



The influence of urban structures, vegetation cover, and utilized data in urban impervious surface mapping from multi-source data

Ali Abdolkhani¹ , Sara Attarchi² , Seyed Kazem Alavipanah³

1. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran

Email: aliabdolkhani@ut.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran

Email: satarchi@ut.ac.ir

3. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran

Email: salavipa@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

28 November 2023

Received in revised form:

28 February 2024

Accepted:

26 March 2024

Available online:

3 May 2024

Keywords:

UAV,

Urban Impervious

Surfaces,

Reliability,

Urban Structures,

Vegetation.

ABSTRACT

Given the significant impact of expanding impervious surfaces on the urban environment, obtaining accurate and up-to-date information about impervious surfaces (IS) is important in urban planning and sustainable management. Remote sensing data, especially aerial photos, have a high potential to provide the mentioned information and have been successfully used in recent years. Despite the widespread use of these data in urban impervious surfaces (UIS) mapping, the reliability and accuracy of the final map still need further investigation. Therefore, in this study, using a detailed and precise classification scheme, drone, and Sentinel satellite data, the impact of three parameters including utilized data, urban structure, and vegetation canopy on the output maps accuracy was evaluated. The results showed that all three factors are of great importance and may cause significant uncertainty in the output maps. Vegetation cover can lead to up to 10% underestimate in the IS. Additionally, changes in urban structure in different areas and changes in the utilized data can also result in a 20% change in the overall accuracy. Results from this work can be used to provide a proper understanding of the reliability of remote sensing products and depict directions for future methodological development.

Cite this article: Ettehad, S. Sh., Tavakolinia, J., & Ranama, M. R. (2024). Structural-interpretive modeling of food security in Mashhad city with a good governance approach. *Geographical Urban Planning Research Quarterly*, 12 (1), 149-173.

<http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2024.380831.1979>



© The Author (s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Urban development and the resulting changes in land cover can have a significantly negative impact on natural habitats, microclimates, and urban hydrological systems. This is primarily due to the replacement of natural surfaces with impervious ones, such as streets, buildings, and parking lots which prevent water infiltration. In line with the sustainable development of cities, it is of great importance to have accurate and detailed information of these surfaces to monitor their growth and study their impacts. Remote sensing has proved useful to provide spatially explicit information about urban areas. Remote sensing data includes various types, such as images with high spectral, high spatial or high temporal resolution. Each has its own privilege and shortcomings. These data has complementary nature; as an example, backscattering values in Sentinel-1 polarimetric bands govern by the surface roughness and moisture content or reflectance in RGB bands depends on the color. Although many studies have focused on extracting this information from remote sensing data, key issues like the accuracy of final maps, the factors affecting it and the spatial distribution of errors have not been thoroughly addressed. Therefore, this study aims to evaluate and quantify the impact of some various influential factors including vegetation, urban structure, and the data utilized.

Methodology

In order to allow a quantitative comparison, this research was conducted in two distinct blocks under varying condition conditions in the city of Ahvaz located in the southwest of Iran. For this purpose, initially, the UAV data for two blocks was classified using the classification scheme with 18 subclasses and the random forest algorithm. Subsequently, the UAV RGB image was fused with the Sentinel 1 data, and features such as NDVI, NDBI, and texture were extracted using a feature-based algorithm. The random forest classification algorithm was done.

The results from various classifications were assessed and compared using 1911 random

training and validation samples. Additionally, the tree canopy map derived from the classification was intersected with the map of streets, residential blocks and park impervious surfaces, which was prepared using the municipality database, and the results were evaluated.

Results and discussion

The results showed:

- When using only drone data, the random forest algorithm achieved an overall accuracy and Kappa coefficient of 0.826 and 0.816, respectively, in block A. However, in block B, these accuracy parameters were significantly lower, at 0.612 and 0.587. Given that the data, algorithm and pattern used in both blocks are identical, the decrease in accuracy could be attributed to the changes in the urban structure relative to the flight lines or differences in the height distribution between the two areas.
- The fusion of Sentinel and UAV data fusion resulted in a significant improvement in classification accuracy, raising the overall accuracy from 0.612 to 0.8. An assessment of the subclass's accuracy revealed that the paved sidewalk subclass experienced the highest accuracy improvement, with a 54% increase.
- Due to the vegetation canopy obscuring impervious surfaces, 9% of the Block A and approximately 3% of the Block B streets have been incorrectly classified as vegetation.
- Expressing the error caused by vegetation as a fraction of the canopy area rather than the impervious surfaces makes the stated error percentage more accurately.

Conclusion

The main conclusions of this study can be summarized as follows:

- By utilizing the multi-source data (RGB UAV, spectral indices from Sentinel-2, polarimetric bands of Sentinel-1 and textures), impervious surfaces can be extracted with a high level of detail (17 classes) and acceptable accuracy. Because, these data has complementary nature and the joint use of them will increase the classification accuracy.
- Irregular urban structures can increase classification errors due to the significant

changes in features direction relative to the view angle, especially in the case of short-range photogrammetry. Therefore, the effect of urban structure on impervious surface classification accuracy depends on the utilized dataset.

- Urban impervious surfaces are frequently underestimated because they are covered by tree canopies. The errors caused by these obscured surfaces vary across different parts of the city and do not follow a specific pattern.

-The results of this work can enhance our understanding of the reliability of remote sensing products and provide guidance for future methodological developments.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

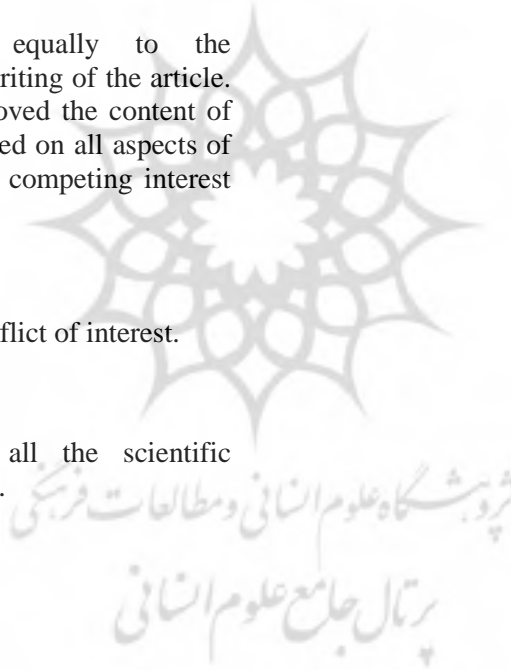
Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری

بررسی اثر ساختار شهری، پوشش گیاهی و داده‌های مورد استفاده بر صحت نقشه سطوح نفوذناپذیر شهری با تأکید بر داده‌های چند منبعی

علی عبدالخانی^۱، سارا عطارچی^۲، سید کاظم علوی پناه^۳

- ۱- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: aliabdolkhani@ut.ac.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: satarachi@ut.ac.ir
۳- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: salavipa@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۰۷	
تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۲/۱۴	
واژگان کلیدی: پهپاد، سطوح نفوذناپذیر شهری، قابلیت اطمینان، ساختار شهری، پوشش گیاهی.	باتوجه به تأثیر قابل توجه گسترش سطوح نفوذناپذیر بر اکوسیستم شهری، تهیه اطلاعات دقیق و به‌روز این سطوح عامل مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار شهری محسوب می‌شود. داده‌های سنجش‌از‌دور و به‌ویژه تصاویر هواپرد پتانسیل بالایی در ارائه اطلاعات مذکور داشته و در سال‌های گذشته با موفقیت بالایی، در این راستا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علیرغم کاربرد وسیع این داده‌ها در تهیه اطلاعات سطوح نفوذناپذیر شهری، قابلیت اطمینان و صحت خروجی این فرایند همچنان به بررسی بیشتر نیاز دارد؛ صحت نهایی نقشه‌های تولید شده از عوامل متعددی تأثیر می‌پذیرد که در این تحقیق با بکارگیری الگوی طبقه‌بندی دقیق و جزئی و استفاده از داده‌های پهپاد و ماهواره سنتینل، تأثیر پارامترهای داده، ساختار شهری و پوشش گیاهی بر صحت نقشه‌های خروجی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر سه عامل می‌توانند باعث ایجاد عدم اطمینان قابل توجهی در نقشه‌های خروجی گردند. پوشش گیاهی به عنوان یکی از مهمترین موانع ثبت عکس العمل واقعی عوارض توسط سنجنده‌ها، می‌تواند تا ۱۰ درصد کاهش در مساحت سطوح نفوذناپذیر برآورد شده نسبت به مساحت واقعی را سبب شود که این مقدار تحت تأثیر تراکم پوشش گیاهی می‌باشد. همچنین تغییر ساختار شهری در مناطق مختلف و تغییر داده مورد استفاده نیز می‌تواند باعث تغییر ۲۰ درصدی در شاخص صحت کلی گردد. نتایج این تحقیق می‌تواند در ارائه بینش صحیح نسبت به قابلیت اطمینان نقشه سطوح نفوذناپذیر و توسعه روشهای بهبود آن مورد استفاده قرار گیرد.
استناد: عبدالخانی، علی؛ عطارچی، سارا و علوی پناه، سید کاظم. (۱۴۰۳). بررسی اثر ساختار شهری، پوشش گیاهی و داده‌های مورد استفاده بر صحت نقشه سطوح نفوذناپذیر شهری با تأکید بر داده‌های چند منبعی. <i>پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری</i> ، ۱۲ (۱)، ۱۷۳-۱۴۹. http://doi.org/10.22059/jurbangeo.2024.380831.1979	
	© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

مقدمه

توسعه شهری و تغییرات مهمی که به تبع آن در پوشش اراضی محیط‌های شهری اتفاق می‌افتد، می‌تواند اثرات منفی قابل توجهی بر زیستگاه‌های طبیعی، میکرو اقلیم‌ها و سیستم‌های هیدرولوژیکی شهری داشته باشد (Collier, 2006; Hatt et al., 2004; Hou et al., 2022; Kun et al., 2016). که عمدتاً ناشی از حذف سطوح طبیعی و جایگزینی آنها با سطوح نفوذناپذیر است. سطوح نفوذناپذیر به سطوحی مانند خیابان‌ها، ساختمان‌ها، پارکینگ‌ها اطلاق می‌گردد که باعث جلوگیری از نفوذ آب به زمین می‌شود (Gong et al., 2019). تهیه اطلاعات دقیق و جزئی این سطوح هم از نظر پایش میزان گسترش آنها و هم از نظر بررسی تأثیرات ناشی از آنها به منظور دستیابی به توسعه پایدار شهرها از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. اطلاعات جزئی از نوع، تراکم، ساختار و هدایت گرمایی این سطوح برای تشریح وضعیت حوضه‌های آبخیز شهری (Yang et al., 2010)، به‌عنوان ورودی مدل‌های زیست محیطی (Alberti et al., 2007) و مدل‌سازی فرایندهای اتمسفری و تغییرات آب‌وهوایی (Ooi et al., 2017)، بررسی موازنه انرژی خورشیدی، دمای سطح و جزایر حرارتی در مناطق مسکونی (Yuan & Bauer, 2007) و مطالعات اقتصادی - اجتماعی (Wu & Murray, 2003) بسیار ضروری می‌باشد. از بین روش‌های مختلف برداشت این اطلاعات، سنجش‌ازدور نسبت به سایر روشها از توانایی بالایی برخوردار می‌باشد (Carlson, 2003). در این میان فتوگرامتری هوایی به دلیل توانایی ارائه داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به طور موفقی برای تفکیک کاربری‌های شهری و تهیه نقشه سطوح نفوذناپذیر با مقیاس مناسب مورد استفاده قرار گرفته است (Pauleit et al., 2005; Cadenasso et al., 2007). داده‌های مبتنی بر پهپاد نیز به عنوان بخشی از تصاویر هوای در سالیان اخیر به دلیل ارائه داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، هزینه پایین‌تر و پیچیدگی کمتر در مطالعات کاربری شهری و سطوح نفوذناپذیر بشدت مورد استقبال قرار گرفته است (Fernandez Crommelinck et al., 2016; Yao et al., 2019; Elamin & El-Rabbany, 2022; Jazayeri et al., 2014; Galarreta et al., 2015). بطور کلی تصاویر با قدرت تفکیک بالا مهمترین منبع تامین اطلاعات دقیق سطوح نفوذناپذیر می‌باشند اما قدرت تفکیک بالای این تصاویر در کنار پیچیدگی بسیار بالای ساختارهای شهری، موجب ایجاد عدم قطعیت زیادی در استخراج اطلاعات می‌گردد که ناشی از عوامل مختلفی مانند موانع دیدهمچون سایه و پوشش گیاهی (Shao et al., 2023) و جابجایی ناشی از هندسه تصویربرداری و ساختار شهری (Van der Linden & Hostert, 2009) می‌باشد. سایه موجب می‌گردد که شناسایی عوارض به دلیل کاهش شدید انعکاس ثبت شده، به‌ویژه در خصوص سنجنده‌هایی که فقط در محدوده طیف مرئی فعالیت می‌کنند، با مشکل جدی مواجه شود. پوشش گیاهی نیز به دلیل پوشاندن سطوح نفوذناپذیر سبب می‌گردد که بخش قابل توجهی از این سطوح به‌عنوان پوشش گیاهی طبقه‌بندی گردد. این موضوعات در خصوص تصاویر پهپاد به دلیل خصوصیات ذاتی آنها مانند هندسه تصویربرداری و برداشت از ارتفاع بسیار پایین و در نتیجه لزوم استفاده از دوربین‌های با میدان دید لحظه‌ای^۱ بزرگتر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. لازم به توضیح است که برداشت اطلاعات از ارتفاع پایین نیازمند افزایش میدان دید لحظه‌ای به‌منظور پوشش مساحت مورد نظر در هر نوار برداشت و نیز دستیابی به نسبت سیگنال به نویز مناسب می‌باشد (Van der Linden & Hostert, 2009). به‌طور کلی کمی‌سازی و کاهش اثرات منفی ناشی از این موارد در فتوگرامتری هوای در مطالعات (Zhou et al., 2005)، (Rau et al., 2002) مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Occlusion problems

