

دو فصلنامه علمی نشریه پژوهش های سنجش از دور و اطلاعات مکانی



دوره ۲، شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۳

نشریه پژوهش های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۲ شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۳

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research



Volume 2, Issue 2, Summer & Autumn 2024

نشریه علمی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۲، شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۳

صاحب امتیاز: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
مدیر مسئول: دکتر علیرضا شریفی
سر دبیر: پروفسور موسی مظلوم
مدیر اجرایی: دکتر فرهاد حسینعلی
ویراستار فارسی: سید سینا امیرآزاد
ویراستار انگلیسی: وحیده خدادادی
مدیر داخلی و مدیر پایگاه: انسیه باغبانی

هیأت تحریریه:

پروفسور عباس علیمحمدی
پروفسور جلال امینی
پروفسور محمد شمس اسفندآبادی
پروفسور موسی محمودی صاحبی
پروفسور اسماعیل ضرغامی
دکتر سعید صادقیان
دکتر محمد شریفی کیا
دکتر علیرضا وفائی نژاد

دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

لایتنوگرافی و چاپ: دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

ناشر: انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

طرح جلد: محمد معتمدی نژاد

صفحه آرا: نیره فیروزی

نشانی: تهران - لویزان - خیابان شهید شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

صندوق پستی: ۱۶۷۸۵-۱۶۳ کد پستی: ۱۶۷۸۸-۱۵۸۱۱

تلفن: ۲۲۹۷۰۰۶۰-۹ داخلی ۲۵۹۸ فکس: ۲۲۹۷۰۰۷۰

وب سایت: www.sru.ac.ir

وب سایت اختصاصی: <http://jrsg.sru.ac.ir>

پست الکترونیکی: jrsg@ sru.ac.ir

نشریه پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی با صاحب امتیازی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی بر اساس آیین‌نامه نشریات علمی مصوب ۱۳۹۸/۰۲/۰۹ در ارزیابی سال ۱۴۰۲، موفق به کسب رتبه (ب) شده است.

نشریه علمی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی

دوره ۲، شماره ۲، تابستان و پاییز ۱۴۰۳

۱۷۹-۱۸۶	برآوردی از تنافر قائم‌های ژئوئیدی و تاثیر آن بر تصحیح تبدیل به افق طول‌های مایل مسعود شیرازیان، فرزاد حاج محمود عطار
۱۸۷-۲۰۴	تحلیل سیستمی محموله لیدار فضایی ماهواره‌های سنجشی با تاکید بر اثر پارامترهای محیطی در طراحی و بهره برداری مسعود خوش‌سیما، سجاد غضنفری‌نیا، راضیه نریمانی
۲۰۵-۲۱۸	ارزیابی تغییرات دمای سطحی در شهرستان ایلام با رویکردی ترکیبی به مدل‌های زمین‌آماری و سامانه‌های اطلاعات مکانی علیرضا وفایی‌نژاد، فرشاد همتی، ثنا حایری
۲۱۹-۲۳۲	توسعه‌ی یک سامانه‌ی پشتیبان تصمیم به منظور بهینه‌سازی تخصیص کاربری زمین با استفاده از الگوریتم مورچگان (مورد مطالعه: منطقه‌ی ۷ شهرداری اصفهان) علیرضا صاحبقرانی
۲۳۳-۲۴۶	نقشه‌برداری نوع محصول در مقیاس بزرگ با استفاده از تصاویر چندزمانی سنتینل-۲ با مدل Attention U-Net-Vit جدید مجید حیدری قولانلو، رضا جوانمرد علی‌تپه، عبادت قنبری پرمهر
۲۴۷-۲۶۴	سنجش رادیویی و توموگرافی یون‌سپهر توسط سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) سحر برزگر، مسعود خوش‌سیما
۲۶۵-۲۷۶	آشکارسازی ساختمان‌های با پوشش خاص در محیط شهری با استفاده از فناوری سنجش از دور فراطیفی داود اکبری، محمد اکبری
۲۷۷-۲۹۲	تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از تصاویر هوایی و یادگیری عمیق مبتنی بر U-Net معماری مهدی فرهنگی، اصغر میلان، سعید صادقیان
۲۹۳-۳۰۶	ارائه مدل امضای طیفی زمانی به منظور شناسایی و تفکیک گونه‌های مختلف گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پارسا افضل‌ی کردمحله، سعید بهزادی

۳۰۷-۳۲۰	مقایسه استخراج نقاط نمای ساختمان‌های شهری از ابر نقاط لیزراسکنر همراه و تصویربرداری پهپاد مرتضی حیدری مظفر، سید عادل حسینی
۳۲۱-۳۳۴	ارزیابی تاثیر ساخت و ساز در مناطق شهری بر آلودگی هوا در لایه تروپوسفر با استفاده از داده های سنجش از دور امیرشاهرخ امینی، زهرا آذرگشایش، پانید نوری
۳۳۵-۳۴۳	تشخیص جاده‌های فرعی در زمین‌های خاکی و مناطق پوشش گیاهی مبتنی بر روش یادگیری عمیق امیرحسین غلامیان، فاطمه طبیب محمودی



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Estimating Geoidal Vertical Skewness and its effect on the reduction of the slope distances to the horizontal ones

M. Shirazian*, F. Hajmahmoudattar

Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 03 February 2024
 Reviewed: 08 April 2024
 Revised: 10 June 2024
 Accepted: 15 August 2024

KEYWORDS:

Vertical Skewness
 Occurrence of Refraction
 Topocentric Coordinate System
 Geocentric Coordinate System

* Corresponding author

✉ m.shirazian@sru.ac.ir

☎ (+98910) 9261989

Background and Objectives: Vertical Skewness is a prevalent anomaly in the field of geodetic science, which arises due to the displacement of the vertical component on the geoid at various locations. This discrepancy directly impacts both horizontal and vertical angles that are observed, and indirectly influences measurements of lengths. When considering the adjustment of length conversions to the horizon, this phenomenon is adequately represented by vertical angles. Consequently, vertical angles assume a significant role in ameliorating the effects of geoid updrafts and ensuring the precision of length determinations.

The occurrence of refraction exerts a substantial influence on observations of angles. This impact, particularly on the vertical angle, possesses a considerable magnitude that gives rise to a substantial discrepancy when adjusting the transformation of lengths to the horizon. A prevalent approach employed to mitigate the influence of refraction involves the simultaneous measurement of vertical angles in both directions at two distinct endpoints of equivalent distances.

Methods: There exist two primary categories of coordinate system commonly employed to express the positions of points in geodesy. These categories are known as the geocentric coordinate system, which centers on the Earth, and the topocentric coordinate system, which also centers on the Earth. In the geocentric coordinate system, the origin of the coordinates coincides with the Earth's center of gravity, and the z-axis is defined in alignment with the Earth's epoch axis. On the other hand, in the topocentric coordinate system, the origin of the coordinates corresponds to a specific point on the Earth's surface, namely the location of the camera. Furthermore, the z-axis in this coordinate system corresponds to the surface of the parallel potential passing over the aforementioned point where the camera is situated, also known as the line of work passing over the point.

Geodetic measurements of both horizontal and vertical angles are conducted within topocentric coordinate systems. As indicated, the prevailing technique for mitigating the impact of refraction on vertical angles involves simultaneously reading said angles from both the initial and terminal positions along the lengths. Given that the starting and ending points of the lengths exhibit dissimilar vertical extensions on the potential surface, the measurement of the vertical angle, and consequently the correction of the length's conversion to the horizon, are subjected to a significant degree of error.

Findings: The current investigation comprehensively examines this error and its consequential impacts on the horizontal spacing of points within small-scale geodesic networks. To achieve this objective, four specific regions in Sweden characterized by accurate geoids were meticulously chosen, and an elliptical procedure was implemented on the geoid of these regions to determine the parameters of the geoid surface. Furthermore, the geoid surface was computed.

Conclusion: The findings of this investigation demonstrate that the significance of the skewness of geoid gauges is evident even in geodetic networks of small-scales, and should not be disregarded. It is important to consider that the assessment of the magnitude of the skewness effect of geoid perpendiculars is only feasible in areas where a precise geoid is present. Consequently, it becomes unfeasible to entirely eliminate this effect when observing vertical angles simultaneously in areas lacking accurate geoids. Consequently, an alternative approach must be employed to rectify the conversion to the mile-long horizon. Further examination of this alternative method is presented in subsequent sections of this scholarly article.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

1



NUMBER OF TABLES

3

مقاله پژوهشی

برآوردی از تنافر قائم‌های ژئوئیدی و تاثیر آن بر تصحیح تبدیل به افق طول‌های مایل

مسعود شیرازیان^{*}، فرزاد حاج محمود عطار

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: تنافر قائم‌های ژئوئیدی (Vertical Skewness) یکی از خطاهای رایج در علم ژئودزی است که در اثر ناموازی بودن قائم‌ها بر ژئوئید در نقاط مختلف مشاهده می‌شود. این خطا تأثیر مستقیم بر زوایای افقی و قائم مشاهده شده دارد و به طور غیر مستقیم بر مشاهدات طول تأثیر گذار است. در زمینه تصحیح تبدیل به افق طول، این اثر به اندازه کافی توسط زاویه‌های قائم نشان داده می‌شود. بنابراین، صحت زاویه‌های قائم نقش مهمی در کاهش اثرات تنافر قائم‌های ژئوئیدی و اطمینان از دقت اندازه‌گیری‌های طول دارند.

