWIR1_BI	۲۲/۶۰	۲۰/۷۵	۷۸/۱۴	۳۱/۰۸	۳۴/۵۳	۵۸/۱۱	۱۴۲/۰۸
IBI	۹/۱۸	۸/۳۶	۹۱/۶۹	۳۱/۵۵	۳۰/۸۵	۶۵/۵۶	۲۲۷/۵۸
UI	۶/۳۰	۱۲/۲۹	۹۰/۹۰	۲۱/۶۸	۲۵/۰۶	۷۸/۷۳	۱۲۷/۸۳
NBI	۱۷/۰۶	۱۸/۴۹	۸۳/۶۵	۲۹/۴۶	۲۸/۷۱	۶۷/۵۰	۱۵۸/۲۴
MBI	۱۰/۲۷	۲۱/۴۴	۸۴/۰۸	۲۴/۱۵	۳۴/۶۱	۷۲/۹۹	۱۱۸/۶۹

همچنین یک ارزیابی نسبی بر روی تصاویر راداری سنتینل-۱ انجام شده است که در آن به بررسی مناطق ساخته‌شده به‌دست‌آمده از روی شاخص‌های طیفی و مناطق ساخته‌شده به دست آمده از روش PUL پرداخته شده است. نتایج

به‌دست‌آمده از این رویکرد به‌صورت بصری در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴): نتایج بصری استخراج مناطق ساخته شده از روش PUL

این ارزیابی نسبی در جدول ۶ گردآوری و ارائه شده است.

همچنین با کمک ماتریس ابهام، یک مقایسه‌ای از نتایج به دست آمده از ارزیابی کمی روش PUL با نقشه واقعیت زمینی صورت گرفته است که نتایج

جدول ۶): نتایج کمی روش PUL

شهرها	دقت کلی	خطای مشارکت	خطای نادیده گرفتن
رفسنجان	۸۰/۰۳	۲۴/۵۲	۳۴/۱۰
آمل	۸۹/۲۴	۲۴/۸۷	۲۱/۱۱
اصفهان	۷۶/۱۰	۲۲/۵۶	۲۴/۳۷

اراضی بایر باشد؛ و از آنجایی که پوشش‌های خاک با مناطق ساخته شده از نظر طیفی شباهت زیادی دارند در شناسایی مناطق ساخته شده در این مناطق چالش‌های بیشتری وجود دارد. این در حالی هست که در شهر آمل به علت تفاوت در رفتار طیفی باندها بین دو منطقه ساخته شده و پوشش گیاهی شناسایی مناطق ساخته شده با قدرت و دقت بیشتری انجام می‌شود. به همین ترتیب در ادامه سعی شده است تا هر کدام از مناطق مورد مطالعه به صورت جزئی‌تر مورد ارزیابی قرار بگیرند. همچنین موضوعی که در ابتدا قابل ذکر است این است که تصاویر تمامی شاخص‌ها در مناطق خشک و کویری رفسنجان و اصفهان به صورت غیرنرمال شده استفاده شده‌اند این در حالی است که در شهر آمل

۴٫۲ بحث و بررسی

به منظور ارزیابی نتایج ۶ شاخص طیفی نامبرده شده در بخش قبل برای تفکیک مناطق ساخته شده از مناطق ساخته نشده در سه شهر رفسنجان، آمل و اصفهان در سال ۲۰۲۰ از داده واقعیت زمینی استفاده شده است. این سه شهر از نظر شرایط اقلیمی منطقه با یکدیگر متفاوت می‌باشند؛ اطراف شهر آمل پوشیده شده از زمین‌های کشاورزی و زراعی است که در فصل گرم سال همواره پوشیده از پوشش گیاهی سبز است. در صورتی که شهرهای اصفهان و رفسنجان از اقلیم خشک و نیمه خشک برخوردار هستند که این باعث شده است پوشش غالب بر منطقه در اطراف شهر پوشش خاک و



تمامی شاخص‌ها به صورت نرمال شده استفاده شده و بر روی آنها حدآستانه اعمال شده است



شکل ۵: مقایسه دقت کلی شاخص‌های دو سنجنده، الف) شهر رفسنجان ب) شهر آمل، ج) شهر اصفهان، د) میانگین و انحراف معیار