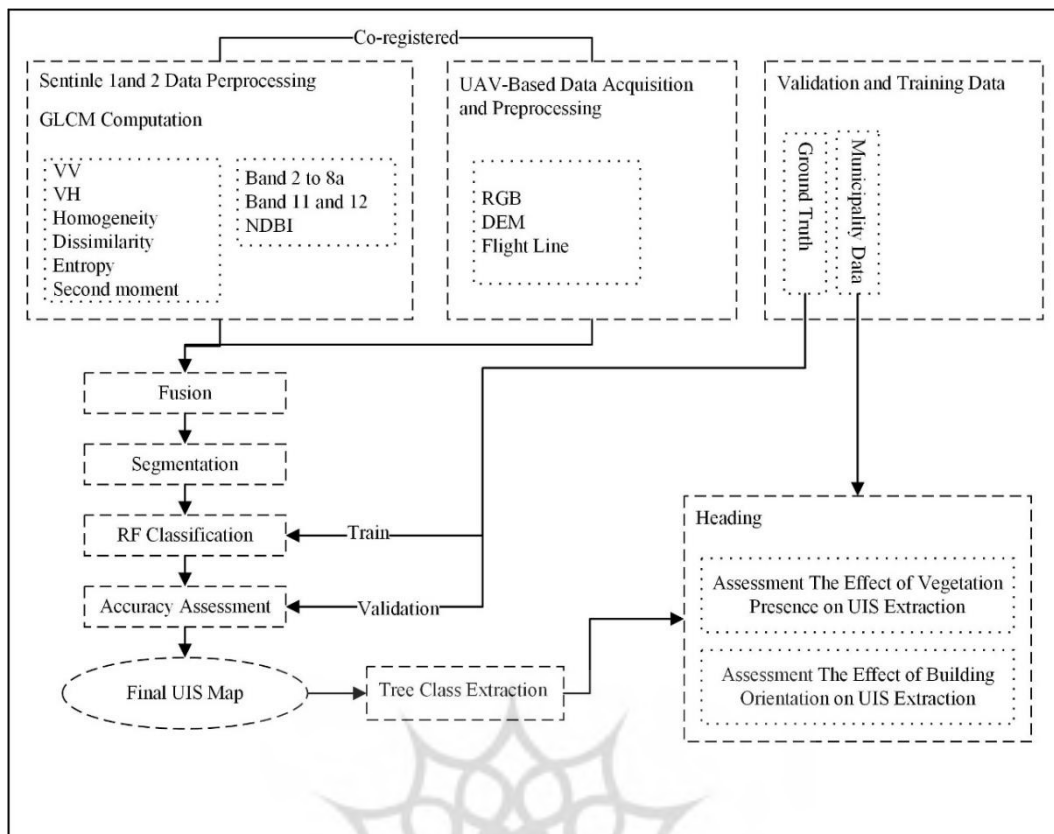
2. FOV: Filed Of view

منظور از مشکلات ناشی از موانع دید، خطاهایی است که به دلیل پوشیده شدن برخی از عوارض توسط سایر عوارضی که در ارتفاع بالاتر از آنها قرار می‌گیرند، ایجاد می‌گردد که از آن جمله می‌توان به پوشیده شدن برخی از المان‌های شهری مانند سطوح پیاده‌رو به وسیله تاج‌پوشش گیاهی اشاره نمود. سطوح نفوذناپذیر شهری در خیابان‌ها و منازل مسکونی اغلب توسط تاج‌پوشش درختان پوشیده می‌شود و این امر در صورت وجود ردیف‌های درختکاری به شدت افزایش می‌یابد. تأثیر این عوامل در صحت نقشه‌نمایی کاربری شهری، در صورتی که به‌خوبی ارزیابی و تبیین نگردد، به‌عنوان خطاهای ناشی از محدودیت طیفی یا مکانی لحاظ خواهد شد در صورتی که این خطاها به‌نوعی خطاهای ذاتی بوده و حتی با بهبود قدرت تفکیک مکانی یا طیفی برطرف نخواهد شد. از طرف دیگر ساختارهای شهری به دلیل تغییر ناگهانی و تنوع بسیار بالایی عوارض و اختلاف ارتفاع شدید آنها، از پیچیدگی بسیار بالایی برخوردار می‌باشند که این باعث تشدید موضوع خواهد شد. در بین عوامل ایجاد عدم قطعیت، پوشش گیاهی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد بطوریکه طبق مطالعات Van der Linden and Hostert (۲۰۰۹) پوشش گیاهی با پوشاندن سطوح نفوذناپذیر می‌تواند تا ۳۰ درصد موجب افزایش خطا گردد. این موضوع در خصوص داده‌های هوابرد که از ارتفاع بسیار پایین برداشت می‌شود به‌شدت تأثیرگذار می‌باشد و منجر به بیش برآورد پوشش گیاهی و کاهش محدوده سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه افزایش خطا در نقشه‌نمایی می‌گردد.

مرور مطالعات نشان می‌دهد که علیرغم بررسی گسترده انواع داده و الگوریتم‌ها، موضوعات مهمی همچون صحت نقشه‌های استخراج‌شده از داده‌های سنجنش‌ازدور، پارامترهای تأثیرگذار بر آن و توزیع فضایی خطا نسبت به این پارامترها، کمتر موردتوجه قرار گرفته است - علیرغم مطالعاتی مانند موارد فوق‌الذکر که به تأثیر برخی عوامل بر صحت طبقه‌بندی داده‌های سنجنش‌ازدور جهت استخراج سطوح نفوذناپذیر پرداخته است - نیاز به بررسی بیشتر دارند. این موضوع در خصوص داده‌های پهپاد با عنایت به افزایش شدید بکارگیری آن در مطالعات شهری در سالیان اخیر، از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ لذا این مطالعه با هدف ارزیابی و کمی‌سازی تأثیر برخی از عوامل مؤثر بر صحت نقشه سطوح نفوذناپذیر شهری شامل پوشش گیاهی، ساختار و رون شهری و نوع داده‌های مورد استفاده، انجام گرفته است. بدیهی است میزان تأثیر پوشش گیاهی بر صحت نقشه، تابع تراکم و توزیع آن می‌باشد. بر اساس بررسی چشمی اورتوفتو بدست آمده از داده پهپاد و بازدید میدانی نگارندگان، پوشش گیاهی موجود در منطقه مورد مطالعه را از این نظر، می‌توان در سه بخش کلی پوشش موجود در خیابان‌ها، پوشش موجود در بلوک‌ها ساختمانی و پوشش موجود در پارک‌ها تفکیک و مورد بررسی قرار داد. این تفکیک بر اساس تراکم و فواصل پوشش گیاهی انجام شده است؛ لذا در این تحقیق میزان تأثیر پوشش گیاهی بر صحت نقشه سطوح نفوذناپذیر شهری در این سه محدوده به‌صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

روش پژوهش

هدف اساسی این مطالعه ارزیابی صحت و قابلیت اطمینان داده‌های سطوح نفوذناپذیر استخراج از داده‌های سنجنش از دور می‌باشد. بدین منظور بعد از پیش پردازش داده‌های پهپاد و ماهواره سنتینل، این داده‌ها با یکدیگر ادغام و با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طبقه‌بندی گردید. سپس صحت نتایج با بکارگیری داده‌های اعتبارسنجی مستقل که بصورت میدانی برداشت گردید و نیز اطلاعات پایگاه داده شهرداری مورد بررسی قرار گرفت. شرح مراحل اجرای این پژوهش مطابق شکل ۱ در ادامه آمده است.



شکل ۱. مراحل اجرای پژوهش

داده مورد استفاده

تصاویر مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های پهپاد و ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ می‌باشد. داده‌های پهپاد توسط نگارندگان با استفاده از پهپاد مولتی روتور فوق سبک تجاری مجهز به PPK و دوربین کانن m3 از ارتفاع ۱۲۰ متری تهیه گردید. تصاویر در محدوده طیفی RGB با پوشش طولی و عرضی به ترتیب ۸۵ و ۷۵ درصد برداشت گردید. مراحل برداشت و پردازش تصاویر را می‌توان به بخش‌های مختلف تفکیک نمود که عبارتند از: طراحی عملیات پرواز، تعیین موقعیت و برداشت مختصات نقاط کنترل و اعتبارسنجی با استفاده از DGPS، انجام عملیات پرواز، توجیه نسبی، تصحیح مختصات، تهیه ابرنقاط، تهیه مدل رقومی ارتفاعی و تهیه ارتفاعی و توفتو. این عملیات با استفاده از نرم افزار Agisoft.Metashape.Pro انجام گردید. پیکسل سایز ارتوفتوموزاییک و مدل رقومی ارتفاع بدست آمده به ترتیب ۵ و ۱۰ سانتیمتر است. داده‌های ماهواره ای نیز با تأکید بر بکارگیری داده‌های رادار و شاخصهای غیرقابل محاسبه با داده RGB جهت تکمیل داده‌های اپتیکی پهپاد مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های رادار و پارامترهای استخراج شده از آنها در مطالعات گذشته برای تفکیک سطوح نفوذناپذیر استفاده شده است که از آنجمله می‌توان به (Ahmad; Attarchi, 2020; Attarchi, 2019) اشاره نمود. در این راستا داده‌های ماهواره سنتینل ۱ و دو شاخص بدست آمده از داده‌های سنتینل ۲ شامل شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص نرمال شده مناطق ساخته شده طبق

1. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

2. NDBI: Normalized Difference Built-up Index

جدول ۱ با هدف بهبود تفکیک طیفی زیر کلاسها به ویژه پوشش گیاهی و سطوح ساخته شده مورد استفاده قرار گرفت. شاخص اخیر یکی از پرکاربردترین شاخص های طیفی مورد استفاده جهت تفکیک سطوح ساخته شده (ساختمان) از سایر سطوح می باشد که در این تحقیق طبق روابط ارائه شده توسط Zha et al (۲۰۰۳) محاسبه گردید. به منظور آماده سازی داده های سنتینل ۱، بعد از اعمال فایل مدار، تصحیحات رادیومتریک، حذف اثر اسپکل با فیلتر لی بهبود یافته^۱ و تصحیح هندسی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع انجام گردید و در نهایت داده های خروجی که بازپخش راداری بر حسب دسی بل است، بدست آمد. همچنین برای محاسبه بافت تصاویر رادار سنتینل ۱ در دو پلاریزاسیون VV و VH از ماتریس همرخداد سطوح خاکستری^۲ استفاده گردید. قابل ذکر است که خروجی ماتریس همرخداد پارامترهای متعددی است که هر کدام از آنها اطلاعات طیفی و هندسی خاصی را برای تفکیک انواع کاربری ها ارائه می دهد که میتواند به عنوان مکمل اطلاعات اپتیک مورد استفاده قرار گیرند (Zhang et al., 2014). باتوجه به اینکه مولفه های انتخاب شده از این تحلیل ها نباید با همدیگر همبستگی بالایی داشته باشند (Hall-Beyer, 2017)، در این تحقیق از چهار پارامتر Mean Homogeneity، Dissimilarity و Entropy استفاده گردید. علاوه بر این، پارامترهای مذکور طبق مطالعات قبلی به عنوان پارامترهای مؤثر در مطالعات شهری شناخته شده اند (Puissant et al., 2005).

