



University of Tehran Press

## Town & Country Planning

Home Page: <https://jtcp@ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6268

### Examining the Relationship between Urban Sprawl and Heat Island Intensification Through a Sustainable Urban Management Approach

Mohsen Niroomand<sup>1</sup> | Parham Pahlavani<sup>2\*</sup> | Behnaz Bigdeli<sup>3</sup>

1. Department of GIS, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [k.niroomand@ut.ac.ir](mailto:k.niroomand@ut.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of GIS, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: [Pahlavani@ut.ac.ir](mailto:Pahlavani@ut.ac.ir)

3. Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: [bigdeli@shahroodut.ac.ir](mailto:bigdeli@shahroodut.ac.ir)

#### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Article

**Article History:**  
Received October 23, 2024  
Revised November 30, 2024  
Accepted January 07, 2024  
Published online 30 July 2025

#### Keywords:

Land surface temperature,  
Random forest algorithm,  
Urban heat islands,  
Urban sprawl.

#### ABSTRACT

Urban sprawl is recognized as one of the irregular patterns of city growth and development. This phenomenon has detrimental consequences in the economic, social, and environmental domains. The present study investigates the relationship between the expansion of built-up areas and the increase in urban heat islands, which is one of the consequences of urban sprawl. To this end, Landsat satellite images were used to generate land surface temperature (LST) maps for Houston, United States, over the period from 2017 to 2023. Additionally, land cover maps of the study area were produced using a machine learning algorithm with an accuracy of 94.31%. Normalized Shannon entropy values of 0.9271 for 2017 and 0.9314 for 2023 indicate the high dispersion of built-up areas and the growth of urban sprawl during this period. The comparison of land cover and LST maps reveals a 3.84°C increase in the temperature of built-up areas over the study period. Furthermore, the temperature difference of 4.41°C between built-up areas and adjacent non-built areas highlights the intensity of heat islands caused by construction growth. The significant temperature rise due to construction and the impact of built-up areas on the formation of urban heat islands underscore the importance of effective management and planning to address the challenges of urban sprawl and promote sustainable development.

**Cite this article:** Niroomand, M.; Pahlavani, P. & Bigdeli, B. (2025). Examining the Relationship between Urban Sprawl and Heat Island Intensification Through a Sustainable Urban Management Approach. *Town and Country Planning*, 17 (1), 1-17. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.384081.670477>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.  
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.384081.670477>

**Publisher:** University of Tehran Press.



انتشارات دانشگاه تهران

## آمایش سرزمین

سایت نشریه: <https://jtcp@ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۶۲۶۸-۲۴۲۳

# بررسی ارتباط گسترش افقی شهری و تشدید جزایر گرمایی با رویکرد مدیریت پایدار شهری

محسن نیرومند<sup>۱</sup> | پرهام پهلوانی<sup>۲\*</sup> | بهناز بیگدلی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [k.niroomand@ut.ac.ir](mailto:k.niroomand@ut.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [Pahlavani@ut.ac.ir](mailto:Pahlavani@ut.ac.ir)
۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: [bigdeli@shahroodut.ac.ir](mailto:bigdeli@shahroodut.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

### نوع مقاله:

پژوهشی

### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

### کلیدواژه:

الگوریتم جنگل تصادفی،

جزایر گرمایی شهری،

خزش شهری،

دمای سطح زمین.

خزش شهری، به عنوان یکی از الگوهای نامنظم رشد و توسعه شهرها شناخته می‌شود. این پدیده، پیامدهای مخربی در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی به همراه دارد. تحقیق حاضر به بررسی ارتباط رشد مناطق ساخت‌وساز شده و افزایش جزایر گرمایی به عنوان یکی از پیامدهای پدیده خزش شهری می‌پردازد. به این منظور، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، نقشه‌های دما سطح زمین در هیوستون واقع در ایالات متحده، طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ تهیه می‌گردند. همچنین، نقشه‌های پوشش اراضی محدوده مطالعاتی با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین و با دقت ۹۴/۳۱٪ ایجاد می‌شوند. مقادیر آنتروپی شانون نرمال شده ۰،۹۲۷۱ برای سال ۲۰۱۷ و ۰،۹۳۱۴ برای سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده پراکندگی بالا مناطق ساخته شده و افزایش خزش شهری طی این دوره زمانی است. مقایسه نقشه‌های پوشش اراضی و دما سطح زمین، افزایش ۳،۸۴ درجه سلسیوسی دما در مناطق ساخته شده طی بازه زمانی مورد نظر را نشان می‌دهد. اختلاف دما ۴/۴۱ درجه سلسیوس مناطق ساخته شده و ساخته نشده مجاور، شدت جزایر گرمایی ایجاد شده بر اثر رشد ساخت‌وساز را نمایان می‌سازد. افزایش چشمگیر دما در اثر رشد ساخت‌وساز و تاثیر مناطق ساخته شده بر ایجاد جزایر گرمایی شهری، اهمیت مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در راستای مقابله با چالش‌های خزش شهری و توسعه پایدار را نشان می‌دهد.

**استناد:** نیرومند، محسن؛ پهلوانی، پرهام و بیگدلی، بهناز (۱۴۰۳). بررسی ارتباط گسترش افقی شهری و تشدید جزایر گرمایی با رویکرد مدیریت پایدار شهری. *آمایش*

سرزمین، ۱۷ (۱) ۱۷-۱۰. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.384081.670477>

© نویسندگان. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.384081.670477>



## مقدمه

طی دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت شهرنشین و نیازهای روزافزون ایشان به مسکن و اشتغال و زیرساخت سبب گسترش اراضی ساخت‌وساز شده در مناطق مختلف جهان شده است. توسعه مناطق شهری به اشکال گوناگونی رخ می‌دهد. گسترش افقی شهری<sup>۱</sup> یکی از الگوهای کنترل‌نشده توسعه شهری به شمار می‌رود و اغلب منجر به افزایش ساخت‌وساز در نواحی پیرامونی شهرها می‌شود (Nechyba & Walsh, 2002). توسعه کم‌تراکم از بارزترین مشخصه‌های نواحی گسترش‌یافته است و الگوهای نامنظم رشد، از جمله توسعه نواری و جهش‌یافته و ناپیوسته، در این مناطق دیده می‌شود (Ewing, 1997).

پدیده گسترش افقی شهری پیامدهای مخربی در زمینه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی و اجتماعی به همراه دارد و امروزه به یکی از دغدغه‌های محققان و برنامه‌ریزان حوزه شهر و محیط زیست بدل شده است (Barman et al., 2024). در زمینه اقتصادی، گسترش افقی شهری می‌تواند چالش‌هایی در سطوح کلان و محلی ایجاد کند. این پدیده سبب افزایش تقاضا جهت احداث زیرساخت‌هایی همچون جاده و سایت‌های برق می‌شود و هزینه‌های فراوان به دولت‌های محلی تحمیل می‌کند (Hajilou et al., 2023). همچنین، تخصیص ناکارآمد فضا توازن میان جمعیت و فعالیت‌ها را بر هم می‌زند و سبب هدررفت منابع و اراضی ارزشمند می‌شود (Ding et al., 2024). علاوه بر این، نیاز به سهولت در دسترسی به نواحی حاشیه‌ای شهرها سبب افزایش مالکیت خودروهای شخصی می‌شود. سبک زندگی مبتنی بر خودروهای شخصی و رشد میزان عبور و مرور، علاوه بر اتلاف زمان شهروندان و سوخت و انرژی، منجر به افزایش آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای می‌شود و بدین ترتیب محیط زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Rodríguez et al., 2016). تخریب مزارع کشاورزی و باغات و فضای سبز جهت ساخت‌وساز از دیگر پیامدهای گسترش افقی شهری در زمینه زیست‌محیطی است. این امر می‌تواند منجر به اختلال در اکوسیستم و کاهش تنوع زیستی و تهدید امنیت غذایی شود (Concepción et al., 2015). همچنین، با افزایش سطوح نفوذناپذیر، همچون آسفالت و بتن‌ها، ظرفیت زمین جهت بازتابش انرژی خورشیدی تغییر می‌کند و میزان حرارت بالاتری جذب می‌شود (Ma & Peng, 2021). تغییر توانایی بازتابندگی زمین همراه رشد میزان آلاینده‌های ناشی از افزایش عبور و مرور، صنایع، مسکن، و زیرساخت‌ها موجب افزایش دما سطح زمین<sup>۲</sup> (LST) می‌شود (Feng et al., 2023). در نتیجه این امر، پدیده‌ای به نام جزایر گرمایی شهری<sup>۳</sup> ایجاد می‌شود. جزایر گرمایی به مناطقی اطلاق می‌شود که دمای آن‌ها به طور چشمگیر از مناطق پیرامونی خود بالاتر است (Kim & Brown, 2021).