به‌اشتباه به‌عنوان مناطق ساخته‌شده انتخاب شوند. همان‌طور که از نتایج مطابق شکل ۳-الف پیدا است این شرایط در تصویر لندست بیشتر دیده شده است و اغلب شاخص‌ها در جداسازی مناطق ساخته‌شده و خاک دچار مشکل بوده‌اند و مناطق شهری را به‌اشتباه بزرگ‌تر و بیشتر از واقعیت شناسایی کردند. تمام شاخص‌ها زمانی که با تصویر سنتینل محاسبه شدند دقت بسیار قابل قبولی از نظر ظاهری و کمی نشان داده‌اند؛ زیرا با بررسی که انجام شد اختلاف بین باند NIR و SWIR در مناطق شهری در تصاویر سنتینل بسیار بیشتر از مناطق خاک بود بدین‌صورت که مقدار NIR بسیار کمتر از SWIR بوده است و این اختلاف زیاد بین این دو باند باعث شده است تا مناطق از یکدیگر

نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌ها طبق شکل ۵-الف برای شهر رفسنجان حاکی از آن است شاخص‌ها در تصویر لندست نتوانسته‌اند خیلی از عملکرد مناسبی برخوردار باشند. یکی از علت‌های ناموفق بودن آن را می‌توان شرایط اقلیمی منطقه دانست؛ زیرا همان‌طور که در مطلب فوق بیان‌شده است در اطراف شهر علاوه بر پوشش گیاهی با وسعت و تراکم کم، پوشش خاک نیز وجود دارد و از آنجایی‌که رفتارهای طیفی منطقه ساخته‌شده و خاک به‌خصوص در باندهای NIR و SWIR1 بسیار به یکدیگر شباهت دارد در شناسایی مناطق ساخته‌شده شهری دچار اشتباه می‌شود و به همین دلیل ممکن است این دو منطقه از یکدیگر جدا نشوند و بخش‌هایی که به‌صورت خاک هستند



ساخته‌شده را از پوشش گیاهی جدا کنند و در مناطقی با شرایطی این‌چنینی بهتر عمل می‌کنند. همچنین خطاهای نادیده گرفتن و مشارکت این شاخص نیز نسبت به بقیه شاخص‌ها کمتر است این نشان‌دهنده آن است که پیکسل‌هایی که این شاخص به‌طور صحیح به‌عنوان مناطق ساخته‌شده انتخاب کرده است، به تصویر واقعیت زمینی نزدیک‌تر است. ضعیف‌ترین شاخص مطابق جدول ۴ در این حالت شاخص MBI با دقت کلی ۸۵/۵۶ است. شایان‌ذکر است این شاخص در تصاویر لندست نیز مشابه سنتینل با دقت کلی ۸۱/۶۴ نسبت به بقیه شاخص‌ها از دقت کمتری برخوردار است و می‌توان گفت دارای عملکرد مشابهی می‌باشند؛ و بهترین شاخص در لندست و سنتینل شاخص NBI بوده که به‌ترتیب دارای دقت ۸۷/۲۱ و ۹۷/۴۸ است؛ زیرا این شاخص یک ارزیابی از آلودگی سطح ارائه می‌دهد که ممکن است برای تمایز گروه‌هایی از ویژگی‌ها با توجه به روشنایی نسبی آنها مفید باشد.

در سومین منطقه مطالعاتی شهر اصفهان نتایج ارزیابی عملکرد شاخص‌ها مطابق جدول ۵ در این شهر بیانگر آن است که بالاترین دقت در تصاویر سنتینل و لندست به‌ترتیب مربوط به شاخص IBI و UI است که دقت این شاخص‌ها در تصاویر سنتینل و لندست به‌ترتیب برابر با ۹۱/۶۹ و ۷۸/۷۳ بوده است. در مقابل از بین شاخص‌های موجود شاخص VBSWIR1_IB از عملکرد ضعیفی برخوردار بوده است و دقت‌های به‌دست‌آمده به‌ترتیب برابر با ۷۸/۱۴ و ۵۸/۱۱ بوده است. در واقع در این منطقه مورد مطالعه همان‌طور که از شکل ۵-ج پیدا است رفتار و عملکرد شاخص‌ها برای دو تصویر از سنجنده‌های سنتینل ۲ و لندست ۸ روند یکسان داشته است ولی دقت سنتینل ۲ همان‌طور که از نظر ظاهری و بصری نیز پیدا بود همواره بالاتر از لندست بوده است.