پدیده انکسار تأثیر قابل توجهی بر مشاهدات زاویه دارد. این تأثیر، به خصوص بر زاویه قائم دارای مقدار زیادی است که هنگام تصحیح تبدیل به افق طول‌های مایل، خطای بزرگی ایجاد می‌کند. روش رایج کنونی جهت حذف اثر انکسار قائم، مشاهده هم‌زمان دوطرفه زاویه قائم در دو سر یک طول است.

روش‌ها: به طور کلی دو نوع سیستم مختصات برای بیان موقعیت نقاط در ژئودزی وجود دارد. سیستم مختصات ژئوسنتریک (مبدأ در مرکز ثقل زمین) و سیستم مختصات توپوسنتریک (مبدأ نقطه‌ای بر سطح زمین). در سیستم مختصات ژئوسنتریک، مبدا مختصات منطبق بر مرکز ثقل زمین است و محور Zها منطبق بر محور دوران زمین تعریف می‌شود. در سیستم مختصات توپوسنتریک، مبدا مختصات منطبق بر نقطه‌ای بر سطح زمین (محل استقرار دوربین) و محور Zها منطبق بر قائم بر سطح هم پتانسیل گذرنده بر نقطه محل استقرار دوربین (خط شاغولی گذرنده بر نقطه) می‌باشد.

اندازه‌گیری‌های ژئودتیک زوایای افقی و قائم در سیستم‌های مختصات توپوسنتریک انجام می‌پذیرد. طبق آنچه گفته شد، روش رایج جهت حذف اثر انکسار بر زوایای قائم، قرائت هم‌زمان زوایای قائم از ابتدا و انتهای طول‌ها است. از آنجا که مبدا اندازه‌گیری زاویه قائم، امتداد قائم بر سطح هم پتانسیل در نقطه استقرار است و این امتداد در ابتدا و انتهای طول متفاوت است، خطایی بزرگ بر مشاهده زاویه قائم و در نتیجه بر تصحیح تبدیل به افق طول‌ها تحمیل می‌نماید.

یافته‌ها: مطالعه حاضر به بررسی کامل این خطا و اثرات ناشی از آن بر فاصله افقی بین نقاط در شبکه‌های ژئودتیک در مقیاس کوچک پرداخته است. برای این منظور، چهار منطقه مجزا در کشور سوئد که دارای ژئوئیدهای دقیق بودند با دقت انتخاب شدند و بر روی ژئوئید این مناطق یک رویه بیضوی برازنده ایم و پارامترهای سطح ژئوئید را محاسبه کردیم. مقادیر محاسبه شده تنافر قائم‌های ژئوئیدی در مناطق فوق برای طول‌های بین ۸۰۰ متر تا ۵۲۰۰ متر چیزی بین ۲۷" تا حدود ۳° به دست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تنافر قائم‌های ژئوئیدی حتی در شبکه‌های ژئودتیک در مقیاس کوچک دارای مقدار قابل توجهی است و بنابراین نمی‌توان آن را نادیده گرفت. با توجه به این واقعیت که برآورد میزان اثر تنافر قائم‌های ژئوئیدی صرفاً در مناطقی که یک ژئوئید دقیق وجود دارد امکان پذیر است، بنابراین حذف کامل این اثر بر مشاهدات زاویه‌های قائم که به‌طور هم‌زمان در مناطقی فاقد ژئوئیدهای دقیق ثبت شده‌اند، غیرممکن است. در نتیجه باید یک روش جایگزین در نظر گرفته شود تا تبدیل به افق طول مایل را اصلاح کند. این رویکرد جایگزین در بخش‌های بعدی این مقاله با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است.

تاریخ دریافت: ۱۴ بهمن ۱۴۰۲
تاریخ داوری: ۲۰ فروردین ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۱ خرداد ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

تنافر قائم‌های ژئوئیدی
پدیده انکسار
سیستم مختصات توپوسنتریک
سیستم مختصات ژئوسنتریک

^{*} نویسنده مسئول

m.shirazian@sru.ac.ir

۰۹۱۰-۹۲۶۱۹۸۹ ①

مقدمه

در دنیای علم ژئودزی و نقشه‌برداری، دقت و اعتماد به نتایج محاسبات بسیار اهمیت دارد. یکی از مواردی که بر دقت محاسبات ژئودتیک تأثیر می‌گذارد، تصحیحات تبدیل طول مایل به طول افقی است. این تصحیحات به تعیین فواصل افقی صحیح کمک می‌کنند. به عبارت دیگر، طول مایل نمایانگر فاصله سه‌بعدی میان دو نقطه است و برای انتقال این فاصله به سیستم دو بعدی نیاز به تبدیل آن به طول افقی داریم. این مسئله در زمینه‌های مختلف از جمله علم ژئودزی، مهندسی معدن و نقشه‌برداری زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۱۰].

همچنین مسئله مهم دیگر این است که در شبکه‌های ژئودزی محلی که امتداد قائم، امتداد شاغولی یا همان امتداد عمود بر سطح هم پتانسیل محل است متناسب با میزان فاصله میان دو نقطه تغییر می‌کند. این بدان معناست که خطوط شاغولی مانند خطوط قائم بر بیضوی، متناظر هستند و نمی‌توان حتی در فواصل کم این خطوط شاغولی را موازی با هم فرض کرد [۲، ۱۲].

هدف اصلی این تحقیق، بررسی خطای تناظر قائم‌های ژئوئیدی و اثر آن بر تصحیح تبدیل به افق طول‌های مایل است. برای محاسبه اثر هندسی و اثر انحراف زاویه قائم‌ها بر طول مایل نیازمند داشتن یک سطح ژئوئید دقیق هستیم که در ادامه مقاله به تفصیل به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

در تحقیقات اخیر، باقربندی و همکاران [۳] به بررسی تأثیرات فیزیکی و هندسی بر مشاهدات ژئودزی کلاسیک در شبکه‌های کنترل کوچک مقیاس پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که تأثیر تناظر قائم‌ها بر فواصل شیب‌دار حتی در شبکه‌های ژئودزی کوچک مقیاس به طور قابل توجهی مشهود است. از نظر علمی و کاربردی، اهمیت دارد که این تأثیرات را جدی بگیریم و تصحیحات مربوطه را اعمال کنیم.

خواننده‌ی محترم این اثر باید توجه نماید که محاسبه این تأثیرات، نیازمند وجود ژئوئید دقیق در منطقه است. به همین دلیل برآوردی از مقادیر این تأثیرات در نشریات علمی گذشته به چشم نمی‌خورد. در واقع این مقادیر برای بار نخست در کار باقربندی و همکاران [۳] محاسبه شده و با توجه به اهمیت موضوع، نگارندگان بر آن شدند که این موضوع مهم در دسترس خوانندگان فارسی زبان نیز قرار گیرد.

روش تحقیق

روش‌شناسی مورد استفاده در این تحقیق برای بررسی تأثیر تناظر زاویه قائم بر تصحیح تبدیل به افق طول‌ها می‌باشد. در این بخش تأثیرات فیزیکی و هندسی ناشی از زاویه تناظر قائم‌ها بر طول‌های افق را بررسی

می‌کنیم. فرمول زیر، فرمول تبدیل طول مایل به طول افقی می‌باشد [۴].

$$HD = SD \cos(90 - Z) = SD \sin Z \quad (۱)$$

در این معادله، HD طول مایل، SD طول مایل و Z زاویه زینتی (سمت الراسی) است. این معادله زمانی فاصله افقی را به صورت دقیق به دست می‌آورد که امتداد زینت محل بر امتداد قائم بر بیضوی منطبق باشد که با توجه به مباحث گفته شده این دو امتداد با هم تفاوت دارند پس در رابطه‌ای دقیق‌تر باید این تفاوت در زاویه را به محاسبات خود اضافه کنیم تا بتوانیم میزان تأثیر خطای زاویه قائم بر تصحیح تبدیل به افق طول‌ها را محاسبه نماییم [۷].

$$\delta_{HD} = SD \sin(Z + \delta_{Z_p}) - SD \sin(Z) \quad (۲)$$

در معادله شماره δ_{HD} تأثیر زاویه انحراف قائم بر طول افقی است و δ_{Z_p} زاویه انحراف قائم است [۶].