جدول ۱. لیست داده های مورد استفاده در تحقیق

سنجنده	شماره باند یا محصول	قدرت تفکیک	تاریخ
پهپاد	RGB	۰/۰۵	۰۴-۰۳-۲۰۲۱
پهپاد	DEM	۰/۱	۰۴-۰۳-۲۰۲۱
سنتینل ۱	VV و VH	۱۰	۰۹-۰۴-۲۰۲۱
سنتینل ۱	Mean HOMO و Entropy	۱۰	۰۹-۰۴-۲۰۲۱
سنتینل ۲	NDBI	۱۰	۰۷-۰۴-۲۰۲۱
سنتینل ۲	NDVI	۱۰	۰۷-۰۴-۲۰۲۱

الگو و الگوریتم طبقه بندی

به منظور طبقه بندی سطوح نفوذناپذیر شهری از یک الگو با ۵ کلاس و ۱۸ زیر کلاس مطابق جدول ۲ که توسط نگارندگان بدین منظور ارائه شده است استفاده گردید (Abdolkhani et al., 2024). البته زیر کلاس پشت بام ورق گالوانیزه (RG) در بلوک B وجود ندارد به همین دلیل این بلوک با ۱۷ زیر کلاس طبقه بندی گردید. الگوریتم جنگل تصادفی یک روش طبقه بندی غیرپارامتریک یادگیری ماشینی است که تصمیم گیری در خصوص کلاس اشیاء در آن با استفاده از چندین درخت تصمیم انجام می گیرد. این الگوریتم در مقایسه با سایر طبقه بندی کننده ها دارای مزایایی از جمله عدم بیش برآزش مدل^۳ و حساسیت کمتر به داده های پرت و در نتیجه دقت بالا در بیشتر مطالعات می باشد (Guo et al., 2022). دو پارامتر مهم در بکارگیری این الگوریتم دارای اهمیت بالایی می باشد که عبارتند از تعداد درخت تصمیم (ntree) و تعداد عوارضی که در هر درخت تصمیم مورد استفاده قرار می گیرد که در این تحقیق پارامتر اول ۲۰۰ و پارامتر دوم حداکثر ۴ انتخاب گردید. طبقه بندی در این تحقیق جهت امکان مقایسه و ارزیابی تأثیر داده بر صحت و نیز با هدف بررسی امکان تصمیم پذیری نتایج در دو بلوک و دومرحله (یک مرحله فقط با داده پهپاد و یک مرحله با داده پهپاد و

1. Refined Lee
 2. GLCM: Gray-level co-occurrence matrix
 3. Overfitting
 4. Decision tree (ntree)

سنتینل) انجام گرفت. همچنین برای ادغام داده دو منبع از روش ادغام عارضه مبنا استفاده گردید که در طی آن داده‌های دو منبع بعد از نرمالسازی، تبدیل پیکسل سایز همه باندها با الگوریتم درونیابی خطی به ۱۰ سانتیمتر، اعمال سیستم مختصات واحد و هم مرجع کردن بر روی یکدیگر قرار گرفت. قابل ذکر است که رویهم گذاری لایه ها در واقع ادغام داده نیست و تنها وسیله ای برای قرار دادن لایه در کنار یکدیگر می‌باشد (Zhang & Xu, 2018) و برای اعمال نهایی تلفیق این عملیات می بایست با یک الگوریتم طبقه‌بندی کننده از جمله الگوریتم های یادگیری ماشین ترکیب گردد و رویه تلفیق برای ترکیب داده اپتیک و رادار طبق اصول خاصی در الگوریتمهای طبقه‌بندی یادگیری ماشین (مانند ماشین بردار پشتیبان^۲، جنگل تصادفی^۳ و شبکه عصبی مصنوعی^۴) انجام می‌شود (Schmitt & Zhu, 2016). بدین منظور در این تحقیق از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده گردید.

جدول ۲. الگوی طبقه‌بندی

کلاس	سطوح نفوذناپذیر تیره	سطوح نفوذناپذیر روشن	پوشش گیاهی	آب	خاک لخت
زیر کلاس	آسفالت	پشته‌های آسفالت سبزه	پوشش گیاهی سطحی	آب	خاک لخت
علامت اختصاری	A	AS	RIS	Water	BS
		RBS	SV	T	
		RB	SVS		
		WS			
		WMS			
		WM			
		RG			
		RGR			
		RGB			
		ER			

داده مرجع و ارزیابی صحت

کمی‌سازی تأثیرات ساختار شهری و سطوح نفوذناپذیر پوشیده شده توسط تاج‌پوشش بر صحت نقشه نهایی، نیازمند داده‌های مرجع متنوعی به صورت تفکیک شده می‌باشد. داده‌های مرجع استفاده شده و ارزیابی‌های متنوع که در این تحقیق به منظور تعیین صحت نقشه نهایی و تأثیر عوامل مختلف انجام گردید به شرح ذیل است.

- ارزیابی طبقه‌بندی طیفی

خطای احتمالی ناشی از طبقه‌بندی طیفی که معمولاً در ارزیابی صحت همه مطالعات معمول می‌باشد، در این تحقیق از طریق برداشت نمونه مرجع مستقل از نمونه‌های تعلیمی مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور کلی ۱۱۵،۷۱۳ و ۲،۴۲۳،۱۲۸ پیکسل به ترتیب جهت آموزش و اعتبارسنجی الگوریتم در بلوک A و ۸۴۳،۴۳۳ و ۵۶۵،۵۰۵ پیکسل به ترتیب جهت آموزش و اعتبارسنجی در بلوک B به روش تصادفی طبقه‌بندی شده انتخاب گردید. در نهایت برای ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی ماتریس ابهام با استفاده از نمونه‌های مستقل (جدول ۳) محاسبه و با استفاده از آن شاخص‌های صحت کلی، ضریب کاپا، صحت تولیدکننده و صحت کاربر برای کلاسهای مختلف در دو منطقه به صورت جداگانه محاسبه گردید.

1. Stack
2. Support Vector Machine(SVM)
3. Random forest(RF)
4. Artificial Neural Network(ANN)

جدول ۳. نمونه های تعلیمی و اعتبارسنجی

مطابق	کلاس	آسفالت	آسفالت سایه	ایرانیت	پشت بام بتن و موزاییک	پشت بام (بتن و موزاییک) سایه	پشت بام (ورق گالوانیزه) قرمز	پشت بام (ورق گالوانیزه) آبی	پشت بام (انزوگام)	پشت بام (انزوگام) سایه	پوشش گیاهی سطحی	پوشش گیاهی سطحی سایه	تاج پوشش	پیداده و موزاییک	پیداده و سنگفرش	کف حیاط (موزاییک) سایه	آب	خاک لخت	مجموع
اعتبارسنجی (شی)	۲۰	۲۱	۲۳	۲۰	۲۰	۲۰	۱۷	۱۵	۲۱	۲۲	۲۰	۲۰	۲۰	۱۴	۲۰	۲۷	۲۰	۲۰	۳۵۷
اعتبارسنجی (پیکس)	۸۹۶۰۸	۵۲۱۸۴	۱۵۹۲۸	۵۰۵۴۴	۳۱۴۴۰	۳۱۴۴۰	۱۹۰۶۶	۳۲۲۹۵	۶۳۳۸۹	۴۱۲۰۸	۹۰۷۳۵	۴۰۸۶۷	۴۶۱۶۵	۱۶۹۱۹	۴۵۱۳۶	۴۱۵۱۴	۱۹۹۱۳۷	۱۲۰۳۷۵	۱۱۵۱۷۱
تعلیمی (شی)	۴۲	۴۴	۴۸	۴۲	۴۵	۴۵	۲۶	۳۵	۳۷	۴۱	۳۸	۴۲	۴۲	۳۰	۴۰	۵۰	۴۰	۴۱	۷۲۵
تعلیمی (پیکس)	۱۵۴۴۷	۹۵۸۵۰	۲۹۸۴۶	۱۳۴۲۴	۷۶۷۵۸	۵۲۱۷۰	۲۸۴۷۳	۵۲۳۳۱	۱۱۵۵۶	۱۱۰۲۶	۱۸۸۷۹	۸۹۵۵۲	۸۹۳۳۵	۵۴۰۸۹	۹۷۱۳۰	۷۹۵۵۶	۲۶۳۱۶	۳۴۳۷۷	۲۴۳۳۱
اعتبارسنجی (شی)	۲۰	۱۹	۲۰	۲۲	۲۱	۲۱	۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۱	۱۰	۲۲	۲۰	۲۱	۲۰	۱۲	۲۱	۳۳۵
اعتبارسنجی (پیکس)	۶۵۶۵	۵۰۲۷	۲۰۲۵	۲۶۸۵	۱۵۷۳	۰	۰	۱۵۵۲	۴۷۱۱	۱۹۲۶	۶۵۷۹	۱۴۲۶	۸۹۳۳۵	۲۸۱۱	۴۱۰۱	۱۳۴۰	۵۳۰۱	۴۶۸۵	۵۶۵۵
تعلیمی (شی)	۳۲	۳۵	۳۲	۳۳	۳۰	۳۰	۰	۳۱	۳۵	۳۱	۲۸	۳۰	۳۰	۳۱	۳۱	۳۱	۱۲	۳۲	۴۹۴
تعلیمی (پیکس)	۱۰۴	۶۵۸	۴۲۶	۴۶۸	۳۱۰	۳۱۰	۰	۳۲۳	۹۹۳	۳۹۷	۶۱۶	۱۳۴	۴۰۱	۳۵۴	۶۸۵	۱۸۶	۶۳۷	۸۳۴	۸۴۳

- ارزیابی خطای ناشی از سطوح نفوذناپذیر پوشیده شده توسط تاج پوشش گیاهی

برآورد مساحت بخشی از سطوح نفوذناپذیر (مانند خیابان، پیداده رو، بلوک مسکونی) که به وسیله تاج پوشش گیاهی پوشیده شده و در طبقه بندی طیفی به عنوان پوشش گیاهی طبقه بندی می شود، نیازمند وجود نقشه دقیق و مستقل از عوارض شهری می باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی از نقشه مستقل که از طریق پایگاه داده مکانی شهرداری تهیه شده است، به عنوان مرجع ارزیابی استفاده گردید. این نقشه ها شامل نقشه بلوک های مسکونی، شبکه خیابان ها و نقشه بزرگ ترین پارک موجود در منطقه مورد مطالعه هستند. از آنجا که لایه خیابان ها تهیه شده توسط شهرداری خطی بود، به منظور امکان تقاطع لایه ها، لایه خطی خیابان ها با لایه بلوک های شهری تلفیق و لایه سطحی خیابان ها تهیه گردید. در نهایت از طریق تقاطع لایه سطحی خیابان ها با نقشه پوشش گیاهی بدست آمده از طبقه بندی مقادیر خیابان های پوشیده شده توسط تاج پوشش تهیه گردید و نسبت مساحت آن به مساحت خیابان ها و مساحت کل پوشش گیاهی استخراج گردید. علاوه بر پوشش گیاهی که در خیابان ها وجود دارد، بخشی از پوشش گیاهی در حیاط خانه ها قرار گرفته است که به نوبه خود باعث پوشیده شدن سطوح موزاییکی و طبقه بندی آنها به عنوان پوشش گیاهی در طبقه بندی طیفی می گردد. البته باید دقت نمود در این خصوص بخشی از سطوح زیرپوشش گیاهی طبعاً نفوذپذیر می باشد؛ ولی مساحت آن نسبت به مساحت تاج پوشش به مراتب کمتر است و اطلاعات دقیقی از مساحت آن در حیاط خانه ها (باغچه) وجود ندارد. به منظور ارزیابی این