افزایش دما و وقوع پدیده جزایر گرمایی اثر مخرب بر محیط زیست و محیط شهری به دنبال دارد (Nuruzzaman, 2015). در فصل تابستان این پدیده منجر به افزایش مصرف انرژی جهت تأمین سرمایش ساختمان‌ها می‌شود و به این ترتیب منابع انرژی را تحت فشار قرار می‌دهد. همچنین، تشدید آلودگی هوا و افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های مرتبط با گرما از پیامدهای جزایر گرمایی محسوب می‌شود. علاوه بر این، افزایش دمای محلی ناشی از جزایر گرمایی می‌تواند بر الگوهای آب‌وهوایی منطقه‌ای تأثیرگذار باشد و حتی به تغییرات گسترده در اقلیم و اکوسیستم منجر شود (Nuruzzaman, 2015).

پیامدهای ناشی از گسترش افقی شهری و افزایش دما سطح زمین منجر به بروز موانعی در تحقق اهداف توسعه پایدار تبیین شده توسط سازمان ملل<sup>۴</sup> متحد می‌شود (Shao et al., 2021). این پدیده‌ها به کاهش کیفیت زندگی شهروندان و ایجاد ناپایداری می‌انجامد و با هدف یازدهم اهداف توسعه پایدار مبنی بر حفظ پایداری شهرها در تضاد است (عموشاهی et al., 2023). همچنین، تشدید گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی ناسازگار با هدف سیزدهم مستند به اقدام برای مقابله با تغییرات اقلیمی تلقی می‌شود (Hanif, 2018). افزایش بیماری‌های ناشی از گرما و آسیب به سلامت عمومی جامعه مغایر با هدف سوم مبتنی بر ارتقای سلامت و رفاه شمرده می‌شود. افزون بر آن، افزایش مصرف انرژی جهت فراهم‌آوری سرمایش ساختمان‌ها به استفاده بیشتر از منابع انرژی فسیلی منجر می‌شود و این امر نیز با هدف هفتم، یعنی تأمین انرژی پاک و مقرون‌به‌صرفه، در تضاد قرار دارد (Hanif, 2018).

1. urban sprawl  
2. land surface temperature  
3. urban heat islands  
4. <https://sdgs.un.org/goals>

رشد جمعیت و صنعتی شدن شهرها نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی مؤثر برای مقابله با چالش‌های ناشی از گسترش افقی شهرها و جزایر گرمایی را نمایان می‌سازد. از این رو، شناخت دقیق این پدیده‌ها و بررسی ارتباط میان آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور<sup>۱</sup> و سیستم‌های اطلاعات مکانی<sup>۲</sup> (GIS) به منظور پایش و کمی‌سازی گسترش افقی شهرها، بررسی تأثیر توسعه مناطق ساخته‌شده بر دمای سطح زمین، و ارزیابی ارتباط بین گسترش افقی و وقوع جزایر گرمایی انجام می‌شود.

### پیشینه پژوهش

پیمادهای مخرب گسترش افقی شهری و جزایر گرمایی بر محیط زیست و مناظر شهری ضرورت پایش این پدیده‌ها و برنامه‌ریزی صحیح جهت مدیریت چالش‌های ناشی از آن‌ها و حرکت در مسیر توسعه پایدار را نمایان می‌سازد. امروزه، با پیشرفت علوم در حوزه سنجش از دور و GIS، محققان گام‌های مهمی در این زمینه برداشته‌اند (Jat et al., 2008)؛ به‌ویژه با اتکا بر تصاویر ماهواره‌ای تحقیقات مختلفی جهت شناخت صحیح گسترش افقی شهری و جزایر گرمایی و ارتباط بین آن‌ها صورت پذیرفته است. رانا و همکارانش (۲۰۲۴) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ روند گسترش شهرنشینی و جزایر گرمایی را در مناطق شهری بنگال هندوستان طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ بررسی کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، میزان مناطق ساخته شده از ۷/۸۸ درصد به ۲۶/۹۴ درصد و حداکثر مقدار جزایر گرمایی شهری از ۴/۵۷ درصد به ۶/۸۷ درصد افزایش یافته‌اند. این امر تأثیرات زیست‌محیطی گسترش افقی شهری را نشان می‌دهد (Rana et al., 2024). فو و همکارانش در همین سال، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و شاخص‌های طیفی، مقادیر LST را در شهر سیالکوت پاکستان بررسی کردند. ایشان از یک مدل شبکه عصبی کانوولوشنی جهت پیش‌بینی LST استفاده کردند و همبستگی بالا بین میزان سطوح نفوذناپذیر و مقادیر LST را نشان دادند. این مطالعه هشدار می‌دهد ادامه روند شهرنشینی بدون برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند به طور چشمگیری سبب افزایش میزان جزایر حرارتی شود (Fu et al., 2024).

کارنیرو و همکارانش (۲۰۲۱) تأثیر گسترش بی‌برنامه شهری بر پدیده جزیره گرمایی شهری در تیروسینای برزیل را طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ بررسی کردند. بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل ۲<sup>۳</sup> استفاده شد. نتایج این مطالعه افزایش ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد دما در مناطق تحت پدیده گسترش افقی شهری طی بازه زمانی مورد نظر را نشان می‌دهد (Carneiro et al., 2021). سینگ و همکارانش (۲۰۱۹) با استفاده از روش‌های پیشرفته سنجش از دور و GIS گسترش افقی شهری لودیانای هند را طی بازه زمانی ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد روند شهرنشینی غیر قابل کنترل است و به طور چشمگیری منجر به افزایش مناطق ساخته‌شده و تشکیل جزایر گرمایی شهری شده است؛ طوری که شدت جزایر گرمایی شهری از ۲۲ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۹ به ۲۲ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته است (Singh & Kalota, 2019). کمبوج و علی (۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۹ و ۲۰۲۰ پدیده جزیره گرمایی شهری را در شهر کوتای هند مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور از شاخص طیفی تفاوت نرمال شده مناطق ساخته‌شده و مقادیر LST استفاده شد. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که توسعه شهرنشینی به طور قابل توجهی در افزایش دمای موضعی نقش دارد و سبب افزایش مصرف انرژی در مناطق شهری شده است (Kamboj & Ali, 2021).

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

#### محدوده و قلمرو مورد مطالعه

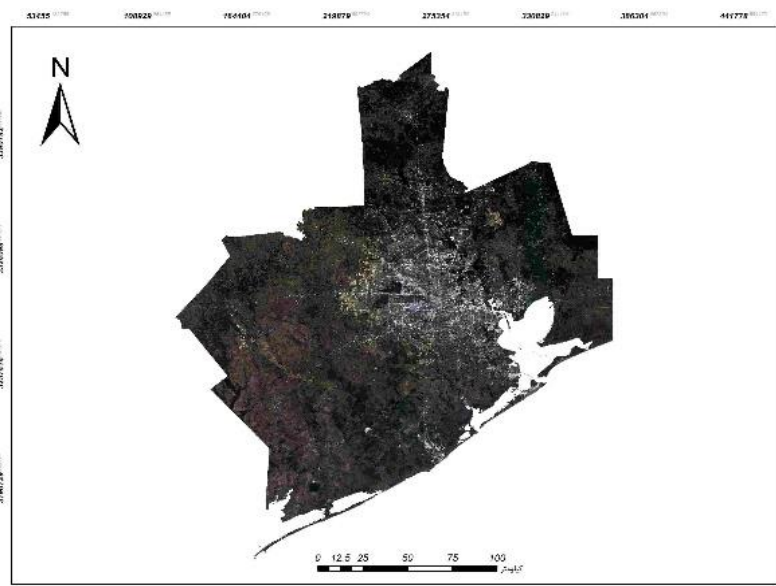
هیوستون، به عنوان بزرگ‌ترین شهر تگزاس و چهارمین شهر بزرگ ایالات متحده، محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر را تشکیل می‌دهد. این شهر در جنوب شرقی ایالت تگزاس و نزدیک خلیج مکزیک واقع شده و شامل ۱۳ منطقه شهری است. هیوستون طی