زاویه انحراف قائم خطای فیزیکی بر زاویه قائم اعمال می‌کند [۳]. تأثیر فیزیکی را Deflection of Vertical یا به صورت اختصاری DOV می‌نامند که در مقاله [۱] به تفصیل به آن پرداخته شده است. در این تحقیق هدف بررسی تأثیرات زاویه انحراف قائم بر تصحیح تبدیل به افق طول‌ها است.

مهندسی نقشه بردار برای حذف اثر هندسی مشاهدات مانند شکست نور، به صورت دوطرفه نقشه برداری می‌کنند. بدین صورت که وقتی در نقطه a ایستگاه زده‌اند و به نقطه b نشانه روی می‌کنند همین مشاهدات را برعکس نیز انجام می‌دهند (از نقطه b به نقطه a) و با فرض اینکه قائم بر ژئوئید در این دو نقطه موازی هستند، اثرات خطا را تعدیل می‌کنند؛ اما در عمل امتداد قائم بر ژئوئید در نقاط مختلف موازی هم نیستند. در ادامه به بررسی زاویه تناظر قائم‌ها بر ژئوئید و اثر آن بر مشاهدات می‌پردازیم [۸].

برای بررسی اثر هندسی تناظر قائم‌های ژئوئیدی بر تصحیح تبدیل به افق طول‌ها که با نام خمیدگی یا Curvature-Skewness شناخته شده است به یک سطح ژئوئید دقیق نیازمندیم که این موضوع یکی از بزرگترین محدودیت‌های این تحقیق است. بنابراین در این تحقیق، چهار منطقه از کشور سوئد (مطابق جدول ۱ و شکل شماره ۱) که سطح ژئوئید دقیقی دارند را انتخاب کردیم [۹، ۱۰].

برای بررسی سطح ژئوئیدی، یک رویه بیضوی سه محوری بر هر یک از چهار منطقه مورد مطالعه فیت کردیم.

جدول ۱: پارامترهای (نیم قطره‌ای) محورهای بیضوی های فیت شده در ۴ منطقه مطالعاتی سوئد

Table 1: Semi-major axes of the ellipsoids fitted to the four areas of study in Sweden

Area	a	b	c
Kebnekaise	6378079.181	6377108.551	6356815.258
Umeå	6377953.394	6376673.306	6356860.952
Skövde	6378384.921	6377859.304	6356711.342
Mårtsbo	6378232.578	6377126.821	6356784.871



شکل ۱: مناطق مورد مطالعه در کشور سوئد (مثلث های قرمز رنگ; برگرفته از <http://www.maps-of-europe.net/maps-of-sweden>)

Fig. 1: Study areas in Sweden (red triangles) taken from <http://www.maps-of-europe.net/maps-of-sweden>

بنابراین بر اساس پارامترهای جدول شماره یک و معادله شماره ۳ ما رویه ای سه بعدی بر ژئوئید مناطق مورد مطالعه فیت کردیم. با استفاده از معادله شماره ۴ قائم بر بیضوی در نقطه $R = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$ بدست می آید [۱۳].

معادله شماره ۳ معادله بیضوی سه محوری است [۱۲، ۱۱].

$$f(x, y, z) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0 \quad (۳)$$

یافته‌ها

همان‌طور که در بالا اشاره شد ابتدا نیازمند برازاندن رویه سبده‌ی بر ژئوئید مناطق مورد مطالعه هستیم. در جدول شماره ۲ اطلاعات ژئوئید که از طریق مدل SWEN17 محاسبه شده، در هر چهار منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

اکنون با استفاده از رویه سبده‌ی برازنده شده بر ژئوئید، می‌توان با استفاده از معادلات شماره چهار و پنج، زاویه بین امتدادهای قائم بر ژئوئید در نقاط ابتدا و انتهای طول بازهای مختلف به دست آمده است. جدول شماره ۳ بیانگر نتایج به دست آمده در منطقه در چهار منطقه مورد مطالعه است.

$$\vec{X} = \vec{\nabla} f(x_0, y_0, z_0) = \left(\frac{2x}{a^2} \frac{2y}{b^2} \frac{2z}{c^2} \right) \Big|_{x_0, y_0, z_0} \quad (4)$$

معادله شماره ۵ فرمول به دست آوردن زاویه تنافر قائم‌های ژئوئیدی است [۱۵، ۱۴].

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{x}_1 \cdot \vec{x}_2}{\|\vec{x}_1\| \cdot \|\vec{x}_2\|} \right) \quad (5)$$

جدول ۲: ژئوئید محاسبه شده برای نقاط شبکه در مناطق آزمایش با استفاده از مدل SWEN17

Table 2: Computed Geoid for the grid-points of the study areas from SWEN17 model

Kebnekaise			Umeå			Skövde			Mårtsbo		
φ°	λ°	N(m)	φ°	λ°	N(m)	φ°	λ°	N(m)	φ°	λ°	N(m)
67.96	18.56	32.433	63.71	19.74	22.859	57.98	14.46	31.631	60.62514	17.21853	24.827
67.96	18.58	32.409	63.71	19.76	22.803	57.98	14.48	31.610	60.62514	17.23852	24.773
67.96	18.60	32.376	63.71	19.78	22.746	57.98	14.50	31.590	60.62514	17.25852	24.719
67.96	18.62	32.340	63.71	19.80	22.687	57.98	14.52	31.568	60.62514	17.27852	24.665
67.96	18.64	32.305	63.71	19.82	22.634	57.98	14.54	31.547	60.62514	17.29852	24.609
67.95	18.56	32.421	63.70	19.74	22.798	57.97	14.46	31.676	60.61514	17.21853	24.820
67.95	18.58	32.389	63.70	19.76	22.744	57.97	14.48	31.653	60.61514	17.23852	24.767
67.95	18.60	32.361	63.70	19.78	22.684	57.97	14.50	31.631	60.61514	17.25852	24.714
67.95	18.62	32.335	63.70	19.80	22.629	57.97	14.52	31.608	60.61514	17.27852	24.659
67.95	18.64	32.298	63.70	19.82	22.576	57.97	14.54	31.586	60.61514	17.29852	24.604
67.94	18.56	32.396	63.69	19.74	22.738	57.96	14.46	31.719	60.60514	17.21853	24.814
67.94	18.58	32.377	63.69	19.76	22.681	57.96	14.48	31.698	60.60514	17.23852	24.760
67.94	18.60	32.355	63.69	19.78	22.623	57.96	14.50	31.672	60.60514	17.25852	24.706
67.94	18.62	32.326	63.69	19.80	22.570	57.96	14.52	31.647	60.60514	17.27852	24.653
67.94	18.64	32.282	63.69	19.82	22.517	57.96	14.54	31.623	60.60514	17.29852	24.600
67.93	18.56	32.375	63.68	19.74	22.678	57.95	14.46	31.764	60.59514	17.21853	24.807
67.93	18.58	32.363	63.68	19.76	22.620	57.95	14.48	31.742	60.59514	17.23852	24.754
67.93	18.60	32.339	63.68	19.78	22.563	57.95	14.50	31.714	60.59514	17.25852	24.702
67.93	18.62	32.310	63.68	19.80	22.508	57.95	14.52	31.684	60.59514	17.27852	24.648
67.93	18.64	32.256	63.68	19.82	22.454	57.95	14.54	31.659	60.59514	17.29852	24.597
67.92	18.56	32.335	63.67	19.74	22.617	57.94	14.46	31.807	60.58514	17.21853	24.801
67.92	18.58	32.307	63.67	19.76	22.559	57.94	14.48	31.780	60.58514	17.23852	24.749
67.92	18.60	32.286	63.67	19.78	22.501	57.94	14.50	31.750	60.58514	17.25852	24.697
67.92	18.62	32.263	63.67	19.80	22.445	57.94	14.52	31.722	60.58514	17.27852	24.644
67.92	18.64	32.227	63.67	19.82	22.392	57.94	14.54	31.697	60.58514	17.29852	24.593
67.91	18.56	32.295	63.66	19.74	22.555	57.93	14.46	31.849	60.57514	17.21853	24.795
67.91	18.58	32.264	63.66	19.76	22.497	57.93	14.48	31.818	60.57514	17.23852	24.743
67.91	18.60	32.230	63.66	19.78	22.440	57.93	14.50	31.788	60.57514	17.25852	24.693
67.91	18.62	32.207	63.66	19.80	22.383	57.93	14.52	31.760	60.57514	17.27852	24.642
67.91	18.64	32.181	63.66	19.82	22.330	57.93	14.54	31.737	60.57514	17.29852	24.593
67.90	18.56	32.231	63.65	19.74	22.494	57.92	14.46	31.892	60.56514	17.21853	24.792
67.90	18.58	32.206	63.65	19.76	22.436	57.92	14.48	31.858	60.56514	17.23852	24.740
67.90	18.60	32.172	63.65	19.78	22.379	57.92	14.50	31.831	60.56514	17.25852	24.691
67.90	18.62	32.137	63.65	19.80	22.322	57.92	14.52	31.799	60.56514	17.27852	24.641
67.90	18.64	32.115	63.65	19.82	22.269	57.98	14.43	31.659	60.56514	17.29852	24.592