1. Line

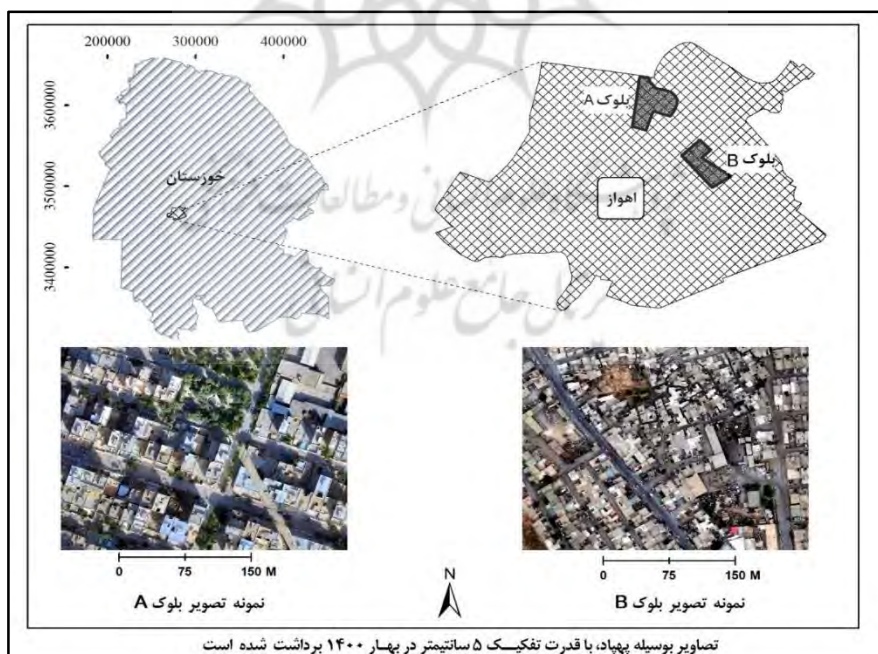
2. Intersection

اثر نیز در این مطالعه بلوک‌های شهری مسکونی از نقشه شهرداری استخراج و با لایه پوشش گیاهی بدست آمده از طبقه‌بندی تقاطع داده شد.

در نهایت باتوجه به اینکه تأثیر پوشش گیاهی بر صحت نقشه‌ها تابع تراکم و توزیع پوشش می‌باشد و نیز با در نظر گرفتن اینکه پارک‌ها معمولاً از نظر پوشش گیاهی نسبت به سایر بخش‌های شهری متمایز هستند، تأثیر پوشش در بزرگ‌ترین پارک منطقه مورد مطالعه نیز ارزیابی گردید. بدین منظور نقشه ۱:۲۰۰ پارک مذکور از پایگاه داده شهرداری تهیه و به عنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفت که بعد از تقاطع آن با لایه پوشش گیاهی بدست آمده از طبقه‌بندی، میزان این تأثیر ارزیابی گردید.

محدوده مورد مطالعه

به منظور انجام این تحقیق دو محدوده مجزا از کلان شهر اهواز واقع در جنوب غرب ایران در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی (شکل ۲)، در جلگه خوزستان و با متوسط ارتفاع ۱۸ متر از سطح دریا به عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید. متوسط بارش منطقه، متوسط دمای سالانه و حداکثر دما بر اساس سالنامه آماری سال ۱۴۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان به ترتیب ۲۱۱ میلیمتر، ۲۶٫۸ و ۵۳٫۷ درجه سانتی‌گراد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۴۰۱ : ۷۲-۷۳) و مساحت بلوک‌های A و B به ترتیب معادل ۴۶۷ و ۳۱۲ هکتار می‌باشد. این دو بلوک از نظر بافت شهری کاملاً با یکدیگر متفاوت هستند، بطوریکه که بلوک A دارای بافت و ساختار شهری منظم و بلندمرتبه از نظر ارتفاع ساختمان‌ها می‌باشد، در حالیکه بلوک B از نظر بافت دارای وضعیت شهری گسسته بوده و از نظر ارتفاع ساختمان‌ها نامنظم است. توسعه متوالی این مناطق در طی سالیان متعدد و وضعیت آب‌وهوایی منطقه منجر به ایجاد سطوح نفوذناپذیر متنوعی شده است که آن را برای بررسی این موضوع، مناسب می‌سازد.



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه - ماخذ: تقسیمات سیاسی استانداری خوزستان

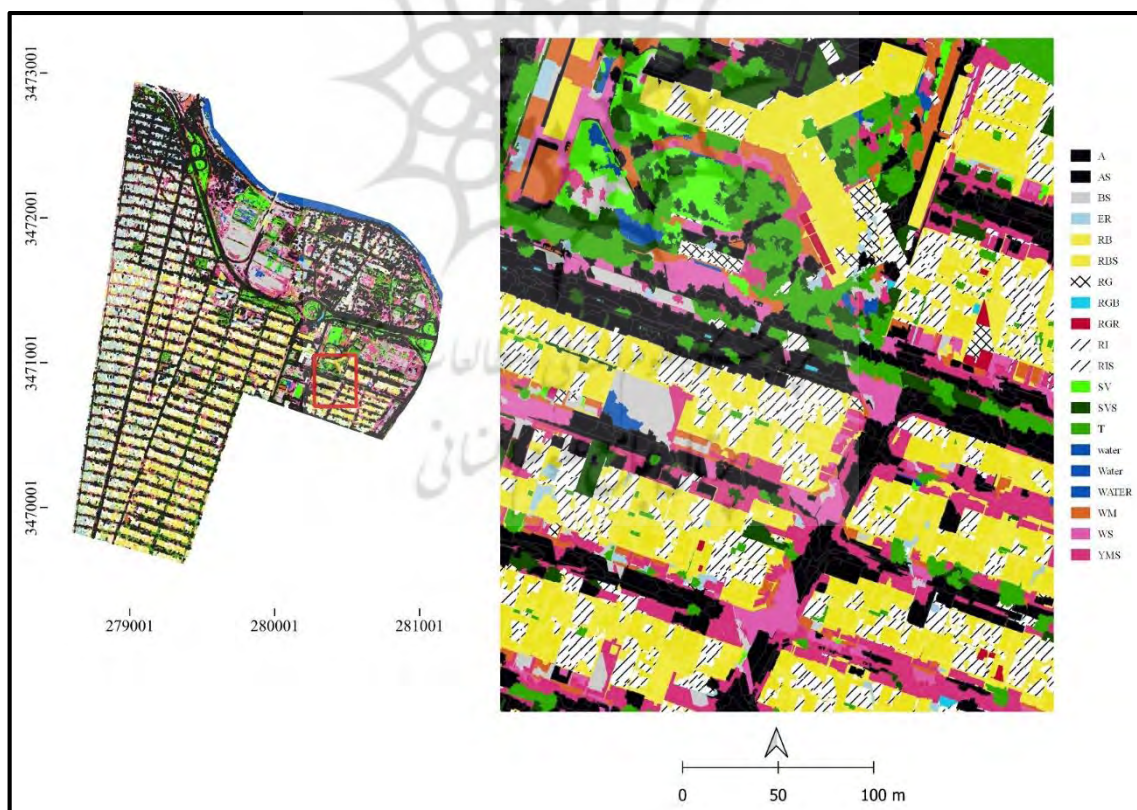
یافته‌ها

در این تحقیق بعد از طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر شهری با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و بکارگیری داده‌های RGB و مدل رقومی ارتفاعی پهپاد، عوامل تأثیرگذار بر صحت استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در ادامه مورد اشاره قرار می‌گیرد.

- ارزیابی صحت طبقه‌بندی طیفی

در اولین مرحله این تحقیق بعد از آماده سازی داده، تصاویر پهپاد برای دو بلوک با بکارگیری الگوریتم جنگل تصادفی و الگوی ارائه شده در

جدول ۲ طبقه‌بندی گردید (شکل ۳). نتایج ارزیابی صحت طبقه‌بندی دو بلوک فقط با استفاده از داده‌های پهپاد در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این الگوریتم علیرغم اینکه در بلوک A با استفاده از داده‌های پهپاد توانسته است زیرکلاسها را با صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۰,۸۲۶ و ۰,۸۱۶ تفکیک نماید، در بلوک B پارامترهای صحت به میزان قابل توجهی پایین تر و به ۰,۶۱۲ و ۰,۵۸۷ کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش صحت با مقدار ۰,۶۲۱ مربوط به کلاس پیاده‌روی موزاییک می‌باشد و کمترین میزان تغییر مربوط به کلاس آب با تغییر ۰,۰۳ است. البته در دو کلاس سقف بتون سایه و سقف ایزوگام در بلوک B نسبت به بلوک A تغییرات مثبت به ترتیب به مقدار ۰,۰۹ و ۰,۰۵ مشاهده می‌شود (شکل ۴ و شکل ۵).

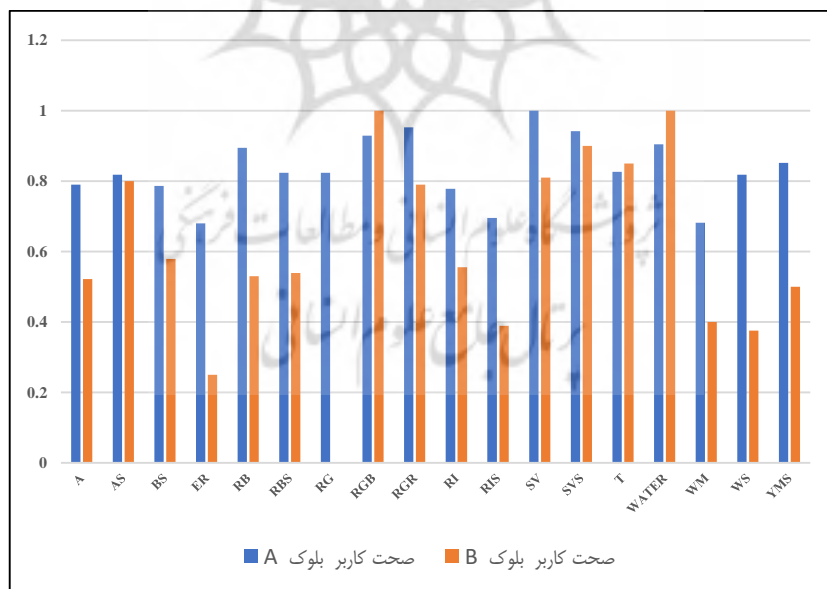


شکل ۳. نقشه سطوح نفوذناپذیر بلوک A

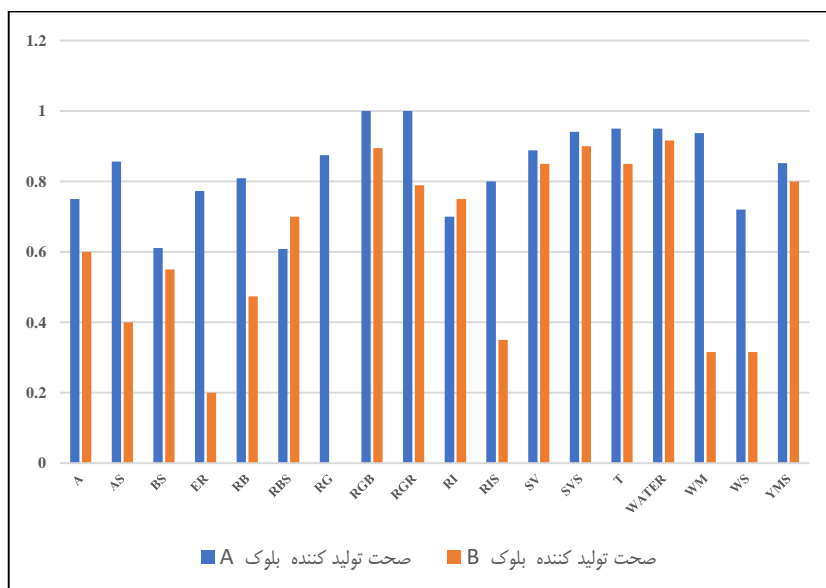
جدول ۴. پارامترهای صحت طبقه‌بندی دو بلوک با استفاده از داده‌های پهباد