همچنین در بررسی دیگر میانگین و انحراف معیار هر یک از شاخص‌ها در سه شهر محاسبه شد و

به‌راحتی تفکیک شوند. این در حالی است که در تصویر لندست این منطقه، رفتار مناطق خاک و مناطق ساخته‌شده شباهت بیشتری به یکدیگر داشته‌اند و این نشان‌دهنده قدرت طیفی بالاتر تصویر سنتینل است. همچنین با تحلیل به‌صورت کمی از روی نتایج به‌دست‌آمده مطابق نتایج جدول ۳، شاخص‌های استخراج‌شده از تصاویر سنتینل از دقت بالاتری نسبت به تصاویر لندست برخوردار هستند که این نتایج توسط آزمون آماری مک‌نمار نیز تأیید شده است و بهترین شاخص در هر دو سنجنده لندست و سنتینل شاخص UI بوده که با دقت کلی به‌ترتیب ۸۶/۲۸ و ۹۸/۱۹ دارای بهترین عملکرد در بین شاخص‌ها بوده است.

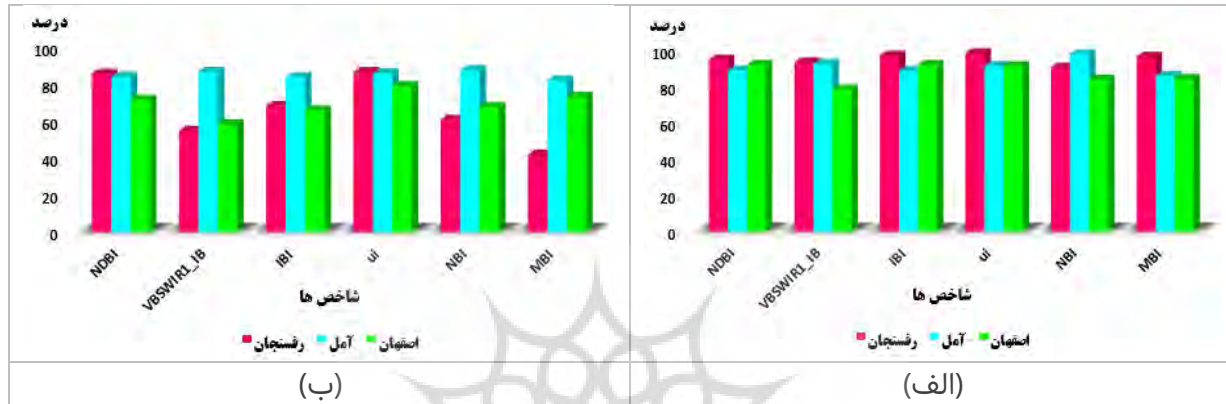
در ادامه نتایج شهر آمل مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در شهر آمل تمامی شاخص‌های به‌دست‌آمده از دو تصویر لندست-۸ و سنتینل-۲ در شناسایی مناطق ساخته‌شده مطابق شکل ۳-ب-۵ موفق عمل کرده‌اند. در تحلیل جزئی‌تر از بین نتایج شاخص‌های به‌دست‌آمده از دو تصویر، مطابق شکل ۵-ب می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات دقت برای هر دو سنجنده یکسان بوده است ولی تصاویر سنتینل ۲ از دقت بیشتری برخوردار بوده‌اند که علت آن می‌تواند وضوح مکانی و طیفی بهتر تصاویر سنتینل باشد.

همچنین موضوع دیگری که در نتایج تأثیرگذار است شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه است که هرکدام از شاخص‌ها می‌توانند با توجه به شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه دقت‌های متفاوتی را ارائه دهند. از آنجایی که در شهر آمل پوشش گیاهی سبز و مناطق ساخته‌شده جز پوشش‌های غالب هستند شاخص‌هایی که از باندهای SWIR و NIR استفاده می‌کنند دارای دقت بیشتری هستند؛ زیرا پوشش گیاهی در باند NIR و مناطق ساخته‌شده در باند SWIR دارای بازتاب بیشتری می‌باشند و اختلاف زیاد بین این دو باعث می‌شود منطقه ساخته‌شده از پوشش گیاهی به‌راحتی جدا شود. در واقع شاخص‌های IBI, NDBI, UI ارائه‌شده‌اند تا مناطق



انحراف معیار را از بین ۶ شاخص موجود داشته‌اند. این بررسی بیانگر آن است که شاخص UI که از میانگین بالاتر و انحراف معیار کمتری برخوردار بوده است دقت بالاتری داشته است و بالعکس شاخص MBI از دقت پایین‌تری برخوردار بوده است