جدول ۳: زاویه تنافر قائم های ژئوئیدی در مناطق مورد مطالعه

Table 3: Vertical skewness angles in the study areas

Kebnekaise		Umeå		Skövde		Mårtsbo	
Baseline length (m)	Vertical skewness (d°, m', s")	Baseline length (m)	Vertical skewness (d°, m', s")	Baseline length (m)	Vertical skewness (d°, m', s")	Baseline length (m)	Vertical skewness (d°, m', s")
0837.88	0, 0, 27.03	0988.77	0, 0, 31.90	1113.78	0, 0, 36.00	1094.34	0, 0, 35.31
1115.36	0, 0, 36.00	1490.18	0, 0, 48.11	1625.16	0, 0, 52.48	1561.87	0, 0, 50.43
1675.76	0, 0, 54.05	1977.54	0, 1, 03.81	2227.55	0, 1, 12.00	2189.22	0, 1, 10.64
2013.30	0, 1, 04.96	2439.03	0, 1, 18.77	2522.50	0, 1, 21.50	2482.81	0, 1, 20.20
2513.64	0, 1, 21.08	2980.59	0, 1, 36.23	3250.56	0, 1, 44.97	3124.37	0, 1, 40.89
2790.46	0, 1, 30.06	3487.45	0, 1, 52.63	3544.84	0, 1, 54.55	3517.42	0, 1, 53.64
3346.07	0, 1, 48.01	3955.07	0, 2, 07.61	4095.14	0, 2, 12.29	3996.34	0, 2, 09.08
3532.92	0, 1, 53.97	4541.38	0, 2, 26.58	4455.10	0, 2, 23.99	4519.17	0, 2, 25.84
4027.21	0, 2, 09.94	5181.00	0, 2, 47.26	5045.31	0, 2, 43.01	4589.46	0, 2, 28.28
4539.55	0, 2, 26.53					4966.16	0, 2, 40.42
5121.86	0, 2, 45.31						

تعارض منافع

«هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع

- [1] Shirazian, Masoud, Mohammad Bagherbandi, and Hamed Karimi. "Network-aided reduction of slope distances in small-scale geodetic control networks." *Journal of Surveying Engineering* 147.4 (2021): 04021024.
- [2] Ågren, Jonas, et al. "Noggrann höjdbestämning med den nya nationella geoidmodellen SWEN17_RH2000." *Swedish. In Proc., Conf. on Kartdagarna. Gävle, Sweden: Lantmäteriet.* 2018.
- [3] Bagherbandi, Mohammad, et al. "Physical and geometric effects on the classical geodetic observations in small-scale control networks." *Journal of Surveying Engineering* 149.1 (2023): 04022014.
- [4] Ashkenazi, V., and P. D. Howard. "An empirical method for refraction modelling in trigonometrical heighting." *Survey Review* 27.213 (1984): 311-322.
- [5] Bell B. The use and calibration of the Kern ME5000 Mekometer: Proceedings. Stanford Linear Accelerator Center, Menlo Park, CA (United States); 1992 Sep 1.
- [6] Hooijberg, Maarten. *Geometrical geodesy*. Springer, Berlin, 2008.
- [7] Kurylev Y, Lassas M, Uhlmann G. Rigidity of broken geodesic flow and inverse problems. *American journal of mathematics*. 2010;132(2):529-62.
- [8] Brunner FK. *Geodetic refraction*. Berlin: Shringer. 1984;216.
- [9] Dodson, A. H., and M. Zaher. "Refraction effects on vertical angle measurements." *Survey Review* 28.217 (1985): 169-183.

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده به ما نشان می دهد این تصور که امتدادهای قائم بر ژئوئید را می توان موازی فرض کرد نادرست است. تنافر این قائم ها اثر قابل توجهی بر مشاهدات زاویه قائم و در نتیجه بر تصحیح تبدیل به افق طول های مایل می گذارد. نادیده انگاشتن این تأثیر باعث ایجاد خطای سیستماتیک در مشاهدات طول می گردد. در روش رایج کنونی، جهت رفع این خطا، مشاهدات زوایای قائم به صورت دوطرفه و هم زمان از دو سر طول بازها انجام می شود. همچنین نقاط دو طرف طول باز می بایست حتی الامکان هم ارتفاع باشند.

باید در نظر داشت این اختلاف فاحش در کشور سوئد که ژئوئید همواری دارد به دست آمده است در نتیجه در کشورهایی با سطح ژئوئیدی پیچیده تر مانند کشور ایران این خطا ممکن است به مراتب بیشتر باشد. بنابراین اگر ما سطح ژئوئید دقیق را داشته باشیم این خطا قابل محاسبه و حذف است. در غیر این صورت یا باید از روش رایج کنونی استفاده کنیم یا استفاده از روش به دست آمده در پژوهش Shirazian et al. (۲۰۲۱) پیشنهاد می شود. لازم به ذکر است که در روش پیشنهاد شده پژوهش مذکور، زاویه قائم در معادله تصحیح تبدیل به افق طول ها حذف شده است. در نتیجه حذف زاویه قائم از مشاهدات، دیگر نیازی به قرائت های دوطرفه و در نظر گرفتن نقاط هم ارتفاع در شبکه وجود ندارد و در نتیجه با کاهش تعداد نقاط مورد نیاز شبکه، مفاهیم طراحی شبکه با استفاده از این روش تغییر زیادی می کند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته اند.

تشکر و قدردانی

از آقای دکتر محمد باقر بندی از دانشگاه Gävle کشور سوئد که ما را در این تحقیق یاری نمودند سپاسگزاری می نمائیم.

[25] Rapp RH. Geometric geodesy part I. Ohio State University Department of Geodetic Science and Surveying; 1991.

[26] Schaffrin B. Aspects of network design. In Optimization and design of geodetic networks 1985 (pp. 548-597). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

[27] Awange JL, Faisal Anwar AH, Forootan E, Nikraz H, Khandu K, Walker J. Enhancing civil engineering surveying learning through workshops. Journal of Surveying Engineering. 2017 Aug 1;143(3):05017001.

[28] Sjöberg, Lars E., and Mohammad Bagherbandi. Gravity inversion and integration. Basel, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017.

[29] Schroedel, Joseph. "Engineering and Design-Structural Deformation Surveying." US Army Corps of Engineers (2002): 20314-1000.

[30] Vanicek, Petr, and Edward J. Krakiwsky. Geodesy: the concepts. Elsevier, 2015.

[31] Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. Survey review. 1975 Apr 1;23(176):88-93.

[10] Ekman, Martin, and Jonas Agren. Reanalysing astronomical coordinates of old fundamental observatories using satellite positioning and deflections of the vertical. Åland Islands, Sweden: Summer Institute for Historical Geophysics, 2010.

[11] Featherstone WE, Rüeger JM. The importance of using deviations of the vertical for the reduction of survey data to a geocentric datum. Australian surveyor. 2000 Dec 1;45(2):46-61.

[12] Amiri-Simkooei, Ali Reza, et al. "Basic concepts of optimization and design of geodetic networks." Journal of Surveying Engineering 138.4 (2012): 172-183.

[13] Bagherbandi M, Shirazian M, Ågren J, Horemuz M. Physical and geometric effects on the classical geodetic observations in small-scale control networks. Journal of Surveying Engineering. 2023 Feb 1;149(1):04022014.

[14] Hirt C, Seeber G. Astrogeodätische Lotabweichungsbestimmung mit dem digitalen Zenitkamerasystem TZK2-D. ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. 2002;127:388-96.

[15] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media; 2007 Nov 20.

[16] Jekeli, Ch. "An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models." Journal of Geodesy 73 (1999): 10-22.

[17] Hooijberg M. Practical geodesy: using computers. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.

[18] Lindbom J, Tirén K. Kvalitetsundersökning av Laserdata Skog: Terrängtypens inverkan på punktmolnets återgivning av markytan.

[19] Meyer, Thomas H., and Ahmed F. Elaksher. "Solving the multilateration problem without iteration." Geomatics 1.3 (2021): 324-334.

[20] Featherstone WE, Kirby JF, Hirt C, Filmer MS, Claessens SJ, Brown NJ, Hu G, Johnston GM. The AUSGeoid09 model of the Australian height datum. Journal of Geodesy. 2011 Mar;85:133-50.

[21] Brisco, B., et al. "Precision agriculture and the role of remote sensing: a review." Canadian Journal of Remote Sensing 24.3 (1998): 315-327.

[22] Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. Survey review. 1975 Apr 1;23(176):88-93.

[23] Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of geophysical research: solid earth. 2012 Apr;117(B4).