1. remote sensing

2. geospatial information system

3. Sentinel-2

چند دهه گذشته شاهد توسعه قابل توجهی بوده است. بر اساس سرشماری ملی ایالات متحده<sup>۱</sup> جمعیت این شهر طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بیش از یک میلیون و دویست هزار نفر افزایش داشته است. این امر نیاز به ساخت‌وساز و توسعه بیشتر جهت پاسخ‌گویی به نیازهای شهروندان را نمایان می‌سازد. شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای لندست منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

### مجموعه داده‌ها

تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ منطقه مورد مطالعه از سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده<sup>۳</sup> اخذ می‌شوند. بدین منظور از تصاویر حسگرهای تصویربرداری عملیاتی زمین<sup>۴</sup> (OLI) و مادون قرمز حرارتی<sup>۵</sup> (TIRS) استفاده می‌شود. پس از پیش‌پردازش تصاویر، شامل اعمال تصحیحات اتمسفریک و به‌کارگیری ماسک ابری، باندهای OLI با هدف تهیه شاخص‌های طیفی و طبقه‌بندی پوشش اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین داده‌های TIRS به‌ویژه باند ده تصویر ماهواره‌ای لندست جهت برآورد دما سطح زمین به کار گرفته می‌شوند.

### روش و ابزار تحقیق

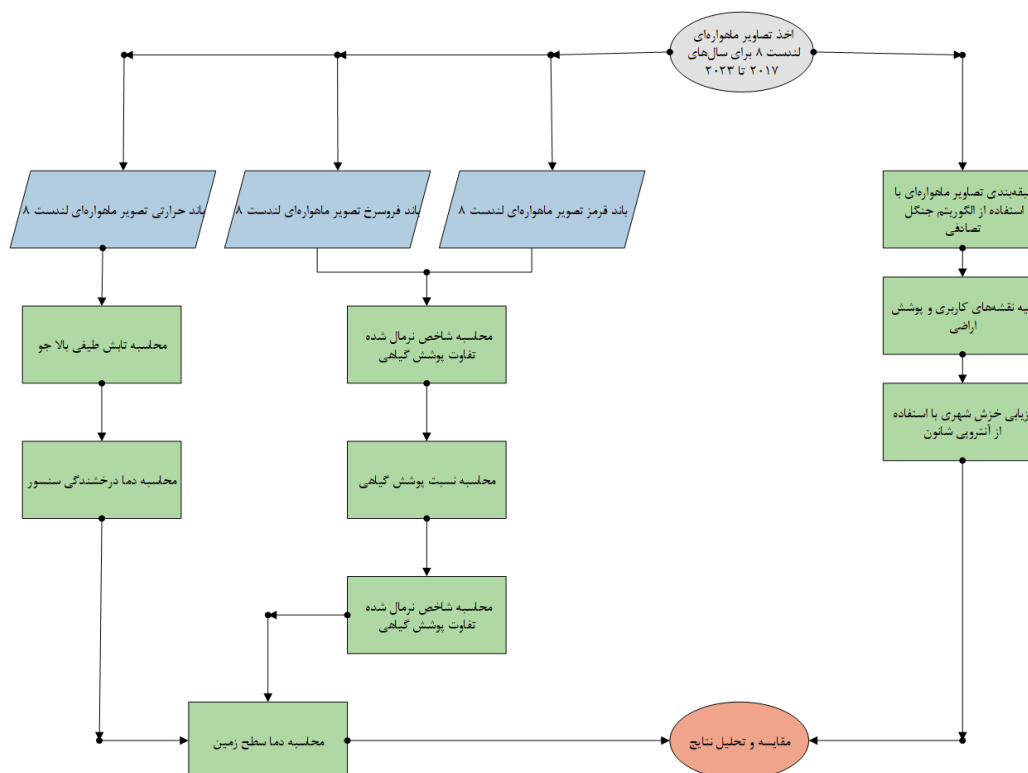
تحقیق حاضر با تحلیل و مقایسه نقشه‌های سری زمانی پوشش اراضی و LST به بررسی نحوه ارتباط توسعه مناطق ساخته‌شده و افزایش دما می‌پردازد. بدین جهت نقشه‌های مورد نظر از تصاویر ماهواره‌ای لندست استخراج می‌شود و مقایسه‌های آماری با استفاده از روش‌های GIS صورت می‌پذیرد. شکل ۲ روند کلی روش تحقیق پیشنهادی را نشان می‌دهد.

### طبقه‌بندی تصاویر ماهواره

الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی<sup>۶</sup> جهت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی<sup>۷</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد (Breiman, 2001). مطابق جدول ۱، طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای در پنج کلاس صورت می‌پذیرد. بدین

1. <https://www.census.gov/>
2. Landsat 8
3. <https://www.usgs.gov/>
4. operational land imager
5. thermal infrared sensor
6. random forest
7. land use land cover

منظور، نمونه‌های آموزشی و آزمایشی بر مبنای پیکسل و به کمک نقشه‌های رسمی منطقه مورد مطالعه و تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر شاخص‌های طیفی جمع‌آوری شده است؛ به گونه‌ای که تنوع مکانی در منطقه مورد مطالعه رعایت شود. همچنین، داده‌های ارتفاعی مستخرج از  $SRTM^1$  و شاخص‌های طیفی  $NDVI^2$ ،  $NDBI^3$ ،  $NDBaI^4$ ،  $NDMI^5$ ،  $SAVI^6$ ،  $NDWI^7$ ،  $EVI^8$  به عنوان مجموعه ویژگی‌ها به منظور آموزش مدل یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرند (Estoque & Murayama, 2015; Hislop et al., 2018; Tatsumi et al., 2015).



شکل ۲. روش تحقیق پیشنهادی

جدول ۱. طبقات پوشش اراضی

| کلاس         | مصادیق تحت پوشش                                                                                 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ساخته شده    | مناطق تحت پوشش سازه‌های ساخت بشر از جمله نواحی مسکونی، صنعتی، زیرساخت‌ها، جاده‌ها، پیاده‌راه‌ها |
| پهنه‌های آبی | توده‌های آبی از جمله دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی و رودخانه‌ها و آبگیرها                           |
| فضای سبز     | مناطق با پوشش گیاهی متراکم از جمله جنگل، باغات، بوستان‌ها، مراتع                                |
| بایر         | مناطق با پوشش گیاهی پایین یا بدون پوشش گیاهی از جمله بیابان، خاک برهنه، سنگ، ماسه               |
| مزارع        | زمین‌های کشاورزی و نواحی تحت کشت                                                                |

1. shuttle radar topography mission
2. normalized difference vegetation index
3. normalized difference building index
4. normalized difference bareness index
5. normalized difference moisture index
6. soil adjusted vegetation index
7. normalized difference water index
8. enhanced vegetation index

تنظیم مقادیر بهینه پارامترهای مدل جنگل تصادفی با استفاده از روش جست و جوی گریدی صورت می‌پذیرد (Syarif et al., 2016). در این فرایند مقادیر مختلفی برای پارامترهای کلیدی مدل شامل تعداد درخت‌ها، حداکثر عمق درخت‌ها، حداقل تعداد نمونه‌ها در هر گره مورد بررسی قرار می‌گیرند. تأثیر هر ترکیب از مقادیر بر فرایند آموزش مدل آزمایش شده و عملکرد مدل با استفاده از معیارهای دقت<sup>۱</sup> و صحت کلی<sup>۲</sup> و امتیاز F1<sup>۳</sup> ارزیابی می‌شود (Powers, 2020). در نهایت، ترکیب بهینه پارامترها با هدف دستیابی به بالاترین کارایی بر روی داده‌های آزمایشی انتخاب می‌شوند.

### تحلیل آنتروپی شانون

آنتروپی شانون معیاری متداول در مطالعات شهری جهت سنجش میزان پراکندگی یا تمرکز مکانی پدیده‌هایی از جمله جمعیت و توسعه شهری است و به منظور ارزیابی گسترش افقی شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Biney & Boakye, 2021). بر این اساس منطقه مورد مطالعه با استفاده از دوایر یا چندضلعی‌های متحدالمرکز به چندین ناحیه تقسیم می‌شود. مقدار آنتروپی شانون نرمال شده با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Biney & Boakye, 2021).

$$P_i = -\frac{1}{\log(n)} \sum_{i=1}^n P_i \log(P_i) \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱،  $n$  نشان‌دهنده تعداد نواحی و  $P_i$  بیانگر نسبت مناطق ساخته شده در هر ناحیه است. مقدار آنتروپی شانون نرمال شده از صفر به معنی توسعه بسیار متمرکز و فشرده تا یک، به معنی الگوی ساخت و ساز کاملاً پراکنده و گسترده، متغیر است (Biney & Boakye, 2021).