نتایج آن در شکل ۵-د ارائه شد. همان‌طور که پیداست در مقایسه بین میانگین شاخص‌ها، شاخص UI بالاترین مقدار میانگین را داشته است و شاخص MBI از کمترین مقدار برخوردار بوده است. در رویکرد دیگر که مقایسه‌ای بین انحراف معیار هر یک از شاخص‌ها انجام شد، شاخص‌های MBI و UI به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار



شکل ۶: مقایسه دقت کلی نتایج برحسب شاخص و شهر (الف): تصاویر سنتینل (ب): تصاویر لندست

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شاخص‌های طیفی شهری در ویژگی‌های اقلیمی، شرایط توپوگرافی و آب‌وهوایی مختلف دارای عملکردهای متفاوتی می‌باشند (Attarchi et al., 2020; Valdiviezo-N et al., 2018). بنابراین با در نظر گرفتن تمامی شرایط در انتخاب شاخص می‌توان به نتایج مطلوبی دست‌یافت.

از آنجایی که برخی از شاخص‌ها در این دو شهر از دقت مناسبی برخوردار نبوده‌اند به منظور ارزیابی بیشتر بر روی شاخص‌هایی که ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند حدآستانه به صورت دستی اعمال شده است. هدف از این کار ارزیابی توانایی شاخص با استفاده از حدآستانه دستی است به این دلیل که احتمال داده شده است که ممکن است علت پایین بودن دقت، ناشی از حدآستانه مورداستفاده بوده باشد و اگر حدآستانه به صورت دستی انتخاب شود شانس بالا بردن دقت را بتوان افزایش داد. به همین منظور پس از اعمال حدآستانه بر روی شاخص‌های انتخاب شده نتایج به دست آمده در جدول ۷ آورده شده است:

جدول ۷: نتایج به دست آمده از دقت استخراج مناطق ساخته شده از روی شاخص‌ها به صورت دستی

شهر	دقت کلی اتسو	دقت کلی دستی	شاخص	سنجده
رفسنجان	۹۰/۲۷	۸۷/۶۹	NBI	سنتینل ۲
	۴۱/۷۶	۸۵/۵۳	MBI	لندست ۸
آمل	۸۵/۵۶	۹۶/۲۵	MBI	سنتینل ۲
	۸۱/۶۴	۸۸/۰۵	MBI	لندست ۸
اصفهان	۷۸/۱۴	۸۰/۹۸	VBSWIR1_IB	سنتینل ۲
	۵۸/۱۱	۶۴/۰۳	VBSWIR1_IB	لندست ۸

طیفی، حدآستانه‌ها و شرایط اقلیمی با وزن تأثیرگذاری‌های متفاوت در دقت نتایج استخراج مناطق ساخته شده می‌توانند دخیل باشند.

در یک مقایسه کلی بین شاخص‌ها در شهرهای مختلف توسط دو سنجده مطابق شکل ۶ می‌توان دریافت که همواره شاخص‌ها زمانی که از تصویر سنتینل استخراج می‌شوند دارای دقت بالاتر و عملکرد بهتری در شناسایی مناطق ساخته شده خواهند بود که در هر سه شهر نتایج توسط آزمون آماری مک‌نمار هم مورد تأیید قرار گرفته است. این امر با یافته‌های موتیتانون و همکاران نیز همخوانی دارد (Muttitanon, 2021). همچنین دلیری و همکاران نیز در پژوهش خود به‌به نتایج مشابهی دست یافتند و برتری تصاویر سنتینل-۲ نسبت به لندست-۸ را ثابت کردند (Deliry et al., 2021). در مقایسه‌ای جزئی‌تر بین شهرها مطابق شکل ۶ می‌توان گفت شاخص‌ها در شهر آمل حتی زمانی که از تصویر لندست استفاده می‌شود نیز نتایج قابل قبولی ارائه داده‌اند و می‌توان گفت در این شهر همواره میانگین دقت تمامی شاخص‌ها قابل قبول بوده است؛ بنابراین یکی از پارامترهای مؤثر در این زمینه نوع اقلیم شهر است. اهمیت نوع اقلیم در مطالعات عطارچی و همکاران و همچنین Valdiviezo و همکاران نیز اشاره شد که

همان‌طور که از نتایج به دست آمده در جدول ۷ پیدا است حدآستانه دستی باعث بهبود دقت شده است و در اغلب موارد توانسته است باعث افزایش دقت شود؛ بنابراین مطابق شکل ۷ می‌توان گفت عوامل زیادی مانند نوع سنجده‌ها، شاخص‌های



شکل ۷: عوامل تأثیرگذار در دقت استخراج مناطق ساخته شده

حدآستانه‌ها و سنسورهای مختلف ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است این است که تأثیر هر یک از پارامترهای نامبرده شده بر روی دقت عملکرد شاخص‌ها سنجیده شود.