[24] Rapp, Richard H. Geometric geodesy part I. Ohio State University Department of Geodetic Science and Surveying, 1991.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مسعود شیرازیان دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی نقشه‌برداری (گرایش ژئودزی- GNSS) از انستیتو تکنولوژی سلطنتی (KTH) استکهلم کشور سوئد می‌باشد. از سال ۱۳۹۵ به عنوان استادیار در گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه دبیر شهید رجائی تهران مشغول به فعالیت بوده‌اند. ایشان تاکنون موفق به چاپ بیش از ۱۹ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: ژئودزی هندسی، GNSS هواشناسی مبتنی بر GNSS، آنالیز تغییر شکل سازه‌های بزرگ.

Shirazian, M. Assistant Professor at the Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

m.shirazian@sru.ac.ir



فرزاد حاج محمود عطار دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش سنجش از دور) از دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی تهران می‌باشد. پس از ۵ سال فعالیت در صنعت، از سال ۱۴۰۰ تاکنون به عنوان کارشناس GIS در شرکت تأمین و تصفیه شهر تهران مشغول به کار هستند. ایشان تاکنون موفق به چاپ دو مقاله در

Hajmahmoudattar, F. Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

✉ farzad.attar@yahoo.com

مجلات و کنفرانس‌های معتبر داخلی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی نقشه‌برداری، پردازش تصویر، تصویربرداری با پهپاد، و سنجش از دور.

Citation (Vancouver): Shirazian M, Hajmahmoudattar F. [Estimating Geoidal Vertical Skewness and its effect on the reduction of the slope distances to the horizontal ones]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 179-186

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.10644.1048>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Systematic Analysis of Space Lidar Payload of Remote Sensing Satellites with Emphasis on the Effect of Environmental Parameters

M. Khoshshima^{*},¹, S. Ghazanfarinia², R. Narimani²¹ Iranian space research center, Tehran, Iran² Satellite Research Institute, Iranian space research center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 06 July 2024
 Reviewed: 15 August 2024
 Revised: 07 September 2024
 Accepted: 05 October 2024

KEYWORDS:

Lidar
 Remote Sensing Satellite
 System Design
 Signal to Noise
 Zenith Angle

* Corresponding author

✉ m.khoshshima@isrc.ac.ir

☎ (+9821) 63190000

Background and Objectives: Remote sensing satellites equipped with Lidar payloads are deployed for ground, atmospheric, and space target monitoring missions. The primary advantage of space Lidars lies in their ability to conduct global monitoring with repeated coverage of targets, a capability that ground and airborne Lidars cannot fulfill. The energy of each pulse is a critical parameter in the design of space Lidar remote sensing payloads, impacting data accuracy, signal-to-noise ratio, horizontal and vertical resolution, and overall return signal aggregation time. Enhancing the signal-to-noise ratio is a key consideration in both the design and operational phases of a Lidar project. Numerous studies have explored the impact of different parameters on the signal-to-noise ratio of Lidar systems. However, despite these extensive investigations, this issue has not been comprehensively examined to date. The geometric configuration of the Lidar system, laser specifications, optics, electronics, and the arrangement of the laser-telescope geometry are key factors that significantly influence the optimization of the signal-to-noise ratio. Apart from the specifications of individual components, system analyses play a crucial role in the design of Lidar payloads. This includes technical specifications of the laser, transmitter, optical system, receiver telescope, heat control, and radiation considerations. Establishing a technical alignment between missions and payload specifications is a key requirement in this process.

Methods: Fully investigating the challenges associated with the systematic analysis of Lidar payloads is essential. This paper presents comprehensive research on the challenges and requirements related to the design considerations of Lidar systems, focusing on the transmitter and receiver components, as well as environmental factors such as radiation effects and thermal issues. Following the initial system analysis, further exploration is needed to address considerations for the Lidar payload during the operational phase, encompassing challenges related to data extraction, signal quality, and signal-to-noise ratio.

Findings: Variations in the sun's radiation angle can impact the optical depth parameter of aerosols, affecting the lidar signal-to-noise ratio by 10-40% based on atmospheric conditions. Optimal data collection times are estimated around zenith angles below 50 degrees at approximately 10 am and 2 pm, correlating with sun angle and atmospheric light scattering. Additionally, sunrise and sunset can influence signal-to-noise ratio due to maximum dispersion. The calculation of total ionizing dose damage serves as a design bottleneck, determining laser module efficiency loss through critical power index assessment for active and passive heat control. This article explores technical bottlenecks and systemic considerations in lidar payloads, investigating the role of environmental factors such as sun radiation angle and space environment impact.

Conclusion: The findings indicate that environmental factors such as space radiation and atmospheric optical indices during the operational phase, as well as geometric, structural parameters, and heat management during the design phase, significantly impact the energy of each pulse and variations in the signal-to-noise ratio. This insight is crucial for accurately estimating design budgets at both system and subsystem levels. The outcomes of this study not only offer practical implications for case studies but also suggest potential enhancements through the exploration and inclusion of additional considerations, potentially at the subsystem or other payload component levels. Leveraging the results of this research can help guarantee the precision of Lidar performance in future phases.



NUMBER OF REFERENCES
31



NUMBER OF FIGURES
13



NUMBER OF TABLES
6

مقاله پژوهشی

تحلیل سیستمی محموله لیدار فضایی ماهواره‌های سنجشی با تأکید بر اثر پارامترهای محیطی در طراحی و بهره‌برداری

مسعود خوش‌سیما^{۱*}، سجاد غضنفری‌نیا^۲، راضیه نریمانی^۲

^۱ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: ماهواره‌های سنجشی دارای محموله‌های لیدار، با مأموریت‌های پایش اهداف زمینی، اتمسفری و فضایی طراحی و عملیاتی می‌شوند. شاخص اصلی برتری لیدارهای فضایی، پایش جهانی اهداف متعدد است که سکوهاي زمینی و هوایی پاسخ‌گوی نیازهای دنیای امروز در این زمینه نمی‌باشند. یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی محموله‌های سنجش از دور لیدار فضایی، انرژی هر پالس می‌باشد که به‌طور مستقیم در دقت داده‌های جمع‌آوری شده، نرخ سیگنال به نویز، قدرت تفکیک افقی و عمودی و به عبارت دیگر، زمان تجمیع سیگنال بازگشتی، تأثیرگذار است. بهبود نرخ سیگنال به نویز به‌عنوان دیگر پارامتر مهم و مؤثر که هم در فازهای طراحی و هم در فاز بهره‌برداری مأموریت‌های لیدار دارای اهمیت است. در خصوص تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ سیگنال به نویز سامانه‌های لیدار، پژوهش‌های متعددی انجام شده است ولی علیرغم این تحقیقات گسترده، هنوز این موضوع به‌طور کامل بررسی نشده است. ساختار هندسی لیدار، مشخصات بخش‌های لیزر، اپتیک، الکترونیک، چیدمان هندسی لیزر-تلسکوپ از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار در بهینه کردن نرخ سیگنال به نویز می‌باشند. علاوه بر مشخصات زیرسیستم‌های تأثیرگذار بر این فرآیند، تحلیل‌های سیستمی در طراحی محموله لیدار که شامل بررسی مشخصات فنی لیزر، فرستنده، سامانه اپتیک، تلسکوپ گیرنده، کنترل حرارت و ملاحظات تشعشعی است، حائز اهمیت بوده و برقراری یک نگاهت فنی بین مأموریت‌ها و مشخصات فنی محموله از الزامات طراحی به‌شمار می‌رود.

روش‌ها: تحلیل سیستمی محموله‌های لیدار و طراحی یک محموله مطلوب دارای چالش‌های بسیاری است که نیاز به بررسی کاملی داشته و در دو فاز طراحی سیستمی و بهره‌برداری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این مقاله، پژوهش گسترده‌ای روی این چالش‌ها و الزامات انجام شده است که ملاحظات طراحی شامل دو بخش فرستنده و گیرنده برای محموله لیدار، اثرات تشعشعی و مسائل حرارتی به‌عنوان پارامترهای محیطی است. پس از تحلیل‌های سیستمی اولیه، نیاز به بررسی ملاحظات محموله لیدار در فاز بهره‌برداری است که خود شامل بررسی چالش استخراج داده‌ها، کیفیت سیگنال و شاخص سیگنال به نویز می‌گردد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج، تغییرات زاویه تابش خورشید، که در افزایش یا کاهش پارامتر عمق اپتیک ایروسل‌ها در ساعات مختلف روز و به تبع آن، در زاویه زینت تأثیر دارد، بر اساس شرایط اتمسفر می‌تواند ۱۰ تا ۴۰٪ بر نرخ سیگنال به نویز لیدار مؤثر باشد. همچنین، در زوایای زینت زیر ۵۰ درجه و ساعات تقریبی ۱۰ صبح و ۲ بعدازظهر، زمان مناسبی برای داده‌برداری تخمین زده شده است که این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در اتمسفر ارتباط دارد. همچنین، هنگام طلوع و غروب خورشید، با توجه به حداکثر بودن پراکنش، نرخ سیگنال به نویز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. محاسبه آسیب دوز یونیزان کل به‌عنوان یک گلوگاه طراحی، افت بازده عملکرد ماژول لیزر را تعیین نموده و با استفاده از شاخص بحرانی توان به وزن کنترل حرارت فعال و غیرفعال مشخص می‌گردد. در این مقاله، با تأکید بر گلوگاه‌های فنی محموله‌های لیدار و ملاحظات که در بخش‌های مختلف از دیدگاه سیستمی وجود دارد، نقش عوامل محیطی مانند تأثیر زاویه تابش خورشید و محیط فضا بر یک محموله لیدار، بررسی شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج، نشان می‌دهد پارامترهای محیطی شامل تشعشعات فضایی، تغییرات اپتیک و تابشی اتمسفر در فاز بهره‌برداری و جانمایی‌های هندسی و سازه‌ای و کنترل حرارت در فاز طراحی در میزان انرژی هر پالس و تغییرات نرخ سیگنال به نویز مؤثر هستند و باعث دقت در تخمین بودجه‌های طراحی در سطح سیستم و زیرسیستم خواهد