آنتروپی شانون یکی از شاخص‌های معتبر و رایج جهت تحلیل توزیع مکانی پدیده‌ها، از جمله خزش شهری، محسوب می‌شود. این شاخص بر اساس نحوه توزیع و گستره کاربری‌های شهری مختلف به کمی‌سازی پراکندگی و همگنی توسعه شهری می‌پردازد. توانایی این شاخص در اندازه‌گیری بی‌نظمی و پراکندگی توسعه آن را به ابزاری مناسب برای بررسی خزش شهری تبدیل کرده است. از مزایای آن می‌توان به سادگی محاسبات، قابلیت مقیاس‌پذیری در مناطق مختلف، و امکان تعمیم‌پذیری اشاره کرد. در مقایسه با سایر شاخص‌ها، آنتروپی شانون به طور ویژه بر تحلیل پراکندگی تمرکز دارد و قادر است توزیع و نظم یا بی‌نظمی مکانی را به طور دقیق‌تر اندازه‌گیری کند.

### دما سطح زمین

مقادیر LST با در نظر گرفتن تأثیرات جوئی و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست مورد محاسبه قرار می‌گیرد (Bendib et al., 2017). روند محاسبه LST در این بخش بررسی می‌شود.

#### ۱. تابش طیفی بالا جو

تابش طیفی سطح بالا جو<sup>۴</sup> (TOA) بر اساس رابطه ۲ و با استفاده از پرتوهای فروسخ حرارتی<sup>۵</sup> (TIR) مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این رابطه  $Q_{cal}$  بیانگر باند ده تصویر ماهواره‌ای لندست ۸،  $M_L$  ضریب مقیاس‌بندی ضربی، و  $A_L$  ضریب مقیاس‌بندی جمعی باند مورد نظر است. مقادیر  $M_L$  و  $A_L$  بر اساس فراداده تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۳۴۲ و ۱۴۹ در نظر گرفته می‌شود (Avdan & Jovanovska, 2016).

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad \text{رابطه ۲}$$

1. precision  
2. overall accuracy  
3. F1-score  
4. top of atmosphere  
5. thermal infrared

## ۲. دما درخشندگی سنسور

دما درخشندگی سنسور با استفاده از رابطه ۳ بر حسب درجه سلسیوس محاسبه می‌شود. در این رابطه  $K_1$  و  $K_2$  مقادیر ثابت موجود در فراداده تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ است و به ترتیب برابر ۱۳۲۱/۰۸ و ۷۷۷/۸۹ هستند. همچنین  $L_\lambda$  تابش طیفی TOA محاسبه شده در مرحله قبل است (Avdan & Jovanovska, 2016).

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

## ۳. شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی

شاخص طیفی NDVI معیاری کلیدی جهت ارزیابی میزان تراکم پوشش گیاهی است و با استفاده از باندهای سرخ و فروسرخ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ استخراج می‌شود (Bendib et al., 2017).

## ۴. نسبت پوشش گیاهی

معیار نسبت پوشش گیاهی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در این رابطه  $NDVI_s$  و  $NDVI_v$  به ترتیب بیانگر مقدار NDVI خاک و گیاهان به عنوان حداقل و حداکثر مقدار NDVI منطقه مورد مطالعه هستند (Bendib et al., 2017).

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

## ۵. تابندگی سطح زمین

توانایی تابش حرارتی سطح با استفاده از معیار تابندگی سطح زمین<sup>۱</sup> (LSE) ارزیابی می‌شود. این معیار با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود. در این رابطه  $\varepsilon_s$  و  $\varepsilon_v$  به ترتیب بیانگر بازتابندگی سطوح خاک و پوشش گیاهی هستند و با مقادیر ۰/۹۶۶ و ۰/۹۷۳ مشخص می‌شوند.  $C_\lambda$  ضریب تصحیح ناهمواری زمین را نشان می‌دهد و برابر با ثابت ۰/۰۰۵ در نظر گرفته می‌شوند. همچنین  $P_v$  نسبت پوشش گیاهی را بیان می‌کند (Avdan & Jovanovska, 2016).

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + C_\lambda \quad \text{(رابطه ۵)}$$

## ۶. دما سطح زمین

مقادیر LST با استفاده از دما درخشندگی و تابندگی سطح زمین محاسبه می‌شود. بدین جهت از رابطه ۶ استفاده می‌شود. در این رابطه  $\lambda$  طول موج تابش ساطع شده را نشان می‌دهد و مقدار آن برای باند دهم ماهواره لندست ۸ به طور متوسط برابر ۱۰/۸۹۵ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود. جهت تنظیم بازتابندگی سطح زمین و بر اساس قانون پلانک  $h$  ثابت پلانک،  $c$  سرعت نور، و  $\sigma$  ثابت بولتزمن را نشان می‌دهند (Avdan & Jovanovska, 2016).

$$T_s = \frac{BT}{1 + \left( \frac{\lambda BT}{h \times \frac{c}{\sigma}} \ln \varepsilon_\lambda \right)} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

## مقایسه و تحلیل آماری

مقایسه نقشه‌های LULC و LST با استفاده از روش‌های GIS و تحلیل‌های آماری صورت می‌پذیرد. با توجه به تفاوت وضوح مکانی باندهای حسگرهای OLI و TIRS تصاویر ماهواره‌ای لندست، وضوح مکانی نقشه‌های پوشش اراضی با استفاده از

1. land surface emissivity

نمونه‌برداری کاهشی به مقدار صد متر تقلیل می‌یابد (Youssef, 1999). در تحقیق حاضر از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه<sup>۱</sup> جهت ارزیابی ارتباط دما و توسعه نواحی ساخته‌شده استفاده می‌شود. تحلیل واریانس یک‌طرفه یک روش آماری است که جهت مقایسه مقادیر میانگین یک متغیر وابسته در میان دو یا چند گروه مستقل استفاده می‌شود (Kim, 2017). این روش با بررسی واریانس بین گروه‌ها و واریانس درون گروه‌ها به ارزیابی تفاوت‌های معنادار آماری در مقادیر آن‌ها می‌پردازد. به این منظور، آماره F بر اساس رابطه ۷ محاسبه و با سطح معناداری p-value مقایسه می‌شود (Kim, 2017).

$$\rho = \frac{\text{Between-group variability}}{\text{Within-group variability}} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2}{k-1} \div \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{N-k} \quad (\text{رابطه ۷})$$

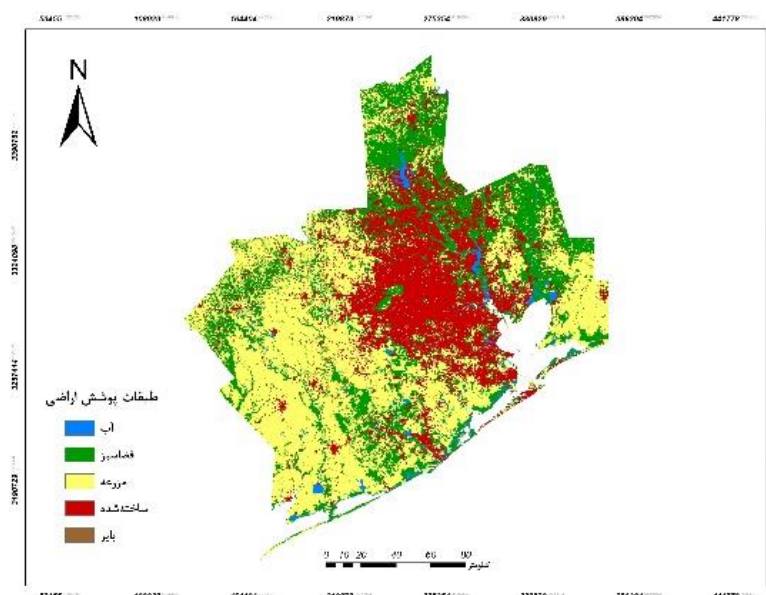
در رابطه ۷،  $k$  تعداد گروه‌ها،  $n_i$  تعداد مشاهدات در گروه  $i$ ،  $\bar{X}_i$  میانگین گروه  $i$ ،  $\bar{X}$  میانگین کل داده‌ها،  $X_{ij}$  مقدار مشاهده‌ی  $j$ ام در گروه  $i$  و  $N$  تعداد کل مشاهدات است.