پارامتر	صحت تولیدکننده صحت کاربر	ضریب کاپا	صحت عمومی	ضریب کاپا
محدوده	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
کلاس	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
آسفالت	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
آسفالت سایه	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
خاک لخت	۱۶/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
ایرانیت	۸۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام بتن و موزاییک	۱۷/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام (بتن و موزاییک) سایه	۱۶/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام (ورق گالوانیزه)	۷۷/۰	۸۷/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام (ورق گالوانیزه) آبی	۰۰/۱	۸۷/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام (ورق گالوانیزه) قرمز	۰۰/۱	۸۷/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام (انزوگام)	۸/۰	۷۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پشت‌بام (انزوگام) سایه	۷/۰	۸۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پوشش گیاهی سطحی	۶۷/۰	۷۷/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پوشش گیاهی سطحی سایه	۱۶/۰	۸۶/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
تاج‌پوشش	۵۶/۰	۵۶/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
آب	۵۶/۰	۵۶/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پیداده و موزاییک	۹۶/۰	۸۶/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
پیداده و سنگفرش	۸۸/۰	۸۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
کف حیاط (موزاییک) سایه	۵۷/۰	۸۷/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶

پارامتر	صحت تولیدکننده صحت کاربر	ضریب کاپا	صحت عمومی	ضریب کاپا
صحت تولیدکننده صحت کاربر	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
صحت کاربر	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
صحت کاپا	۵۸/۰	۶۸/۰	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
صحت عمومی	۰/۶۱۲	۰/۶۱۲	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶
ضریب کاپا	۰/۵۸۷	۰/۵۸۷	۰/۸۲۶	۰/۸۱۶



شکل ۴. صحت کاربر در دو بلوک (طبقه‌بندی فقط با استفاده از داده پهباد)



شکل ۵. صحت تولیدکننده در دو بلوک (طبقه‌بندی فقط با استفاده از داده پهپاد)

- ارزیابی تأثیر داده بر صحت طبقه‌بندی

قبل از اقدام به ارزیابی تأثیر پوشش گیاهی می‌بایست صحت طبقه‌بندی از نظر طیفی بررسی و تا حد ممکن بهبود یابد. بدین منظور و با هدف ارزیابی اثر داده بر صحت نهایی طبقه‌بندی در بلوک B، داده‌های سنتینل با داده پهپاد ادغام و طبقه‌بندی مجدداً انجام گردید. قابل ذکر است که در بخش قبل داده‌های پهپاد این بلوک به صورت جداگانه طبقه‌بندی گردید، و با وجود اینکه داده، الگوریتم طبقه‌بندی و پارامترهای آن در هر دو مرحله یکسان بود، صحت نقشه حاصل به طور قابل توجهی نسبت به بلوک دیگر پایین تر بود. لذا همانطور که ذکر گردید با هدف بهبود صحت نتایج تا حد امکان و نیز به منظور بررسی تأثیر تلفیق داده ها بر نتایج، این ادغام انجام گردید. نتایج طبقه‌بندی با داده‌های ادغام شده (پهپاد و سنتینل) در جدول ۵ آمده است. نتایج حاکی از این است که ادغام داده‌های سنتینل با داده پهپاد باعث بهبود صحت طبقه‌بندی و افزایش شاخص صحت کلی از ۰/۶۱۲ به ۰/۸ گردید. بررسی صحت زیرکلاسها نشان می‌دهد زیر کلاس پیاده‌روی سنگفرش با بهبود صحت به میزان ۵۴ درصد، بالاترین بهبود صحت را به دلیل ادغام داده نشان داده است. صحت تفکیک زیرکلاس خاک لخت نیز با ادغام داده به میزان ۳۵ درصد بهبود یافته است.

جدول ۵. پارامترهای صحت طبقه‌بندی بلوک B با داده ادغام شده

کف حیاط (موزاییک) سایه	۰/۷۰
پیاده‌رو سنگفرش	۰/۷۰
پیاده‌رو موزاییک	۰/۸۰
آب	۰/۰۸
تاج پوشش	۰/۶۰
پوشش گیاهی سطحی سایه	۰/۶۰
پوشش گیاهی سطحی	۰/۶۰
پشتابم (ایزوگام) سایه	۰/۸۰
پشتابم (ایزوگام)	۰/۸۰
پشتابم (ورق گالوانیزه) قرمز	۰/۶۰
پشتابم (ورق گالوانیزه) آبی	۰/۰۸
پشتابم (بتن و موزاییک) سایه	۰/۷۰
پشتابم بتن و موزاییک	۰/۶۰
ایزولیت	۰/۶۰
خاک لخت	۰/۶۰
آسفالت سایه	۰/۶۰
آسفالت	۰/۸۰
کلاس	۰/۸۰

پوشش موجود در پارک‌ها تفکیک گردید. پوشش دو بخش اول در دو بلوک ارزیابی گردید لیکن پوشش موجود در پارک به منظور افزایش جامع ارزیابی تا حد ممکن و باتوجه به وجود داده مرجع در بزرگ‌ترین پارک منطقه که در بلوک B قرار داشت ارزیابی گردید.

بدیهی است بخشی از سطوح نفوذناپذیر خیابان‌ها به دلیل وجود تاج‌پوشش جز پوشش گیاهی در طبقه‌بندی جز پوشش گیاهی تفکیک می‌گردد، در حالیکه این سطوح در واقع جز سطوح نفوذناپذیر هستند (شکل ۶) به منظور ارزیابی این موضوع و کمی‌سازی تأثیر آن در صحت نقشه نهایی، نقشه محدوده خیابان و پیاده‌رو از پایگاه داده شهرداری استخراج و با نقشه پوشش گیاهی بدست آمده از طبقه‌بندی، تقاطع داده شد (شکل ۷) به منظور کسر مساحت آیلندها و رفیوژهای خیابان که قاعدتاً نفوذپذیر هستند، مساحت این بخشها که شامل جزیره های میانی است که در وسط معابر و جاده‌های سواره‌رو قرار گرفته و معمولاً محل رویش گیاهان می‌باشند، از لایه خیابان و پیاده‌رو کسر گردید.



شکل ۶. پوشیده شدن سطوح نفوذناپذیر توسط تاج‌پوشش



شکل ۷. تقاطع لایه خیابان با پوشش گیاهی

همان‌طور که در جدول ۷ آمده است، نتایج نشان می‌دهد که از $۱۰/۹$ و $۹۳/۵۹$ هکتار سطوح نفوذناپذیر خیابان و پیاده‌رو در بلوک A و B به ترتیب $۹/۹۳$ و $۲/۷$ هکتار در طبقه‌بندی به‌عنوان پوشش گیاهی طبقه‌بندی شده است.

جدول ۷. آمار مساحت مشترک المان‌ها و پوشش گیاهی

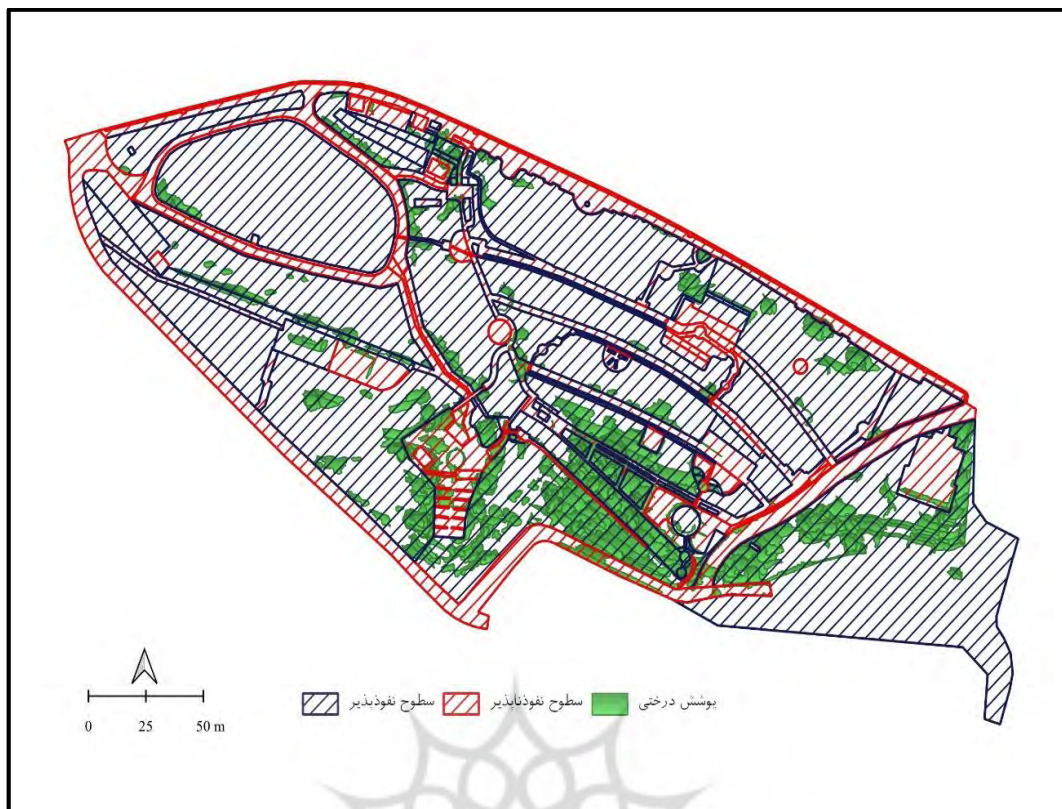
منطقه	المان شهری	مساحت طبق نقشه شهرداری	مساحت پوشش گیاهی بندست آمده از طبقه‌بندی	مساحت تاج پوشش در محدوده المان شهری	درصد پوشش مشترک نسبت به مساحت المان	درصد پوشش مشترک نسبت به پوشش گیاهی
A	خیابان و پیاده‌رو	$۱۰۹/۹$	$۳۶/۹$	$۹/۹۳$	۹	$۲۶/۹$
	بلوک‌های مسکونی	$۲۳۳/۴$	$۳۶/۹$	$۱۸/۶۶$	$۷/۹۹$	$۵۰/۵$
B	خیابان و پیاده‌رو	$۹۳/۵۹$	$۹/۲۳$	$۲/۷$	$۲/۸$	$۲۹/۲$
	بلوک‌های مسکونی	۱۸۶	$۹/۲۳$	$۲/۷۸$	$۱/۵$	۳۰
	پارک	$۱/۶$	۰.۹	$۰/۱۶$	$۹/۸۲$	$۱۷/۵$

این موضوع در خصوص بلوک‌های مسکونی نیز صدق می‌کند و بخش مهمی از سطوح نفوذناپذیر این بلوک‌ها که عمدتاً در حیات منازل مسکونی متمرکز شده است، به‌وسیله تاج پوشش گیاهی پوشیده و به‌عنوان پوشش گیاهی طبقه‌بندی می‌گردد (شکل ۸). اندازه‌گیری این سطوح طبق جدول ۷ نیز نشان داد که از مساحت بلوک‌های مسکونی که در بلوک A و B به ترتیب معادل $۲۳۳/۴$ و ۱۸۶ هکتار می‌باشد، $۱۸/۶۶$ هکتار در بلوک A و $۲/۷۸$ هکتار در بلوک B در طبقه‌بندی به‌عنوان پوشش گیاهی شناسایی شده است. در خصوص پارک بررسی شده که بزرگترین پارک منطقه محسوب می‌گردد،

میزان سطوحی که به عنوان پوشش گیاهی طبقه بندی شده است، تقریباً ۱۰ درصد سطوح نفوذناپذیر (۰/۱۶ هکتار از ۱/۶ هکتار مساحت سطوح نفوذناپذیر معابر پارک) می باشد (شکل ۹).



شکل ۸. تقاطع لایه بلوکهای مسکونی با پوشش گیاهی



شکل ۹. تقاطع لایه سطوح نفوذناپذیر پارک با پوشش گیاهی

بحث

داده‌های هوابرد از جمله تصاویر پهپاد مانند سایر داده‌های سنجش‌ازدور تحت تاثیر انواع مختلف خطا می‌باشند که می‌توانند به مراحل و تحلیل‌های بعدی منتقل و یا حتی منتشر شوند (Shao & Wu, 2008). در صورتی که لازم باشد این قبیل داده‌ها مبنای تحلیل و تصمیم‌گیری قرار گیرند، عدم شناسایی و ارزیابی دقیق این عدم قطعیت سبب کاهش قابلیت اطمینان تحلیل‌های مبتنی بر آنها و به تبع آن کاهش کیفیت تصمیمات مدیریتی و کارشناسی اتخاذ شده می‌گردد. با توجه به این امر، این تحقیق با هدف ارزیابی و کمی‌سازی تأثیر پارامترهای پوشش گیاهی، ساختار و رون شهری و ادغام داده‌های چند منبعی بر صحت نقشه نهایی سطوح نفوذناپذیر استخراج شده از منابع مختلف داده سنجش‌ازدور انجام گردید.