مطابق نتایج به دست آمده شاخص NBI برای شهر آمل (اقلیم مرطوب) در تصاویر سنتینل و لندست و شاخص UI در شهر اصفهان و رفسنجان (اقلیم خشک و کویری) در تصاویر لندست و IB1 اصفهان در سنتینل دارای بهترین دقت بوده است و توانایی بالایی را از خود در تفکیک مناطق ساخته شده از ساخته نشده نشان داده است. همچنین یافته‌های پژوهش نشان داد که کارایی شاخص‌ها بسته به ویژگی‌های سنسورها می‌تواند متفاوت باشد. علاوه بر آن به علت ساختار بافتی متفاوت شهرها و بستگی به چگونگی شرایط پوشش گیاهی هر شاخص دارای عملکرد متفاوتی است و برخی از شاخص‌ها وابستگی زیادی به پوشش گیاهی اطراف منطقه شهری دارند. به طور مثال وجود پوشش گیاهی و زمین‌های زراعی به عنوان مناطق ساخته نشده در منطقه با اقلیم مرطوب و سرسبز موجب تفکیک بهتر آن از مناطق ساخته شده است در مقابل وجود خاک بایر در مناطق کویری موجب تشخیص نادرست شده است و به اشتباه جزو مناطق ساخته شده لحاظ شده است؛ بنابراین ضروری است که شاخص‌های طیفی

همچنین نتایج به دست آمده از PUL مطابق جدول ۶ حاکی از آن است بهترین دقت از بین مناطق مورد مطالعه مربوط به شهر آمل است که دقت ۸۹/۲۴ داشته است ولی در حالت کلی دقتی که از این روش به دست آمده است در مقابل با حالاتی که از شاخص‌ها استفاده می‌شود دارای عملکرد ضعیف‌تری بوده است.

۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با گسترش شهرنشینی و در پی آن نیاز جامعه به مناطق مسکونی و همچنین مناطق تجاری و تفریحی در محیط‌های شهری باعث افزایش مناطق ساخته شده می‌شود به همین منظور کشف و استخراج این‌گونه مناطق امری بسیار مهم تلقی می‌شود. با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌توان به پایش تغییرات پوشش زمین پرداخت و درک مناسبی از محیط‌های شهری داشت، لذا مدیریت و برنامه‌ریزی دقیق شهری امری ضروری و غیرقابل اجتناب است. به همین منظور در این مطالعه کارایی شاخص‌های طیفی به جهت شناسایی و تفکیک مناطق ساخته شده از ساخته نشده مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شهرهای آمل، اصفهان و رفسنجان است که از اقلیم‌های متفاوتی برخوردار هستند و تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ است. دلیل اینکه در این پژوهش سه شهر مختلف،



مطابق با نوع پراکندگی و بافت شهری، وضعیت پوشش گیاهی انتخاب شوند تا بتوان با دقت بالایی مناطق شهری را از سایر کاربری‌ها تفکیک کرد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در مناطق خشک با پوشش گیاهی ضعیف شاخص UI و در منطقه با اقلیم مرطوب و معتدل شاخص NBI دارای بهترین عملکرد بوده است. همچنین به‌طور کلی و با قاطعیت سنتینل-۲ در مقایسه با لندست-۸ در تفکیک مناطق ساخته‌شده از ساخته‌نشده دارای دقت و اعتبار بالاتری بوده است. همچنین حدآستانه اتسو به‌عنوان یک حدآستانه خودکار در اغلب موارد دارای توانایی بالایی در استخراج مناطق ساخته‌شده داشته است. با این حال با توجه به مزایای منحصربه‌فرد، در صورت عدم نتیجه قابل‌قبول می‌توان از حدآستانه دستی استفاده شود تا بدین منظور دقت کار افزایش یابد. با این تفاسیر می‌توان گفت که ضروری است که انتخاب شاخص‌های طیفی با در نظر گرفتن وضعیت شرایط پوشش گیاهی در هر اقلیم، همگنی بافت و ساختار هر منطقه شهری صورت گیرد تا بدین سبب بتوان با دقت بالایی مناطق ساخته‌شده را شناسایی و تفکیک کرد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