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

### تهیه نقشه‌های پوشش اراضی

نقشه‌های LULC منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی تهیه می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ برای بازه زمانی خرداد و تیر سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ اخذ و مدل جنگل تصادفی با داده‌های سال ۲۰۲۳ آموزش داده می‌شود. در این زمینه، ۳۲۶۵۹ نمونه آموزشی و ۱۰۳۲۸ نمونه آزمایشی جمع‌آوری می‌شود و پس از محاسبه شاخص‌های طیفی فرایند طبقه‌بندی انجام می‌پذیرد. پارامترهای مدل با جست‌وجوی گریدی تنظیم و مدل با استفاده از ۴۰۰ درخت تصمیم، حداکثر عمق ۳۰، و ۳ تقسیم در هر گره آموزش داده می‌شود. مدل نهایی جهت طبقه‌بندی تصاویر سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ در پنج کلاس پهنه آبی، فضای سبز، مزارع، مناطق ساخت‌وساز شده، و اراضی بایر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۳ نقشه LULC مربوط به سال ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد.

جدول ۲ نتایج ارزیابی مدل و اعتبارسنجی نتایج طبقه‌بندی در سال ۲۰۲۳ را نمایش می‌دهد.



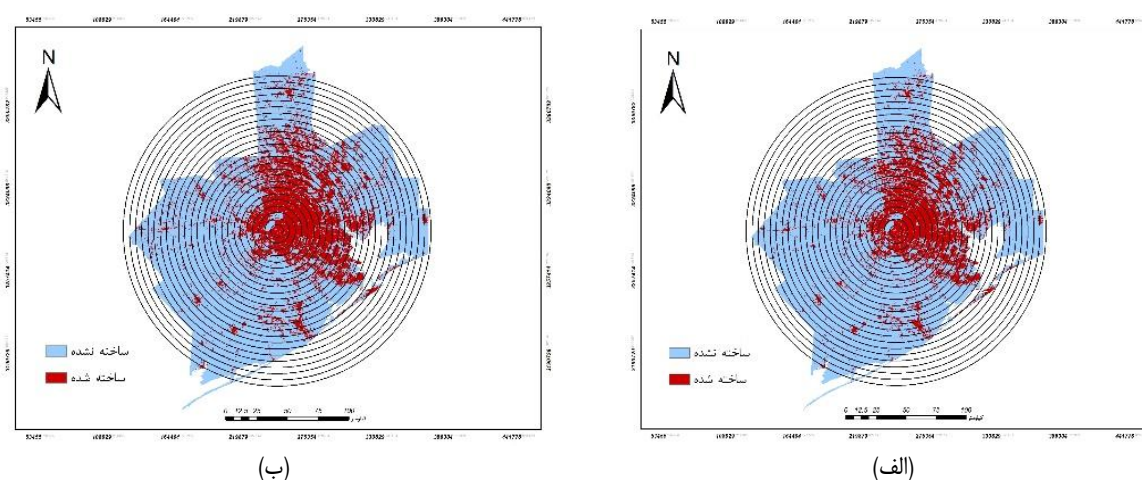
شکل ۳. نقشه پوشش اراضی سال ۲۰۲۳

جدول ۲. معیارهای ارزیابی طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای

| صحت کلی | F1-Score (آب) | F1-Score (فضاسبز) | F1-Score (مزارع) | F1-Score (ساخته شده) | F1-Score (بایر) |
|---------|---------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------|
| %۹۳/۵۶  | %۹۸/۲۱        | %۹۲/۶۴            | %۹۱/۲۹           | %۹۴/۷۳               | %۹۷/۶۴          |
| کاپا    | دقت (آب)      | دقت (فضاسبز)      | دقت (مزارع)      | دقت (ساخته شده)      | دقت (بایر)      |
| %۹۰/۰۸  | %۹۸/۴۱        | %۹۱/۳۲            | %۹۰/۷۴           | %۹۴/۱۱               | %۹۵/۸۳          |

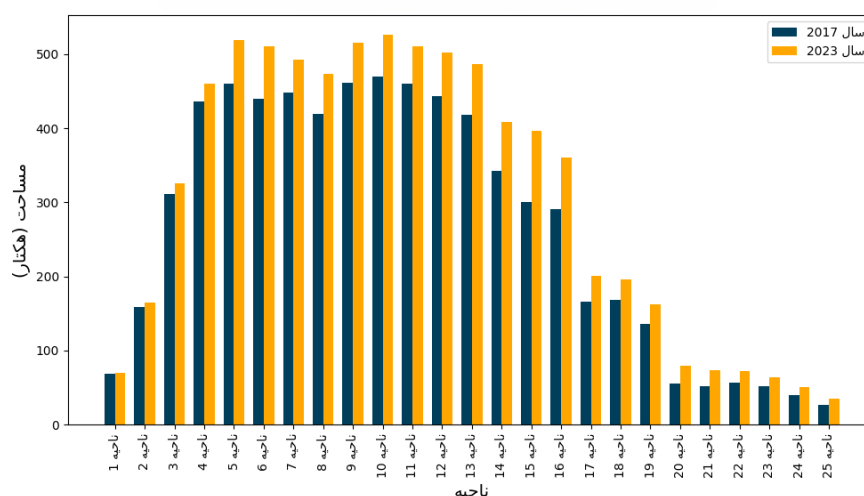
## ارزیابی گسترش افقی شهری

آنتروپی شانون جهت کمی‌سازی گسترش افقی شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. نقشه‌های LULC به دو طبقه ساخته و ساخته‌نشده باز طبقه‌بندی و با استفاده از ۲۵ بافر دایره‌شکل با فواصل ۵ کیلومتری ناحیه‌بندی مطابق شکل ۴ انجام می‌شود.



شکل ۴. نواحی تحلیل آنتروپی شانون (الف) ۲۰۱۷ و (ب) ۲۰۲۳

شکل ۵ مساحت مناطق ساخت‌وساز شده در هر یک از نواحی را برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. ناحیه ۱ بخش درونی منطقه مورد مطالعه و ناحیه ۲۵ خارجی‌ترین قسمت آن را نمایندگی می‌کنند. بر این اساس، افزایش مناطق ساخته‌شده در همه نواحی به‌ویژه نواحی خارجی‌تر قابل مشاهده است.

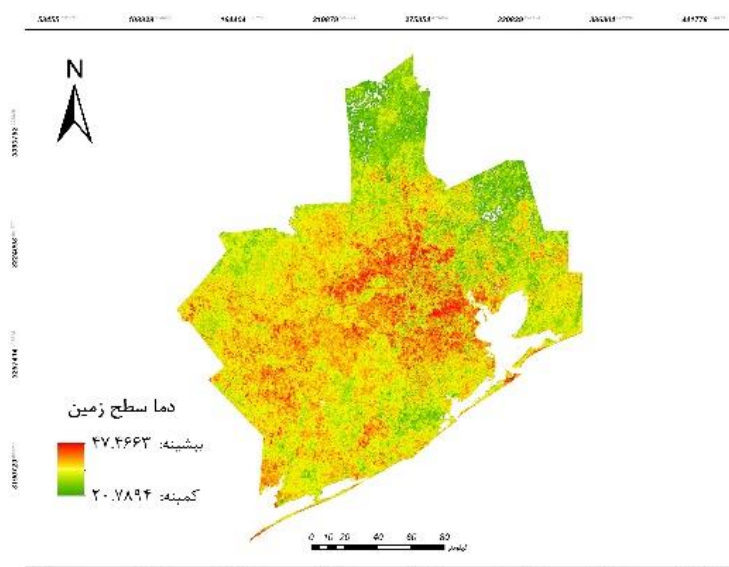


شکل ۵. مساحت مناطق ساخته شده در نواحی تحلیل آنتروپی شانون

بر اساس مساحت مناطق ساخته شده در هر یک از نواحی، میزان آنتروپی شانون نرمال شده محدوده مطالعاتی در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۲۳ به ترتیب برابر ۰/۹۲۷۱ و ۰/۹۳۱۴ بوده است.