- ارزیابی تأثیر ساختار و رون شهری

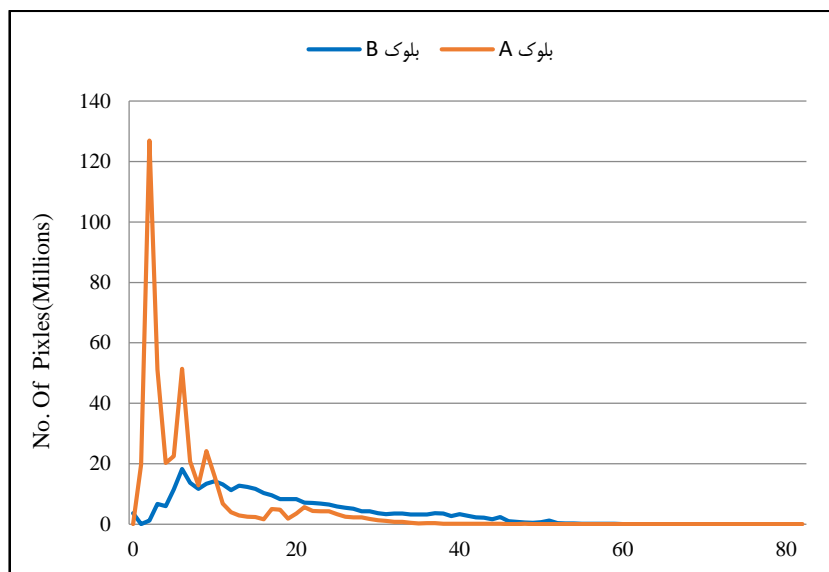
در اولین مرحله تحقیق، داده‌های پهپاد شامل تصاویر در محدوده مرئی و مدل رقومی ارتفاع استخراج شده از آن در دو بلوک با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طبقه‌بندی گردید. بررسی صحت طبقه‌بندی نشان داد که شاخص صحت کلی در بلوک B نسبت به بلوک A به میزان قابل توجهی پایین‌تر است. این کاهش صحت باتوجه به اینکه داده‌ها، الگوریتم و الگوی مورد استفاده در دو بلوک یکسان است، دارای اهمیت قابل توجهی بوده و نیاز به بررسی بیشتر دارد. بررسی وضعیت دو بلوک و داده‌های مربوطه نشان می‌دهد که دو بلوک دارای چند تفاوت مهم بوده که می‌توانند عامل کاهش کارایی طبقه‌بندی در بلوک B گردد. این موارد عبارتند از:

(۱) توزیع ارتفاع پایه و ارتفاع ساختمان‌ها در دو بلوک

دو بلوک هم از نظر ارتفاع ساختمان‌ها و هم از نظر ارتفاع پایه زمین دارای تفاوت چشمگیر هستند. بلوک A دارای ارتفاع پایه یکنواخت در کل منطقه است و ساختمان‌های آن بلندمرتبه می‌باشند در حالی که بلوک B از نظر ارتفاع پایه بسیار متغییر بوده و دارای حالت تپه ماهوری می‌باشد. همچنین ساختمان‌های این بلوک اگر چه اغلب کم ارتفاع (یک یا دو طبقه) هستند، از نظر ارتفاعی دارای بافت نامنظم تری هستند (Error! Reference source not found. ۱۰). این عامل از آنجا اهمیت پیدا می‌کند که در صورت اجرای طبقه‌بندی فقط با داده پهباد، به دلیل تشابه رنگ بالای زیرکلاسها و محدودیت طیفی داده‌ها، مدل رقومی ارتفاعی نقش مهمی در تفکیک زیرکلاسها ایفا می‌کند. سنگفرش و ایرانیت یا سقف بتن و موزاییک و حیاط موزاییک را می‌توان به‌عنوان نمونه‌های مشخصی از سطوح مذکور (دارای عکس العمل طیفی مشابه اما ارتفاع متفاوت) در منطقه مورد مطالعه نام برد. این در حالی است که به دلیل بی‌نظمی ارتفاعی موجود در بلوک B، این داده تأثیر خود را از دست می‌دهد و منجر به کاهش صحت طبقه‌بندی می‌گردد. این موضوع در مطالعات قبلی نیز اشاره شده است. Sun et al. (۲۰۱۹) دلیل اصلی عدم تفکیک سطوح مختلف از یکدیگر را ناشی از عدم استفاده از داده‌های ارتفاعی می‌دانند. Weng (۲۰۱۲) میزان بهبود تفکیک ناشی از به‌کارگیری داده‌های ارتفاعی در طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر را بین ۲ تا ۲۵ درصد بیان نموده است.

۲) ساختار شهری

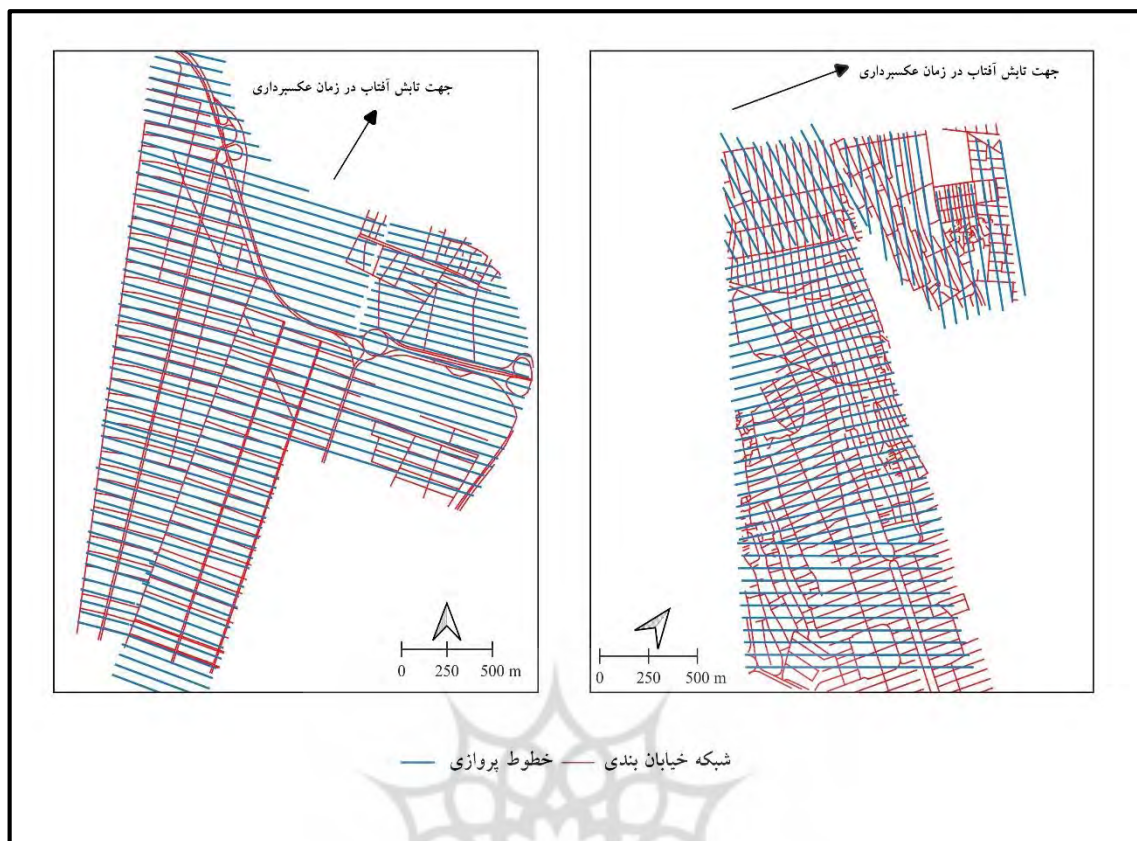
یکی دیگر از عواملی که می‌تواند منجر به کاهش صحت طبقه‌بندی در بلوک B نسبت به بلوک A گردد ساختار و رون شهری دو بلوک می‌باشد. بلوک A از نظر شبکه خیابان بندی و ساختار شهری دارای ساختاری منظم و در جهات مشخص می‌باشد در حالیکه ساختار بلوک B نامنظم می‌باشد. این وضعیت سبب می‌شود که جهت عوارض نسبت به خطوط پروازی و زوایه تابش خورشید در زمان عکسبرداری، مدام در حال تغییر باشد (Error! Reference source not found.). این نوسانات علاوه بر اینکه میزان نورگیری عوارض و در نتیجه عکس العمل طیفی ثبت شده آنها را تغییر می‌دهد، منجر به تغییر و تنوع گسترده سایه نیز می‌گردد. سایه به نوبه خود یکی از مهمترین چالش‌های تفسیر تصاویر و استخراج اطلاعات و عوامل تأثیرگذار بر صحت طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر به‌ویژه با داده‌های پهباد می‌باشد. در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا مانند تصاویر پهباد از محیط‌های شهری، وجود عوارض پیچیده مانند ساختمان‌های بلند منجر به ایجاد انواع مختلف سایه می‌گردد. وجود سایه در تصاویر به دلیل ایجاد تغییرات قابل توجه در پاسخ طیفی ثبت شده از عوارض، می‌تواند باعث افزایش خطا و ابهام در استخراج اطلاعات (Liu & Yamazaki, 2012) و در نتیجه کاهش صحت گردد. این موضوع یعنی کاهش صحت به دلیل وجود سایه توسط سایر محققین گزارش شده است و تأثیرات متعددی از جمله کاهش مقادیر شاخص‌های استخراج شده (Simpson & Stitt, 1998)، انحراف و خطا در نقشه کاربری زمین در مناطق شهری (Caggiano et al., 2016)، اختلاط طیفی مناطق سایه با آب در (Ji et al., 2015) و غیره برای آن اعلام شده است.



شکل ۱۰. توزیع فراوانی ارتفاع بلوک‌ها

- ارزیابی تأثیر داده بر صحت طبقه‌بندی

به منظور بررسی تأثیر ادغام داده بر بهبود صحت استخراج سطوح نفوذناپذیر دو طبقه بندی با داده‌های پهپاد به تنهایی و داده‌های ادغام شده پهپاد و سنتینل انجام گردید. نتایج نشان دهنده بهبود دقت عمومی طبقه بندی به میزان ۰/۱۸ بود. بیشترین بهبود در کلاس پیاده روی سنگفرش و خاک لخت مشاهده گردید به گونه ای که صحت تولید کننده این دو کلاس به میزان به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۳۵ افزایش یافت. یافته تحقیق مبنی بر بهبود دقت طبقه بندی سطوح نفوذناپذیر بر اثر ادغام داده‌ها، نتایج مطالعات گذشته را تأیید می‌کند. بطور نمونه Shao et al. (۲۰۱۶) با ادغام داده GF_1 و سنتینل ۱ توانستند دقت عمومی نقشه سطوح نفوذناپذیر را از ۸۹/۶۸ به ۹۳/۳۷ درصد افزایش دهند. آنها همچنین اظهار داشتند که بکارگیری عوارض بافت استخراج شده از این داده‌ها در کنار آنها نیز دقت را به ۹۵/۳۳ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر این Ahmad et al. (۲۰۲۴) نیز بهبود تفکیک سطوح نفوذناپذیر شهری و افزایش شاخص صحت عمومی حداقل به میزان ۰/۰۲ با ادغام داده‌های لندست ۸ و سنتینل ۱ و بکارگیری عوارض بافت را گزارش کرده‌اند. Shao et al. (۲۰۲۳) در مطالعه تحلیلی خود تنها راه بهبود صحت نقشه‌های سطوح را جایگزینی داده‌های تک منبعی با داده‌های ادغام شده می‌دانند.