منابع

- Ali, Ahmed, & Nayyar, Zeeshan Alam. (2021). A Modified Built-up Index (MBI) for automatic urban area extraction from Landsat 8 Imagery. *Infrared Physics & Technology*, 116, 103769.
- Attarchi, Sara, Poorrahimi, Mojtaba, & Isazade, Vahid. (2020). Comparison of spectral indices and object-based classification for built-up area extraction in different urban areas. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 8(1), 23-43. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2020.299492.1249>
- Deliry, Sayed Ishaq, Avdan, Zehra Yiğit, & Avdan, Uğur. (2021). Extracting urban impervious surfaces from Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data for urban planning and environmental management. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 6572-6586.
- Ezimand, Keyvan, Abdollahi Kakroodi, Ataallah, & Kiavarz Moghaddam, Majid. (2017). Classification and Change Detection of Urban Built-up Lands Using Remote Sensing Images. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 5(3), 445-468. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2018.229640.687>
- Ezimand, Keyvan, Kakroodi, AA, & Kiavarz, Majid. (2018). The development of spectral indices for detecting built-up land areas and their relationship with land-surface temperature. *International journal of remote sensing*, 39(23), 8428-8449.
- Foody, Giles M. (2004). Thematic map comparison: Evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(5), 627-634.
- Jafari, Shahin, & Attarchi, Sara. (2021). Detection of urban built-up areas by using Sentinel-1 images from different orbits, Case study: Isfahan. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 9(3), 709-734. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2021.317204.1439>
- Jieli, Chen, Manchun, LI, et al. (2010). Extract residential areas automatically by new built-up index. The 18th International Conference on Geoinformatics: GIScience in Change, Geoinformatics 2010, Peking University, Beijing, China, June, 18-20, 2010
- Kawamura, Makoto. (1996). Relation between social and environmental conditions in Colombo Sri Lanka and the urban index estimated by satellite remote sensing data. Proc. 51st Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers,
- Liu, Yongxue, Chen, Jieli, et al. (2014a). Spatiotemporal dynamics of the urban sprawl in a typical urban agglomeration: a case study on Southern Jiangsu, China (1983-2007). *Frontiers of earth science*, 8, 490-504.
- Liu, Yongxue, Chen, Jieli, et al. (2014b). Spatiotemporal dynamics of the urban sprawl in a typical urban agglomeration: a case study on



- Southern Jiangsu, China (1983–2007). *Frontiers of earth science*, 8(4), 490–504.
- Lynch, Philip, Blesius, Leonhard, & Hines, Ellen. (2020). Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. *Remote Sensing*, 12(15), 2503.
- Masek, JG, Lindsay, FE, & Goward, SN. (2000). Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973–1996, from Landsat observations. *International journal of remote sensing*, 21(18), 3473–3486.
- McNemar, Quinn. (1947). Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. *Psychometrika*, 12(2), 153–157.
- Muttitanon, Wutjanun. (2021). ANALYZING OF VARIOUS INDICES OF BUILT-UP AND BARE LAND IN YANGON, MYANMAR. การประชุมวิชาการ วิศวกรรม โยธา แห่งชาติ ครั้งที่ ๒๕, ๒๕.
- Otsu, Nobuyuki. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Pandey, Dwijendra, & Tiwari, KC. (2020). Extraction of urban built-up surfaces and its subclasses using existing built-up indices with separability analysis of spectrally mixed classes in AVIRIS-NG imagery. *Advances in Space Research*, 66(8), 1829–1845.
- Risky, Yanuar S, Aulia, Yogi H, & Widayani, Prima. (2017). Spatiotemporal Built-up Land Density Mapping Using Various Spectral Indices in Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS (Case Study: Surakarta City). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,
- Sun, Zhongchang, Xu, Ru, et al. (2019). High-resolution urban land mapping in China from sentinel 1A/2 imagery based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(7), 752.
- Valdiviezo-N, Juan C, Téllez-Quiñones, Alejandro, Salazar-Garibay, Adan, & López-Caloca, Alejandra A. (2018). Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion. *JOSA A*, 35(1), 35–44.
- Xi, Yantao, Thinh, Nguyen Xuan, & Li, Cheng. (2019). Preliminary comparative assessment of various spectral indices for built-up land derived from Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI imageries. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 240–252.
- Xu, Hanqiu. (2007). Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(12), 1381–1391.
- Xu, Hanqiu. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International journal of remote sensing*, 29(14), 4269–4276.
- Zha, Yong, Gao, Jay, & Ni, Shaoxiang. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*, 24(3), 583–594.