تاریخ دریافت: ۱۶ تیر ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۵ مرداد ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۷ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴ مهر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

لیدار
ماهواره سنجشی
طراحی سیستمی
سیگنال به نویز
زاویه زینت

* نویسنده مسئول

m.khoshshima@isrc.ac.ir

۰۲۱-۶۳۱۹۰۰۰۰ (۳)

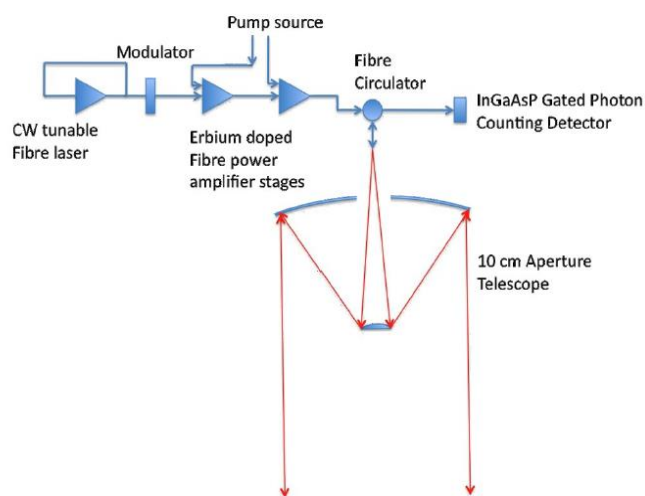
شد. نتایج این تحقیق نه تنها می‌تواند برای بهره‌برداری در مطالعات موردی کارگشا باشد، بلکه امکان تکمیل دستاوردهای این تحقیق با بررسی و افزودن ملاحظات دیگر و همچنین توسعه آن‌ها در سطح زیرسیستم‌ها یا المان‌های دیگر محموله نیز وجود دارد. به کمک نتایج این بررسی می‌توان از صحت عملکرد لیدار در فازه‌ای آتی اطمینان حاصل نمود.

مقدمه

خواهد شد. علاوه بر این ارتفاع مداری ماهواره دارای محموله لیدار، بر روی ساینز تلسکوپ و میزان نرخ سیگنال به نویز مؤثر است.

بهبود نرخ سیگنال به نویز به‌عنوان یک پارامتر اصلی هم در فازه‌ای طراحی و هم در فاز بهره‌برداری پروژه لیدار دارای اهمیت است. در خصوص تأثیر پارامترهای مختلف بر نرخ سیگنال به نویز سامانه‌های لیدار، پژوهش‌های متعددی انجام شده است [۲-۹] ولی علیرغم این تحقیقات گسترده، جنبه‌هایی از موضوع مغفول مانده و نیاز به بررسی بیشتری در این خصوص وجود دارد.

از عوامل مهم و تأثیرگذار در بهینه کردن نرخ سیگنال به نویز می‌توان به ساختار هندسی لیدار، مشخصات بخش‌های لیزر، اپتیک، الکترونیک، چیدمان هندسی لیزر-تلسکوپ اشاره نمود. بر این اساس و مطابق با استاندارد فضایی اروپا محدودیت‌های فنی برای رسیدن به نرخ سیگنال به نویز مناسب در محموله‌های لیدار عبارتند از: الزامات زیرسیستم‌های تلسکوپ، آشکارساز و پردازش.



شکل ۱: ساختار کلی یک محموله لیدار [۱۰]
Fig. 1: General structure of a Lidar payload [10]

یک سامانه لیدار در ساده‌ترین حالت از یک فرستنده لیزر، تلسکوپ جمع‌کننده و یک آشکارساز تصویر تک پیکسلی (سامانه اپتیکی) تشکیل می‌شود (شکل ۱). در این حالت، لیزر یک پالس را در راستای تلسکوپ ارسال کرده و این پالس از سطح هر جسمی که در مسیر باشد، باز خواهد گشت. این امواج بازگشتی توسط تلسکوپ بر روی آشکارساز متمرکز می‌شود. فاصله ماهواره با جسم، بر اساس زمان ارسال و زمان بازگشت امواج لیزر و در نظر گرفتن سرعت انتشاری برای با سرعت نور قابل اندازه‌گیری خواهد بود. در چنین سیستمی، تنها اجسامی که در راستای تلسکوپ ماهواره قرار داشته باشند، شناسایی خواهند شد و برای شناخت دیگر اجرام لازم است که سنجنده و تلسکوپ به‌صورت فیزیکی

ماهواره‌های سنجشی دارای محموله‌های لیدار، با مأموریت‌های پایش اهداف زمینی، اتمسفری و فضایی (اندازه‌گیری میزان رطوبت موجود در جو، ارتفاع و سرعت ابر، نمایه‌های باد، دما و دمای پتانسیلی، نقشه‌برداری و ترکیبات شیمیایی اتمسفر) به فضا پرتاب می‌شوند. محموله لیدار با استفاده از فناوری سنجش از دور فعال، دارای یک زیرسیستم لیزر برای ارسال امواج، زیرسیستم الکترواپتیک برای دریافت پرتوهای بازگشتی و بخش الکترونیک پردازش داده‌ها می‌باشد. مهم‌ترین کاربرد لیدارهای فضایی در مطالعات اتمسفری و علوم زمین شامل اندازه‌گیری سرعت باد، بخار آب، توپوگرافی و اقیانوس‌شناسی بوده و متناسب با هر یک، مشخصات، الزامات فنی و گلوگاه‌های طراحی متفاوتی وجود دارد که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. محموله‌های لیدار معمولاً بر روی پلتفرم‌های فضایی، هوایی و زمینی نصب می‌شوند. لیدارهای زمین پایه فقط یک نقطه ثابت و مشخص از هدف را به‌صورت پیوسته پایش می‌کنند [۱]. لیدارهای نصب شده بر روی هواپیما، دارای محدودیت پایش و رصد یک منطقه خاص هستند و همچنین، محدودیت‌های سیاسی و شرایط اتمسفری بر روی عملکردشان تأثیرگذار است.

شاخص اصلی برتری لیدارهای فضایی بر سایر سکوها، پایش جهانی با تکرار متعدد اهداف می‌باشد. اگر چه هزینه‌های زیاد و سطح فناوری بالا از موضوعات قابل بحث در این زمینه است، ولیکن با توجه به چالش‌های مهم پیش‌رو در دنیای امروز نظیر نقشه‌برداری، ارتفاع و عمق‌سنجی، پایش یخ‌های قطبی، تغییر اقلیم، ریزگردها، لایه اوزون، چرخه دی‌اکسیدکربن و بخار آب، از یک سو و اندازه‌گیری‌ها و انجام پروژه‌های تحقیقاتی با مقیاس‌های زمانی و مکانی بزرگ از سوی دیگر، لیدارهای نصب شده بر روی سکوهایی زمینی و هوایی نمی‌توانند پاسخ‌گوی این نیازهای جهانی باشند.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی محموله‌های سنجش از دور لیدار فضایی، طراحی انرژی هر پالس است که توسط منبع گسیلنده موج تأمین می‌شود و با نوع مأموریت و الزامات فنی سامانه لیدار نظیر چیدمان هندسی لیدار، لیزر و تلسکوپ مرتبط است. میزان مناسب انرژی هر پالس با در نظر گرفتن پارامترهای مداری می‌تواند در تعریف مأموریت که جمع‌آوری داده از سطح زمین و اتمسفر می‌باشد، مؤثر باشد [۲]. انرژی هر پالس محموله لیدار، به‌طور مستقیم در دقت داده‌های جمع‌آوری شده، نرخ سیگنال به نویز، قدرت تفکیک افقی و عمودی و به عبارت دیگر، زمان جمع‌بندی سیگنال بازگشتی، تأثیرگذار است.