### محاسبه دما سطح زمین

مقادیر LST برای ماه‌های خرداد و تیر سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ با استفاده از باندهای قرمز و فرو سرخ حسگر OLI و باند حرارتی حسگر TIRS ماهواره لندست ۸ مطابق روند تشریح شده در بخش روش و ابزار تحقیق محاسبه می‌شوند. شکل ۶ نقشه LST تهیه شده در سال ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نقشه دما سطح زمین در سال ۲۰۲۳

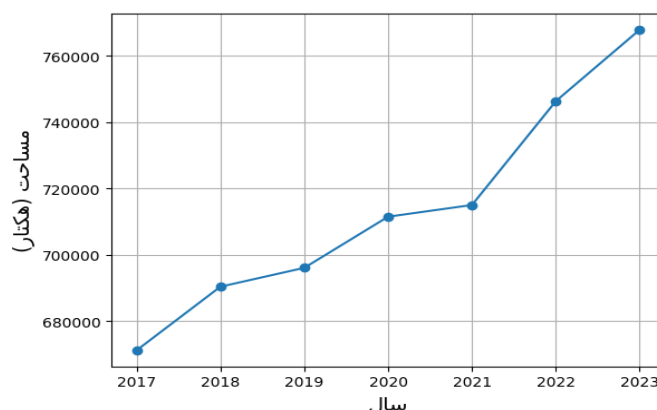
### بررسی دما در طبقات پوشش اراضی با استفاده از آزمون واریانس یک طرفه

جهت تحلیل و ارزیابی دما سطح زمین در هر یک از طبقات پوشش اراضی از نقشه‌های LULC و LST منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ استفاده می‌شود. بدین منظور، یک آزمون تحلیل واریانس یک طرفه به منظور بررسی وجود تفاوت‌های معنادار در میانگین LST بین کلاس‌های مختلف پوشش زمین انجام می‌شود. فرضیه صفر بیان می‌کند تفاوت معناداری در میانگین LST بین کلاس‌های پوشش زمین وجود ندارد؛ درحالی‌که فرضیه جایگزین ادعا می‌کند حداقل دو کلاس دارای تفاوت‌های معنادارند. آزمون آماری F برابر با ۲۹/۸۷ را نشان می‌دهد که بیانگر نسبت قابل توجهی از واریانس بین گروهی به واریانس درون گروهی است. با توجه به مقدار p برابر با  $4.48 \times 10^{-10}$ ، که بسیار پایین‌تر از سطح معناداری استاندارد ۰/۰۵ است، فرضیه صفر رد می‌شود. این نتیجه بیان می‌کند میانگین LST در بین کلاس‌های مختلف پوشش زمین، از جمله آب، فضای سبز، زمین‌های کشاورزی، مناطق ساخته شده، و مناطق بایر به طور معنادار متفاوت است. مقادیر LST در هر یک از کلاس‌های پوشش اراضی در بخش یافته‌های پژوهش مورد بحث قرار می‌گیرد.

### یافته‌های پژوهش

#### روند تغییرات پوشش اراضی ساخته شده

نقشه‌های پوشش اراضی تهیه شده روند رو به رشد توسعه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۷ بیانگر مساحت پوشش اراضی ساخته شده طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ است.



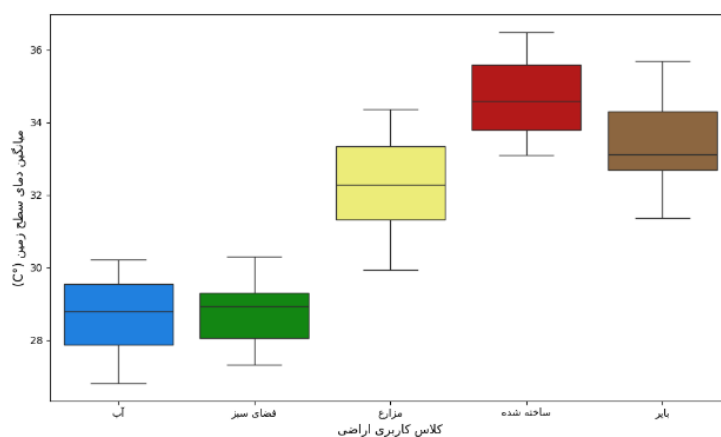
شکل ۷. روند تغییر پوشش اراضی ساخته شده

مناظر شهری منطقه مورد مطالعه طی دوره هفت ساله تغییرات قابل توجهی را تجربه کرده است. بیشترین تغییر تبدیل بیش از ۱۶۶۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی به مناطق ساخته شده است که این مقدار ۱/۸۴ درصد از کل مزارع منطقه را شامل می شود. همچنین ۱۰۷۹۳۷ هکتار (معادل ۱/۹۲٪) از فضای سبز هیوستون به اراضی ساخته شده تبدیل شده است. این تغییرات منجر به افزایش سطوح نفوذناپذیر و تهدید اکوسیستم منطقه می شود و بر تخصیص ناکارآمد فضا در مناطق توسعه یافته تأکید می کند. برجسته ترین تغییر نسبی تبدیل ۱۳/۷۱ درصد از اراضی بایر (۵۱۵۰ هکتار) به مناطق ساخته شده بوده است.

مقادیر آنتروپی شانون نرمال شده بیش از ۰/۹ پراکندگی بسیار بالای ساخت و ساز و گسترش آن در نواحی حاشیه ای شهر را نشان می دهد. بنابراین، افزایش مقدار این معیار از ۰/۹۲۷۱ به ۰/۹۳۱۴ طی بازه زمانی هفت ساله در منطقه مورد مطالعه بر گسترش افقی شهری و روند توسعه نامتوازن منطقه مورد مطالعه تأکید می کند. افزایش بیش از ۶۰ هکتاری مساحت مناطق ساخته شده در پنج ناحیه خارجی تحلیل آنتروپی شانون شاهی بر این مدعاست.

### تفاوت دما سطح زمین در طبقات پوشش اراضی

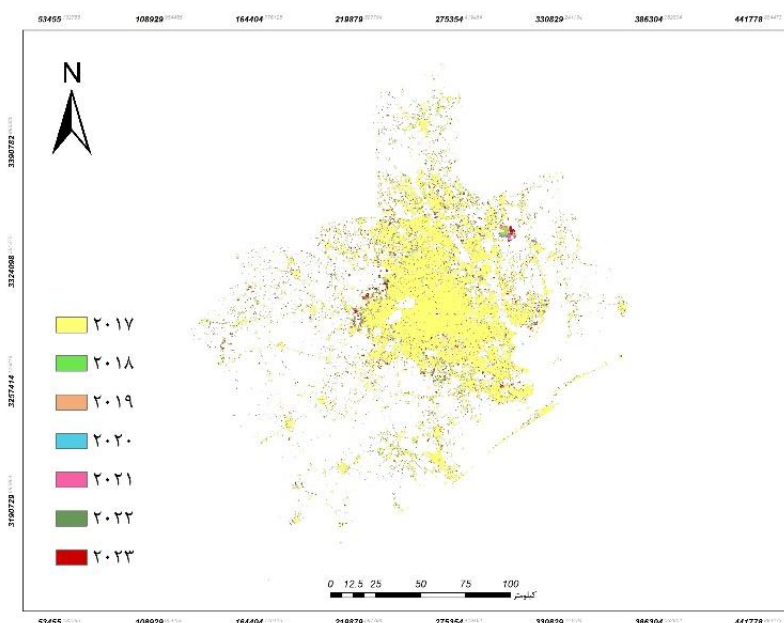
بر اساس یافته های تحلیل واریانس یک طرفه میانگین دمای سطح زمین در طبقات مختلف پوشش اراضی به طور معناداری متفاوت است. شکل ۸ نموداری جعبه ای از میانگین LST انواع مختلف پوشش زمین را ارائه می دهد. این نمودار تفاوت توزیع دما در انواع مختلف سطح را برجسته می سازد. با توجه به نمودار، مناطق شهری با بیش از ۳۴ درجه سلسیوس بالاترین میزان میانه و پهنه های آبی و فضای سبز با حدود ۲۹ درجه سلسیوس کمترین میزان آن را نشان می دهند. طبقات اراضی بایر و مزارع کشاورزی نیز مقادیر میانی را دارند. اختلاف دما در پوشش اراضی ساخته شده با سایر کلاس های پوشش زمین پدیده جزایر گرمایی شهری متأثر از افزایش ساخت و ساز را نشان می دهد.