شکل ۱۱. خطوط پروازی و ساختار شهری دو بلوک

علاوه بر این اختلاط بین کلاسه‌های مختلف کاربری شهری و ضعف در تفکیک آنها که در این پژوهش بوضوح قابل مشاهده بود، نیز در مطالعات دیگر گزارش شده است. البته با توجه به نوع داده مورد استفاده و خصوصیات منطقه مورد مطالعه کلاسه‌های گزارش شده مختلف می‌باشد. از آنجمله می‌توان به اختلاط طیفی بین سطوح نفوذناپذیر روشن و خاک لخت یا سطوح نفوذناپذیر تیره و سطوح مردابی در (Lin et al., 2020)، بین زمین بایر و بتن و آسفالت در (Dekker, 2003) و بین کلاسه‌های سطوح نفوذناپذیر روشن و خاک روشن یا آب در (Shao et al. 2016) اشاره نمود. Lu et al. (۲۰۱۱) عامل اصلی ایجاد خطا در طبقه بندی سطوح نفوذناپذیر را اختلاط طیفی بین برخی کلاسه‌ها مانند سطوح نفوذناپذیر تیره با آب، مناطق مرطوب با سایه، سطوح نفوذناپذیر روشن با خاک لخت می‌دانند. همانطور که ذکر گردید کلاسه‌هایی که در این پژوهش بر اثر ادغام، تغییر صحت قابل توجهی داشتند پیاده روی سنگفرش و خاک لخت بودند. در مطالعات مشابه Shao et al. (۲۰۱۶) اظهار می‌دارند که بدلیل بکارگیری داده‌های سار ماهواره سنتینل ۱ تفکیک کلاس آب بهبود یافته است. آنها همچنین نتیجه گیری می‌کنند که این بهبود ناشی از توانایی بالای داده سار در تشخیص آب و تاثیر بکارگیری داده‌ها بصورت تجمیعی در کاهش اختلاط بین آب و سطوح نفوذناپذیر می‌باشد. این محققین تاکید می‌نمایند که در مطالعه آنها اختلاط بین کلاسه‌های سطوح نفوذناپذیر تیره با خاک لخت تیره بعد از ادغام نیز به مقدار قابل توجهی همچنان وجود دارد. بهبود صحت در این تحقیق در خصوص کلاس خاک لخت عمدتاً ناشی از توانایی بالایی داده‌های سنتینل ۱ در تفکیک خاک لخت از سطوح نفوذناپذیر می‌باشد. داده‌های سار و پارامترهای بافت منتج از آن نسبت به زبری، محتوای

1. Misclassification
2. Roughness

رطوبتی و ساختار حجمی عوارض شهری حساس هستند (Zhang et al., 2016) این ویژگی‌ها در کنار تفاوت قابل توجه زیر کلاس خاک با سایر سطوح هم از نظر زبری و هم از نظر محتوای رطوبتی سبب تفاوت بازپخش ثبت شده و در نتیجه بهبود صحت طبقه‌بندی این زیر کلاس می‌گردد.

به‌طور کلی ارزیابی صحت دو طبقه‌بندی حاکی از اهمیت قابل توجه ادغام منابع مختلف داده و استفاده از داده‌های چند منبعی در بهبود صحت طبقه‌بندی سطوح نفوذناپذیر شهری می‌باشد. بحث عدم کفایت داده‌های یک منبع برای تهیه نقشه این سطوح در مطالعات قبل نیز اشاره شده است. Jiang et al. (۲۰۰۹) و Zhang et al. (۲۰۱۴) اظهار می‌دارند داده‌های یک منبع خاص به طور جداگانه برای مطالعه سطوح نفوذناپذیر شهری اغلب ناکافی می‌باشد و استفاده از داده‌های تک منبع مشکلاتی مانند اختلاط طیفی بین کلاسهای متفاوت به همراه خواهد داشت.

- ارزیابی خطای ناشی از پوشش گیاهی

ارزیابی اثر پوشیده شدن سطوح با تاج‌پوشش درختی در بخش‌های مختلف شهری نشان داد که این مانع می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش صحت نقشه نهایی در بخش‌های مختلف داشته باشد. ۹ درصد خیابان‌های بلوک A و تقریباً ۳ درصد مساحت خیابان‌های بلوک B به اشتباه پوشش گیاهی تشخیص داده شده است. مرور مطالعات نشان داد که مطالعاتی که به بررسی اثر پوشش گیاهی بر صحت سطوح نفوذناپذیر از این منظر پرداخته باشند، محدود هستند. البته اثرات ناشی از وجود موانع دید بطور کلی در برخی پژوهش‌ها بررسی شده است. بطور نمونه Lu et al. (۲۰۱۱) در مطالعه خود به بررسی اثر سایه بر صحت پرداخته‌اند. لیکن باید دقت نمود که تأثیر سایه به عنوان مانع دید که بطور کلی عارضه را از دید سنجنده محو نماید، کمتر اتفاق می‌افتد و بسته به میزان شدت آن، اغلب باعث کاهش شدت عکس‌العمل ثبت شده می‌گردد، در حالیکه پوشش گیاهی معمولاً سطوح زیرین خود را بطور کامل از دید سنجنده حذف می‌نماید. Shao et al. (۲۰۲۳) اثر پوشیده شدن سطوح بوسیله برف و ابر، سایه و پوشش گیاهی را مرور نموده‌اند. آنها استفاده از داده رادار را عامل مهمی در کاهش تأثیر شرایط آب و هوایی بر صحت ذکر کرده‌اند. همچنین استفاده از داده‌های لیدار و پهپاد و داده‌های نقشه‌ای مانند OSM و Street View را به منظور کاهش اثر سایه و پوشش گیاهی موثر می‌دانند. Ahmad et al. (۲۰۲۴) به منظور بهبود صحت نقشه‌های شهری مدلی جهت تلفیق داده‌های مکانی، طیفی و زمانی از زوایای متعدد^۳ ارائه نمودند. Mao et al. (۲۰۲۲) با تأکید بر اینکه اثر پوشیده شدن سطوح با پوشش گیاهی یک چالش جدی در استخراج دقیق سطوح نفوذناپذیر شهری می‌باشد، اقدام به معرفی یک الگوریتم عارضه مبنا مورفولوژیکی^۴ نمودند که از طریق ادغام داده‌های OSM و پهپاد باعث بهبود دقت نقشه نهایی می‌گردد. با این وجود برخی مطالعات اثر پوشش گیاهی به عنوان مانع دید را بطور خاص مورد بررسی قرار داده‌اند. Van der Linden and Hostert (۲۰۰۹) به این امر پرداخته‌اند آنها به بررسی تأثیر جابجایی ناشی از ارتفاع در داده‌های هوابرد فراطیفی و تأثیر تاج‌پوشش گیاهی بر صحت تهیه نقشه سطوح نفوذناپذیر شهری پرداختند و دریافتند این دو عامل به‌شدت صحت نهایی نقشه را تحت تأثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که این فاکتورها می‌توانند باعث افزایش به ترتیب تا ۱۶ درصد و ۳۰ درصد در خطا گردند. علاوه بر این، آنها اظهار می‌دارند تأثیر این دو عامل منظم نبوده و قابل تصحیح با استفاده از مدل تجربی نخواهد بود. میزان خطای اعلام شده در این مطالعه

1. Degree of Shadowing
2. Cloud and Snow Contaminations
3. Spatio-Temporal-Spectral-Angular Observation Model
4. Morphological Feature-Oriented Algorithm

با پژوهش حال حاضر اختلاف قابل توجهی دارد. مقایسه این اعداد علاوه بر تأیید تأثیر تاج پوشش درختی موجود در خیابان‌ها در کاهش صحت نقشه نهایی، نشان دهنده اختلاف قابل توجه میزان تأثیر در مناطق مختلف می‌باشد. بدیهی است این اختلاف ناشی از تغییر تراکم پوشش گیاهی در مناطق مختلف بوده و دال بر این است که در صورتی که میزان تأثیر، به صورت کسری از مساحت سطوح نفوذناپذیر خیابان و پیاده‌رو بیان گردد، تعمیم نتایج بدست آمده در این خصوص به سایر مناطق به سادگی امکانپذیر نمی‌باشد. بدین معنی که اگر میزان خطای ناشی از پوشیده شدن سطوح به وسیله تاج پوشش درختی، بر اساس درصدی از سطوح نفوذناپذیر گزارش شود، در یک منطقه مشخص با مساحت سطوح نفوذناپذیر خیابان و پیاده‌روی مشخص و تراکم پوشش گیاهی (تعداد درخت در واحد سطح) بالا، میزان این خطا در مقایسه با منطقه دیگر با شرایط یکسان (مساحت خیابان و پیاده‌روی برابر) ولی با پوشش گیاهی کمتر، بیشتر خواهد بود. به همین دلیل در این مطالعه مساحت پوشش مشترک سطوح خیابان و تاج پوشش که در واقع شاخص میزان خطا می‌باشد، علاوه بر ارزیابی نسبت به مساحت خیابان، نسبت به مساحت کل تاج پوشش موجود در منطقه نیز ارزیابی و درصد آن محاسبه گردید. در این صورت تأثیر تراکم پوشش گیاهی بر میزان خطا نرمالسازی می‌گردد و افزایش تراکم موجب افزایش شاخص خطا نخواهد بود. زیرا میزان خطا به صورت کسری از مساحت خود پوشش گیاهی بیان می‌گردد. بدیهی است در این صورت با افزایش یا کاهش تراکم گیاهی، به دلیل تغییر مخرج کسر به صورت متناسب، نسبت اعلام شده از ثبات بیشتری برخوردار و به واقعیت نزدیکتر خواهد بود. نتایج بدست آمده در خصوص درصد پوشش مشترک نسبت پوشش گیاهی نیز موید این مطلب است و همان طور که مشاهده می‌گردد میزان اختلاف دو عدد در دو بلوک کمتر شده است. این موضوع در خصوص پوشش گیاهی موجود در بلوک های مسکونی و پارک‌ها نیز ارزیابی شد و تقریباً نتایج مشابهی داشت با این تفاوت که میزان خطای ایجاد شده در بلوک‌های مسکونی نسبت به سایر موارد بیشتر است. به طور کلی میزان تأثیر پوشش گیاهی در طبقه‌بندی اشتباه سطوح نفوذناپذیر به عنوان تاج پوشش در هر سه محدوده بیش از ۱۷/۵ درصد مساحت کل تاج پوشش بود که باعث می‌شود میزان سطوح نفوذناپذیر نسبت به مقدار واقعی کمتر برآورد گردد. این نتایج با نتایج Van der Linden and Hostert (۲۰۰۹) تطابق دارد.

نکته قابل توجه این است این نوع خطا در واقع بر صحت داده و نه دقت آن تأثیرگذار می‌باشد. بدیهی است که این نوع تأثیر با روشهای معمول ارزیابی دقت قابل بازیابی و تشخیص نخواهد بود. همچنین این نوع خطا ناشی از اختلاط طیفی یا ضعف در قدرت تفکیک طیفی یا مکانی نیست که بتوان آن را با روشهای مرسوم ادغام و موارد شبیه آن رفع نمود. علاوه بر این نوع غالب پوشش گیاهی از نظر ساختار تاج پوشش (به طور نمونه سوزنی‌برگ یا پهن‌برگ) نیز بر میزان خطای ایجاد شده تأثیر گذار خواهد بود.

نتیجه گیری

با عنایت به لزوم وجود اطلاعات دقیق سطوح نفوذناپذیر شهری جهت مدیریت پایدار شهری و نیز توسعه استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور به‌ویژه پهپاد در راستای تهیه این اطلاعات، عوامل مهم مؤثر بر صحت اطلاعات استخراج شده شامل پوشش گیاهی، ساختار و رون شهری و داده‌های مورد استفاده مورد ارزیابی قرار گرفت نتایج نشان داد:

۱) با استفاده از داده‌های چند منبعی می‌توان سطوح نفوذناپذیر را با حداکثر جزئیات (۱۷ کلاس) و صحت قابل قبول استخراج کرد.

۲) ساختارهای نامنظم شهری به دلیل تغییرات قابل توجه عوارض نسبت به زاویه برداشت اطلاعات به‌ویژه در خصوص تصاویر پهپاد می‌تواند باعث افزایش خطای طبقه‌بندی گردد.

۳) سطوح نفوذناپذیر شهری به دلیل پوشیده شدن به‌وسیله تاج‌پوشش گیاهی اغلب کمتر از میزان واقعی برآورد می‌گردد. میزان تأثیر پوشش در ایجاد خطا در بخش‌های مختلف شهری متفاوت بوده و تابع روند مشخصی نیست. نتایج بدست آمده از این تحقیق می‌تواند باعث بهبود تحقیقات سنجش‌ازدور در زمینه‌های زیر گردد:

≠ ارائه دید مناسب‌تر از صحت و قابلیت اعتماد نقشه سطوح نفوذناپذیر شهری تهیه شده از داده‌های سنجش‌ازدور

≠ تعیین اهداف مشخص به‌منظور توسعه الگوریتم یا رویه تصحیح و بهبود کیفیت اطلاعات بدست آمده از نظر تأثیر پوشش گیاهی.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه‌کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

عطارچی، سارا. (۱۳۹۸). کارایی شاخص‌های راداری در استخراج سطوح نفوذناپذیر شهری با استفاده از تصویر رادار تمام پلاریمتریک. پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، ۷(۴)، ۸۳۷-۸۵۴.