مطابق با استانداردهای سنجش از دور، افزایش نرخ سیگنال به نویز موجب اخذ بیشتر و کیفیت بالاتر داده‌ها و به تبع آن نیاز به تلسکوپ بزرگتر و در نهایت گسیلنده قوی‌تر به منظور افزایش انرژی هر پالس

شکل طول موج لیزرهای قابل استفاده در مأموریت‌های اندازه‌گیری لیدار نیز آمده است.

بر اساس مطالعات صورت گرفته، هفت دسته فناوری برای لیزر در نظر گرفته می‌شود. اما برای سادگی و همچنین پوشش تمامی مواردی که احتمالاً در آینده نیز ایجاد خواهند شد، در این مطالعه، دسته‌بندی‌ها به‌صورتی انجام گرفته که از تکرارها پرهیز شود، که بر این اساس تم‌های تولید هارمونیک‌ها یکپارچه شده و تبدیل پارامتریک طول موج‌ها به‌عنوان یک دسته جداگانه مطرح شده است [۱۳]. کلاس دیگری هم برای پوشش لیزرهایی که برای سیستم‌های تقویت‌کننده/نوسان‌ساز اصلی و کنترل عرض خط تبدیل فرکانس مدنظر است، لحاظ شده است. در نهایت، دسته‌بندی لیزرها عبارت است از:

- لیزرهای کلاس mJ و $1\text{-}\mu\text{m}$
- لیزرهای کلاس J و $1\text{-}\mu\text{m}$
- لیزرهای ۱ تا ۱۰۰ واتی و $1.5\text{-}1.6\text{ }\mu\text{m}$
- لیزرهای دیودی تقویت‌کننده
- تولید طول موج‌های پارامتری

کاربردهای این دسته‌بندی به‌شرح شکل ۳ خواهد بود. در این شکل، تعداد مواردی که اندازه‌گیری به کمک این دسته‌بندی از لیزرها انجام شده و الزامات مأموریتی پوشش داده شده، ارائه گشته است.

با توجه به سناریوهای مأموریتی و همچنین دسته‌بندی ارائه شده برای لیزرها، بیشترین کاربرد مربوط به کلاس یک است که در آن لیزرهایی با طول موج پایین‌تر و انرژی به مراتب بالاتر قرار گرفته‌اند. برخی از نیازهای کلی تعریف شده توسط کاربران برای این محموله‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. در این جدول فناوری راهگشا و الزامات آن نیز آمده است.

نشانه‌روی شوند [۱۰]. البته ملاحظات طراحی محموله‌های لیدار تنها به بخش فضایی بازنمی‌گردد، بلکه علاوه بر فرستنده و گیرنده آن در ماهواره، المان‌های دیگری از جمله محیط نیز بر روی طراحی این محموله و کارکرد آن تأثیر بالایی دارند.

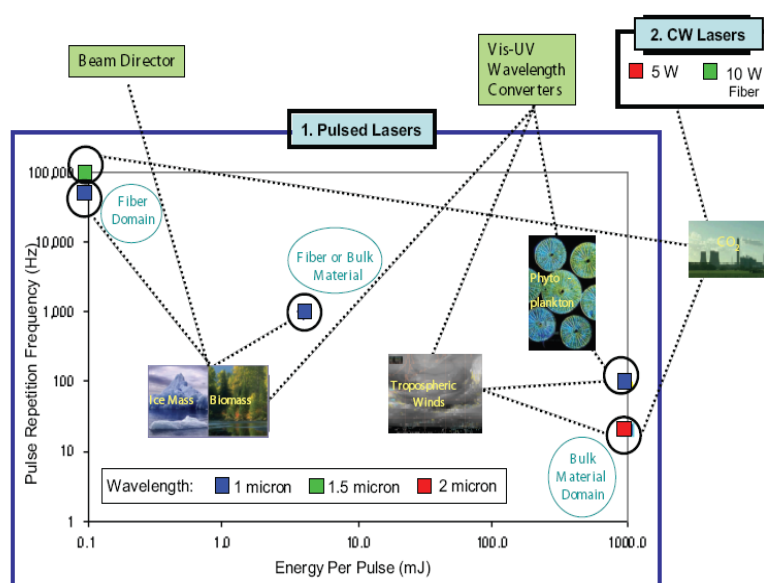
در این پژوهش، ابتدا ملاحظات و عوامل مؤثر نرخ سیگنال به نویز در فاز طراحی و بهره‌برداری محموله لیدار بررسی شده و سپس با تأکید بر فاز بهره‌برداری و داده‌برداری، در مورد تأثیر تغییرات زاویه زنیت به‌عنوان یک عامل مهم در زمان اندازه‌گیری سیگنال لیدار با استفاده از داده‌های واقعی میدانی تحلیل خواهد شد.

تحلیل سیستمی در طراحی محموله لیدار

محموله لیدار از دیدگاه سیستمی در ساده‌ترین حالت از یک فرستنده لیزر، تلسکوپ جمع‌کننده و یک آشکارساز تصویر (سامانه اپتیکی) تشکیل می‌شود. ملاحظات طراحی محموله‌های لیدار که به‌صورت سیستمی بررسی و تحلیل می‌شود، شامل ملاحظات طراحی در دو بخش فرستنده و گیرنده برای محموله لیدار، اثرات تشعشعی و مسائل حرارتی به‌عنوان پارامترهای محیطی بوده و در ادامه بررسی شده است [۱۱ و ۱۲].

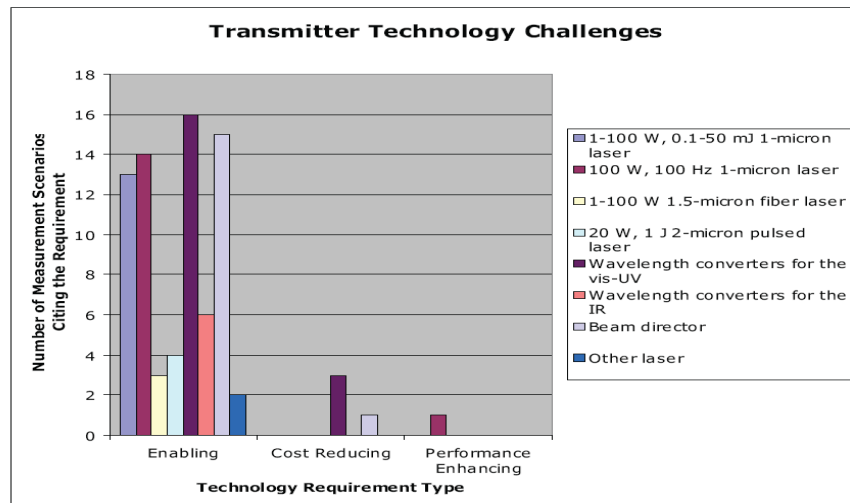
الف) ملاحظات فرستنده

اولین گام در تحلیل سیستمی یک محموله لیدار، تعیین قابلیت‌های مورد نیاز فرستنده است. از این‌رو، با توجه به کاربردهای مدنظر (سناریو مأموریت اندازه‌گیری)، مقدار انرژی هر پالس تشعشع شده از محموله به همراه فرکانس تکرار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۲، ارتباط بین کاربردها، انرژی هر پالس و فرکانس تکرار را نشان می‌دهد [۱۳]. در این



شکل ۲: بررسی کاربردی فرستنده در محموله لیدار [۱۳]

Fig. 2: Application investigation of the transmitter in a Lidar payload [13]



شکل ۳: بررسی کاربردی انواع دسته‌بندی لیزرها در فرستنده [۱۳]

Fig. 3: Practical examination of the laser's classification in the transmitter [13]

جدول ۱: نیازهای مأموریتی برای کلاس اول لیزرها- الزامات فنی لیزر متناسب با سناریوهای اندازه‌گیری [۱۴]