شکل ۸. دما سطح زمین در طبقات مختلف پوشش اراضی

### تأثیر مناطق ساخته شده بر افزایش دما

شکل ۹ محدوده مناطق ساخته شده در هر یک از سال‌های بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد.



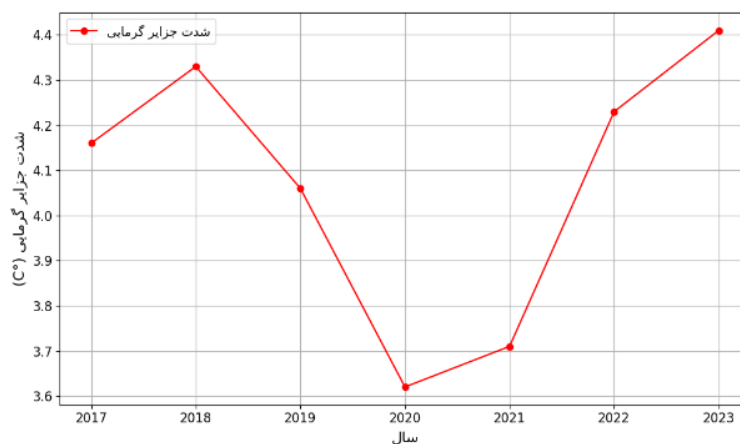
شکل ۹. محدوده ساخته شده طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳

بر این اساس، روند افزایش ساخت‌وساز به‌ویژه در نواحی پیرامونی شهر قابل مشاهده است. مطابق آنچه بیان شد، میزان آنتروپی شانون نرمال شده طی بازه زمانی مورد نظر از ۰/۹۲۷۱ به ۰/۹۳۱۴ افزایش یافته است. ساخت‌وساز نامتوازن و پراکنده به‌ویژه در مناطق حاشیه‌ای شهر سبب جایگزینی پوشش‌های طبیعی نظیر خاک و گیاهان با سطوح نفوذناپذیری همچون آسفالت و بتن می‌شود. این امر موجب تغییرات قابل توجهی در ظرفیت گرمایی زمین و بازتاب حرارتی آن می‌شود و در نتیجه مناطق ساخته شده نسبت به مناطق غیرساخته شده مجاور دمای بیشتری را جذب و ذخیره می‌کند. این تغییرات در نهایت به تقویت پدیده جزایر گرمایی منجر می‌شود. مقایسه مقدار LST نواحی با گسترش افقی در بازه زمانی مورد نظر بیانگر آن است که دما در مناطق تازه ساخته شده به طور میانگین ۳/۸۴ درجه سلسیوس افزایش داشته است. این امر نشان‌دهنده تأثیر رشد ساخت‌وساز و گسترش افقی شهری بر رشد جزایر گرمایی است و ارتباط مستقیم مقادیر آنتروپی شانون و افزایش دما سطح زمین را نشان می‌دهد.

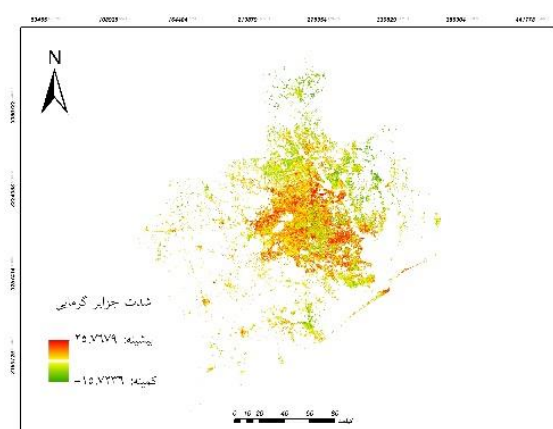
### شدت جزایر گرمایی

مطابق شکل ۱۰، معیار شدت جزایر گرمایی شهری در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ محاسبه می‌شود. بدین جهت، میانگین تفاوت مقدار LST در مناطق ساخته شده و مناطق ساخته نشده همسایه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این معیار نیز بیانگر رشد پدیده جزایر گرمایی در صورت ادامه روند ساخت‌وساز و گسترش افقی شهری است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، کاهش قابل توجهی در شدت جزایر گرمایی در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ رخ داده است. تأثیرات همه‌گیری کووید-۱۹ یکی از دلایل احتمالی این روند به شمار می‌رود. این بیماری منجر به کاهش فعالیت‌های انسانی و انتشارات صنعتی شده و در نتیجه آن شدت جزایر گرمایی کاهش یافته است. افزایش مجدد این معیار بعد از سال ۲۰۲۱ نشان‌دهنده بازگشت به پویایی گرمایش شهری پس از وقوع همه‌گیری است.

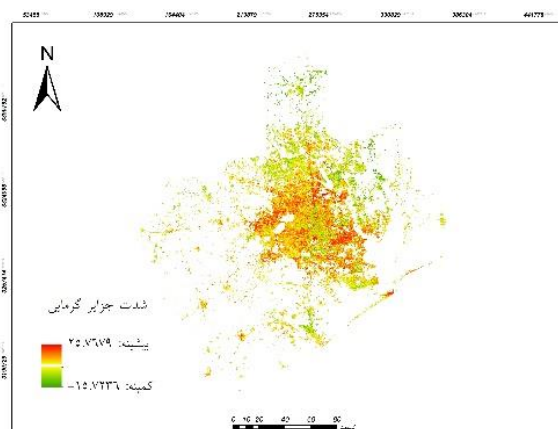
شکل ۱۱ مقادیر شدت جزایر گرمایی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. عواملی همچون حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی و تراکم ساخت‌وساز می‌تواند سبب گستردگی بازه مقادیر شدت جزایر گرمایی شود.



شکل ۱۰. میانگین شدت جزایر گرمایی



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. شدت جزایر گرمایی (الف) ۲۰۱۷ و (ب) ۲۰۲۳

## نتیجه

گسترش افقی شهری یکی از الگوهای نامنظم توسعه شهرها شناخته می‌شود و به افزایش ساخت‌وساز در نواحی حاشیه‌ای شهر و ایجاد سکونتگاه‌های پراکنده می‌انجامد. روند رو به رشد جمعیت شهرنشین و صنعتی شدن شهرها سبب رشد نواحی با گسترش افقی در سراسر جهان طی دهه‌های گذشته شده است. این پدیده پیامدهای مختلفی در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی به همراه دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به تغییر ظرفیت گرمایی زمین در اثر افزایش سطوح نفوذناپذیر، تخریب فضای سبز و مزارع جهت احداث ساختمان‌ها، و همچنین افزایش آلاینده‌های ناشی از رشد ترافیک و مراکز صنعتی اشاره کرد. این عوامل می‌توانند در تغییر دما سطح زمین تأثیرگذار باشند.

به منظور بررسی ارتباط گسترش مناطق ساخته‌شده و تغییر دما، مطالعه حاضر از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ شهر هیوستون طی ماه‌های خرداد و تیر بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ بهره می‌برد. در این زمینه، نقشه‌های پوشش اراضی محدوده مطالعاتی در پنج کلاس ساخته‌شده، بایر، پهنه آبی، فضای سبز و مزارع، با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی و با دقت ۹۴/۳۱ درصد تهیه می‌شود. همچنین نقشه‌های دما سطح زمین در خرداد و تیر همان سال‌ها از باندهای حرارتی، فروسرخ، و قرمز تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استخراج می‌شود.

مقایسه نقشه‌های حاصل تفاوت چشمگیر دما سطح زمین در مناطق ساخته‌شده با سایر طبقات پوشش اراضی را نشان می‌دهد؛ طوری که میانگین دما در اراضی ساخته‌شده محدوده مورد مطالعه طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ برابر ۳۴/۷ و در سایر پوشش‌های

اراضی برابر ۳۰/۷۸ درجه سلسیوس بوده است. تفاوت دما سطح زمین در مناطق ساخته شده و ساخته نشده بیانگر پدیده جزایر گرمایی شهری است. شدت جزایر گرمایی اختلاف دمای مناطق ساخته شده و مناطق ساخته نشده مجاور آن را نشان می دهد. بر اساس نتایج، شدت جزایر گرمایی در سال ۲۰۲۳ با ۴/۴۱ درجه سلسیوس به بیشترین مقدار خود طی بازه زمانی هفت ساله رسیده است. همچنین، دما مناطق ساخته شده طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ به طور میانگین ۳/۸۴ درجه سلسیوس افزایش داشته است. این امر افزایش مساحت و شدت جزایر حرارتی در صورت ادامه روند گسترش مناطق ساخته شده را نمایان می سازد.