References

- Abdolkhani, A., Attarchi, S., & Alavipanah, S. K. (2024). A new classification scheme for urban impervious surface extraction from UAV data. *Earth Science Informatics*, 1-20. doi.org/10.1007/s12145-024-01430-3
- Ahmad, M. N., Shao, Z., Javed, A., Ahmad, I., Islam, F., Skilodimou, H. D., & Bathrellos, G. D. (2024). Optical-SAR Data Fusion Based on Simple Layer Stacking and the XGBoost Algorithm to Extract Urban Impervious Surfaces in Global Alpha Cities. *Remote Sensing*, 16(5), 873. <https://doi.org/10.3390/rs16050873>
- Ahmad, M. N., Shao, Z., Xiao, X., Fu, P., Javed, A., & Ara, I. (2024). A novel ensemble learning approach to extract urban impervious surface based on machine learning algorithms using SAR and optical data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104013. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104013>

- Alberti, M., Booth, D., Hill, K., Coburn, B., Avolio, C., Coe, S., & Spirandelli, D. (2007). The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 345-361. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.08.001
- Attarchi, S. (2019). Efficiency evaluation of SAR-derived indices in urban impervious surfaces extraction using full polarimetric image. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 7(4), 837-854. 10.22059/jurbangeo.2019.288561.1162 [In Persian]
- Attarchi, S. (2020). Extracting impervious surfaces from full polarimetric SAR images in different urban areas. *International Journal of Remote Sensing*, 41(12), 4644-4663. doi.org/10.1080/01431161.2020.1723178
- Cadenasso, M. L., Pickett, S. T., & Schwarz, K. (2007). Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(2), 80-88. doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[80:SHIUER]2.0.CO;2
- Caggiano, M. D., Tinkham, W. T., Hoffman, C., & Cheng, A. S. (2016). High resolution mapping of development in the wildland-urban interface using object based image extraction. 2(10), 1-12. 10.1016/j.heliyon.2016.e00174
- Carlson, T. (2003). Applications of remote sensing to urban problems. *Remote sensing of environment*, 86(3), 273-274. Doi:10.1016/S0034-4257(03)00073-7
- Collier, C. G. (2006). The impact of urban areas on weather. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences. applied meteorology and physical oceanography*, 132(614), 1-25. doi.org/10.1256/qj.05.199
- Crommelinck, S., Bennett, R., Gerke, M., Nex, F., Yang, M. Y., & Vosselman, G. (2016). Review of automatic feature extraction from high-resolution optical sensor data for UAV-based cadastral mapping. *Remote Sensing*, 8(8), 689. doi.org/10.3390/rs8080689
- Dekker, R. J. (2003). Texture analysis and classification of ERS SAR images for map updating of urban areas in the Netherlands. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41(9), 1950-1958. DOI: 10.1109/TGRS.2003.814628
- Elamin, A., & El-Rabbany, A. (2022). UAV-based multi-sensor data fusion for urban land cover mapping using a deep convolutional neural network. *Remote Sensing*, 14(17), 4298. DOI: doi.org/10.3390/rs14174298
- Fernandez Galarreta, J., Kerle, N., & Gerke, M. (2015). UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning. *Natural hazards and earth system sciences*, 15(6), 1087-1101. doi.org/10.5194/nhess-15-1087-2015
- Gong, P., Li, X., & Zhang, W. (2019). 40-Year (1978–2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing. *Science Bulletin*, 64(11), 756-763. doi.org/10.1016/j.scib.2019.04.024
- Guo, Q., Zhang, J., Guo, S., Ye, Z., Deng, H., Hou, X., & Zhang, H. (2022). Urban tree classification based on object-oriented approach and random forest algorithm using unmanned aerial vehicle (uav) multispectral imagery. *Remote Sensing*, 14(16), 3885. Doi.org/10.3390/rs14163885
- Hall-Beyer, M. (2017). Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*, 38(5), 1312-1388. Doi.org/10.1080/01431161.2016.1278314
- Hatt, B. E., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., & Taylor, S. L. (2004). The influence of urban density and drainage infrastructure on the concentrations and loads of pollutants in small streams. *Environmental management*, 34, 112-124. https://doi.org/10.1007/s00267-004-0221-8
- Hou, Y., Ding, W., Liu, C., Li, K., Cui, H., Liu, B., & Chen, W. (2022). Influences of impervious surfaces on ecological risks and controlling strategies in rapidly urbanizing regions. *Science of the Total Environment*, 825, 153823. Doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153823
- Jazayeri, I., Rajabifard, A., & Kalantari, M. (2014). A geometric and semantic evaluation of 3D data sourcing methods for land and property information. *Land use policy*, 36, 219-230. Doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.004
- Ji, L., Gong, P., Geng, X., & Zhao, Y. (2015). Improving the accuracy of the water surface cover type in the 30 m FROM-GLC product. *Remote Sensing*, 7(10), 13507-13527. Doi.org/10.3390/rs71013507

- Jiang, L., Liao, M., Lin, H., & Yang, L. (2009). Synergistic use of optical and InSAR data for urban impervious surface mapping: a case study in Hong Kong. *International Journal of Remote Sensing*, 30(11), 2781-2796. [Doi.org/10.1080/01431160802555838](https://doi.org/10.1080/01431160802555838)
- Kun, Y., Meie, P., Rong, Y., Yi, S., & Chao, M. (2016). Water environmental impacts of impervious surfaces and control measures in Dianchi Lake Basin, China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 10(10), 5407-5412.
- Lin, Y., Zhang, H., Lin, H., Gamba, P. E., & Liu, X. (2020). Incorporating synthetic aperture radar and optical images to investigate the annual dynamics of anthropogenic impervious surface at large scale. *Remote sensing of environment*, 242, 111757. [Doi.org/10.1016/j.rse.2020.111757](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111757)
- Liu, W., & Yamazaki, F. (2012). Object-based shadow extraction and correction of high-resolution optical satellite images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1296-1302. [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2189558](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2189558)
- Lu, D., Hetrick, S., & Moran, E. (2011). Impervious surface mapping with Quickbird imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9), 2519-2533. [Doi.org/10.1080/01431161003698393](https://doi.org/10.1080/01431161003698393)
- Mao, T., Fan, Y., Zhi, S., & Tang, J. (2022). A Morphological Feature-Oriented Algorithm for Extracting Impervious Surface Areas Obscured by Vegetation in Collaboration with OSM Road Networks in Urban Areas. *Remote Sensing*, 14(10), 2493. [Doi.org/10.3390/rs14102493](https://doi.org/10.3390/rs14102493)
- Ooi, M., Chan, A., Ashfold, M., Morris, K., Oozeer, M., & Salleh, S. A. (2017). Numerical study on effect of urban heating on local climate during calm inter-monsoon period in greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Urban climate*, 20, 228-250. [Doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.010)
- Pauleit, S., Ennos, R., & Golding, Y. (2005). Modeling the environmental impacts of urban land use and land cover change—a study in Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 71(2-4), 295-310. [Doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.009](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.009)
- Puissant, A., Hirsch, J., & Weber, C. (2005). The utility of texture analysis to improve per pixel classification for high to very high spatial resolution imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 26(4), 733-745. [Doi.org/10.1080/01431160512331316838](https://doi.org/10.1080/01431160512331316838)
- Rau, J.-Y., Chen, N.-Y., & Chen, L.-C. (2002). True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(6), 581-588. <http://worldcat.org/issn/00991112>
- Schmitt, M., & Zhu, X. X. (2016). Data fusion and remote sensing: An ever-growing relationship. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(4), 6-23. [10.1109/MGRS.2016.2561021](https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2561021)
- Shao, G., & Wu, J. (2008). On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data. *Landscape Ecology*, 23, 505-511. doi.org/10.1007/s10980-008-9215-x
- Shao, Z., Cheng, T., Fu, H., Li, D., & Huang, X. (2023). Emerging Issues in Mapping Urban Impervious Surfaces Using High-Resolution Remote Sensing Images. *Remote Sensing*, 15(10), 2562. [Doi.org/10.3390/rs15102562](https://doi.org/10.3390/rs15102562)
- Shao, Z., Fu, H., Fu, P., & Yin, L. (2016). Mapping urban impervious surface by fusing optical and SAR data at the decision level. *Remote Sensing*, 8(11), 945. [Doi.org/10.3390/rs8110945](https://doi.org/10.3390/rs8110945)
- Simpson, J. J., & Stitt, J. R. (1998). A procedure for the detection and removal of cloud shadow from AVHRR data over land. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3), 880-897. [DOI: 10.1109/36.673680](https://doi.org/10.1109/36.673680)
- Sun, Z., Zhao, X., Wu, M., & Wang, C. (2019). Extracting urban impervious surface from worldView-2 and airborne LiDAR data using 3D convolutional neural networks. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47, 401-412. [Doi.org/10.1007/s12524-018-0917-5](https://doi.org/10.1007/s12524-018-0917-5)
- Van der Linden, S., & Hostert, P. (2009). The influence of urban structures on impervious surface maps from airborne hyperspectral data. *Remote sensing of environment*, 113(11), 2298-2305. [Doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.004)
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote sensing of environment*, 117, 34-49. [Doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030)
- Wu, C., & Murray, A. T. (2003). Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote sensing of environment*, 84(4), 493-505. [Doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00136-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00136-0)

- Wu, W., Miao, Z., Xiao, Y., Li, Z., Zhang, A., Samat, A., Du, N., Xu, Z., & Gamba, P. (2020). New scheme for impervious surface area mapping from SAR images with auxiliary user-generated content. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5954-5970. [10.1109/JSTARS.2020.3027507](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3027507)
- Yang, F., Matsushita, B., & Fukushima, T. (2010). A pre-screened and normalized multiple endmember spectral mixture analysis for mapping impervious surface area in Lake Kasumigaura Basin, Japan. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(5), 479-490. [Doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.004](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.06.004)
- Yao, H., Qin, R., & Chen, X. (2019). Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications— A review. *Remote Sensing*, 11(12), 1443. [Doi.org/10.3390/rs11121443](https://doi.org/10.3390/rs11121443)
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote sensing of environment*, 106(3), 375-386. [Doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003)
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (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. [Doi.org/10.1080/01431160304987](https://doi.org/10.1080/01431160304987)
- Zhang, H., & Xu, R. (2018). Exploring the optimal integration levels between SAR and optical data for better urban land cover mapping in the Pearl River Delta. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 87-95. [Doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.013)
- Zhang, H., Lin, H., & Wang, Y. (2018). A new scheme for urban impervious surface classification from SAR images. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 139, 103-118. [Doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.007](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.007)
- Zhang, H., Lin, H., Li, Y., Zhang, Y., & Fang, C. (2016). Mapping urban impervious surface with dual-polarimetric SAR data: An improved method. *Landscape and Urban Planning*, 151, 55-63. [Doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.009](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.009)
- Zhang, H., Wan, L., Wang, T., Lin, Y., Lin, H., & Zheng, Z. (2019). Impervious surface estimation from optical and polarimetric SAR data using small-patched deep convolutional networks: A comparative study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2374-2387. [10.1109/JSTARS.2019.2915277](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2915277)
- Zhang, J., Li, P., & Wang, J. (2014). Urban built-up area extraction from Landsat TM/ETM+ images using spectral information and multivariate texture. *Remote Sensing*, 6(8), 7339-7359. [Doi.org/10.3390/rs6087339](https://doi.org/10.3390/rs6087339)
- Zhang, Y., Zhang, H., & Lin, H. (2014). Improving the impervious surface estimation with combined use of optical and SAR remote sensing images. *Remote sensing of environment*, 141, 155-167. [Doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.028](https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.028)
- Zhou, G., Chen, W., Kelmelis, J. A., & Zhang, D. (2005). A comprehensive study on urban true orthorectification. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 43(9), 2138-2147. [DOI: 10.1109/TGRS.2005.848417](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.848417)