رشد مساحت مناطق ساخت و ساز شده در نواحی حاشیه ای شهر هیوستون و همچنین افزایش آنتروپی شانون نرمال شده به میزان ۰/۰۰۴۳ روند رو به رشد گسترش افقی شهری در محدوده مطالعاتی را نشان می دهد. با توجه به توضیحات ارائه شده، این امر می تواند منجر به افزایش حدود و شدت جزایر گرمایی شود. افزایش دمای مناطق شهری سبب ایجاد موانع در مسیر تحقق تعدادی از اهداف برنامه توسعه پایدار ارائه شده توسط سازمان ملل متحد از جمله انرژی پاک و مقرون به صرفه، شهرها و جوامع پایدار، حفظ اقلیم، و همچنین سلامت و رفاه جامعه می شود. این امر لزوم شناخت صحیح پدیده های گسترش افقی و جزایر گرمایی شهری و همچنین برنامه ریزی و مدیریت مناسب جهت مقابله با چالش های ناشی از آن ها را برجسته می سازد.

### پیشنهاد

مطالعه حاضر به بررسی ارتباط رشد مناطق ساخته شده و گسترش افقی شهری با افزایش دما سطح زمین پرداخته است. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شود تأثیر سیاست های مدیریت شهری بر کنترل گسترش افقی و کاهش شدت جزایر حرارتی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، استفاده از مدل های پیشرفته یادگیری ماشین جهت پیش بینی دقیق تر تغییرات آبی در پوشش زمین و دمای سطح، به همراه مطالعات مقایسه ای بین مناطق مختلف با شرایط جغرافیایی و اقلیمی گوناگون، می تواند به ارائه راهکارهای جامع تر و کارآمدتر در مقابله با چالش های ناشی از این پدیده ها کمک کند. این پژوهش با تمرکز بر محاسبه دمای سطح زمین (LST) به عنوان شاخصی جامع و قابل اعتماد برای ارزیابی تغییرات دما و شدت جزایر گرمایی شهری صورت پذیرفته است. ارزیابی تأثیر متغیرهای محیطی دیگر بر تغییرات دما و شدت جزایر گرمایی می تواند به عنوان تحقیق آتی بررسی شود.

## منابع

- عموشاهی، س.؛ سلمان ماهینی، ع.؛ مرادی، ح.؛ میکائیلی تبریزی، ع. و گالان، ک. (۱۴۰۲). تحلیل اهمیت شاخص‌های توسعه پایدار شهری در ایران و مقایسه آن با شاخص‌های جهانی. *آمایش سرزمین*, ۱۵(۱), ۵۳ - ۷۱.
- Amoushahi, S., Salman Mahini, A., Moradi, H., Mikaeili Tabrizi, A., & Ghalan, K. (2023). Analysis of the Importance of Urban Sustainable Development Indicators in Iran and Comparison with Global Indicators. *Journal of "Town and Country Planning"*, 15(1), 53-71. (in Persian)
- Avdan, U. & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of sensors*, 2016(1), 1480307.
- Barman, S., Roy, D., Chandra Sarkar, B., Almohamad, H., & Abdo, H. G. (2024). Assessment of urban growth in relation to urban sprawl using landscape metrics and Shannon's entropy model in Jalpaiguri urban agglomeration, West Bengal, India. *Geocarto International*, 39(1), 2306258.
- Bendib, A., Dridi, H., & Kalla, M. I. (2017). Contribution of Landsat 8 data for the estimation of land surface temperature in Batna city, Eastern Algeria. *Geocarto International*, 32(5), 503-513.
- Biney, E. & Boakye, E. (2021). Urban sprawl and its impact on land use land cover dynamics of Sekondi-Takoradi metropolitan assembly, Ghana. *Environmental Challenges*, 4, 100168.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32.
- Carneiro, E., Lopes, W., & Espindola, G. (2021). Linking urban sprawl and surface urban heat island in the Teresina-Timon conurbation area in Brazil. *Land*, 10(5), 516.
- Concepción, E. D., Moretti, M., Altermatt, F., Nobis, M. P., & Obrist, M. K. (2015). Impacts of urbanisation on biodiversity: the role of species mobility, degree of specialisation and spatial scale. *Oikos*, 124(12), 1571-1582.
- Ding, Y., Jia, L., Wang, C., & Wang, P. (2024). Urban sprawl and its effects on water competition between building industry and residents: Evidence from 31 provinces in China. *Water-Energy Nexus*, 7, 26-38.
- Estoque, R. C. & Murayama, Y. (2015). Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological indicators*, 56, 205-217.
- Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable?. *Journal of the American planning association*, 63(1), 107-126.
- Feng, Z., Wang, X., Yuan, J., Zhang, Y., & Yu, M. (2023). Changes in air pollution, land surface temperature, and urban heat islands during the COVID-19 lockdown in three Chinese urban agglomerations. *Science of the Total Environment*, 892, 164496.
- Fu, S., Wang, L., Khalil, U., Cheema, A. H., Ullah, I., Aslam, B., Tariq, A., Aslam, M., & Alarifi, S. S. (2024). Prediction of surface urban heat island based on predicted consequences of urban sprawl using deep learning: A way forward for a sustainable environment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 135, 103682.
- Hajilou, M., Meshkini, A., Mirehei, M., & Ghaedrahmati, S. (2023). Urban sprawl: Do its financial and economic benefits outweigh its costs for local governments?. *GeoJournal*, 88(2), 2325-2343.
- Hanif, I. (2018). Impact of fossil fuels energy consumption, energy policies, and urban sprawl on carbon emissions in East Asia and the Pacific: A panel investigation. *Energy strategy reviews*, 21, 16-24.
- Hislop, S., Jones, S., Soto-Berelov, M., Skidmore, A., Haywood, A., & Nguyen, T. H. (2018). Using landsat spectral indices in time-series to assess wildfire disturbance and recovery. *Remote Sensing*, 10(3), 460.
- Jat, M. K., Garg, P. K., & Khare, D. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International journal of Applied earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 26-43.
- Kamboj, S. & Ali, S. (2021). Urban sprawl of Kota city: A case study of urban heat island linked with electric consumption. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5304-5314.
- Kim, S. W. & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 779, 146389.
- Kim, T. K. (2017). Understanding one-way ANOVA using conceptual figures. *Korean journal of anesthesiology*, 70(1), 22-26.
- Ma, X. & Peng, S. (2021). Assessing the quantitative relationships between the impervious surface area and surface heat island effect during urban expansion. *PeerJ*, 9, e11854.
- Nechyba, T. J. & Walsh, R. P. (2002). Urban sprawl. *Journal of economic perspectives*, 18 (4), 177-200.
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban heat island: causes, effects and mitigation measures-a review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67-73.
- Powers, D. M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *arXiv preprint arXiv:2010.16061*.

- Rana, B., Bandyopadhyay, J., & Halder, B. (2024). Investigating the relationship between urban sprawl and urban heat island using remote sensing and machine learning approaches. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(5), 4161-4188.
- Rodríguez, M. C., Dupont-Courtade, L., & Oueslati, W. (2016). Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1-9.
- Shao, Z., Sumari, N. S., Portnov, A., Ujoh, F., Musakwa, W., & Mandela, P. J. (2021). Urban sprawl and its impact on sustainable urban development: a combination of remote sensing and social media data. *Geo-Spatial Information Science*, 24(2), 241-255.
- Singh, R. & Kalota, D. (2019). Urban sprawl and its impact on generation of urban heat island: A case study of Ludhiana city. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(9), 1567-1576.
- Syarif, I., Prugel-Bennett, A., & Wills, G. (2016). SVM parameter optimization using grid search and genetic algorithm to improve classification performance. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 14(4), 1502-1509.
- Tatsumi, K., Yamashiki, Y., Torres, M. A. C., & Taïpe, C. L. R. (2015). Crop classification of upland fields using Random forest of time-series Landsat 7 ETM+ data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 171-179.
- Youssef, A. (1999). Image downsampling and upsampling methods. *National Institute of Standards and Technology*.