Table 1: Mission requirements for the first class of lasers - Laser technical requirements tailored to measurement scenarios [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Topography, aerosol and temp. profiles	Pulse Rate $\leq$ 500 Hz, Solid-state Laser	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, ≥ 0.25 J @ 150-Hz PRF, WPE $\sim 10\%$, 1-MHz linewidth, $M^2 < 1.5^a$	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, 0.5 J @ 50-Hz PRF, WPE 6%, 1-MHz linewidth, $M^2 < 1.5$	Reliability, packaging, space qualification
Topography, aerosol and temp. profiles	Pulse Rate ≥ 1 kHz, Solid-state Laser	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$: 1) bulk , ≥ 0.8 J @ 5 kHz PRF, WPE $> 5\%^b$; 2) fiber , > 1 -4 mJ @ 10 kHz, WPE $> 15\%$, GHz linewidth, $M^2 < 1.5^c$	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, ~ 100 's μJ @ ≥ 2.5 -kHz PRF, WPE 6%, 1-MHz linewidth, $M^2 < 1.5$	Reliability, packaging, space qualification
Gravity	cw Solid-state Single Frequency Laser	$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, ~ 15 kW, WPE $\sim 10\%$, ~ 100 -kHz linewidth, $M^2 < 1.5^d$	$1 \mu\text{m}$, ≥ 20 mW, sub-Hz linewidth ^e	GRACE-FO is focused on demonstration of frequency reference, incl. locking scheme
Atmospheric Composition, winds, ocean mixing-layer	Frequency Conversion	See "Fixed Wavelength Conversion" and "Tunable Wavelength Conversion" sections	Harmonic generation of 532, 355 nm; parametric generation to fixed and tunable λ 's Vis-MWIR*	Improved nonlinear optical materials and anti-reflective coatings
Topography, aerosol and T, oceanography	Fiber/Hybrid (bulk+fiber)*	10-100+ W at $1 \mu\text{m}$ (typically < 1 mJ), PRF 20- >100 kHz, $M^2 \sim 1$, WPE $\geq 20\%$	1, 1.5, 2 μm , ~ 0.1 -few mJ @ ≥ 2.5 -kHz PRF, WPE $\geq 15\%$, range of linewidths, $M^2 < 1.5$	Fiber-integrated components, low-nonlinearity gain fiber, higher WPE pump diodes
High resolution aerosol, $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$, oceanography	Single λ signal laser diodes, amplifiers	10 kHz-few MHz linewidth, 20-100 mW P_{ave}	Linewidth from kHz to MHz at variety of λ in Vis-SWIR range	Linewidth in ~ 10 kHz range, wavelengths $>$ telecom

سایر الزامات فنی اندازه‌گیری‌ها (محدود به فرستنده لیزر) در جدول ۲ بیان شده است.

(ب) ملاحظات گیرنده

در بحث گیرنده نیز مشابه فرستنده، تحلیل‌ها در ترکیب کاربردها، طول موج لیزر و عوامل دیگر مؤثر بر گیرندگی در محموله لیدار، بررسی شده و در یک شکل به صورت مجتمع ارائه می‌شود (شکل ۴). مشاهده می‌شود که در کنار گیرنده، مسائل محیطی و نشانه‌روی نیز دارای اهمیت بسیار هستند.

با توجه به جدول ۱، پس از کلاس یک، کلاس فناوری تبدیل طول موج ثابت، کلاس آخری که بنا به پوشش کامل نیازها و مشخصات افزوده شد، بیشترین کاربردها را به خود اختصاص داده بود. بر این اساس، جدولی مشابه برای این کلاس نیز تهیه شده و به صورتی که در جدول ۲ آمده، ارائه می‌شود.

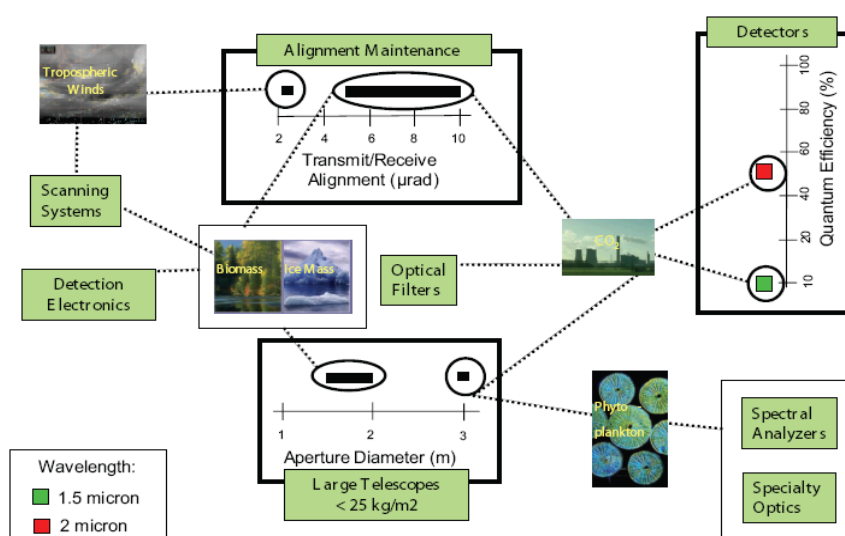
به عنوان مثال به منظور بررسی و اندازه‌گیری توپوگرافی و ابروسل‌ها، فناوری لیزر حالت جامد با انرژی متوسط هر پالس ۵/۰، نرخ تکرار فرکانس ۵۰ هرتز و بازه تبدیل انرژی ۶٪ در نظر گرفته شده است و در طرف مقابل برای اندازه‌گیری میدان‌های گرانشی از لیزر پیوسته حالت جامد با انرژی متوسط ۲۰ مگاوات و طول موج ۱ میکرومتر قرار دارد.

جدول ۲: نیازهای مأموریتی کلاس پنجم لیزرها [۱۴]

Table 2: Mission requirements of the fifth class of lasers [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Aerosol, $H_2O_{(v)}$, T, oceanography (at 532 nm w/ less penetration than ~450-480 nm)	Second Harmonic Generation	~70% 1064nm → 532 nm (>24 W @ 150 Hz, $P_{pk} = 16$ MW) ^a ; >50%, 1064nm → 532 nm (>200 W)	>100 mJ @ 532 nm, 10-200 Hz PRF; 2-5 mJ @ 532 nm, 2.5-20 kHz PRF	Incremental performance and reliability improvements
O ₂	Second Harmonic Generation	>50% 1530 nm → 765 nm	1 J, 10 Hz.	Scale telecom technology lasers to much higher energy
DWL; aerosol and T profiles	Third Harmonic Generation	~6 W, ~50% 1064+532 → 355 nm (20 kHz, $P_{pk} \sim 1$ MW); ~20+% at 150-300 Hz PRF	~6 W, ~30% 1064+532 → 355 nm (200 Hz, $P_{pk} \sim 10$ MW)	High efficiency, high reliability UV generation

^a Albert et al. [2015].



شکل ۴: الزامات فنی زیرسیستم گیرنده (سامانه اپتیکی) محموله لیدار متناسب با نوع مأموریت اندازه‌گیری [۱۴]

Fig. 4: Technical requirements of the receiver subsystem (optical system) of the Lidar according to the type of measurement mission [14]

ترسیم نمود. این گراف در شکل ۵ به نمایش در آمده است که بر اساس آن، برای سناریوهای پرکاربرد که به صورت اندازه‌گیری پارامترهای مختلف تعیین شده، فناوری‌ها به شرحی که در جدول ۵ آمده است، مورد نیاز خواهد بود. جزئیات هر فناوری نیز در جدول ۵ و به صورتی مشابه با جدولی که برای فرستنده ارائه شده بود، جمع‌بندی شده است.

متناسب با جدول ۴ (ابعاد سامانه اپتیکی و تلسکوپ- زیر سیستم گیرنده)، تلسکوپ با قطر ۳ متر برای اندازه‌گیری CO₂ و ازون، یک چالش طراحی سیستمی محسوب می‌شود به طوری که در مورد توپوگرافی، ایروسل‌ها و باد این مسأله حدود ۱ متر برآورد شده است. همچنین، میدان دید ۱۰۰ میلی‌رادیان CO₂ و در مقابل ۰/۵ میلی ایروسل‌ها قابل مقایسه می‌باشد.

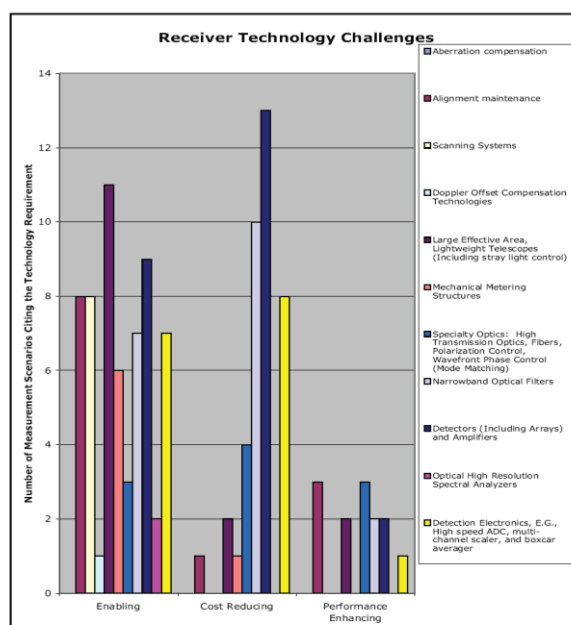
اختلاف زیاد قابلیت‌ها در فناوری‌های مختلف گیرنده‌ها، بر اندازه‌گیری تأثیرگذار بوده و موجب محدودیت در برخی کاربردها خواهد شد. برخی از این موارد در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس مطالعاتی که خلاصه آن‌ها در شکل ۴ ارائه شد، کلاس‌های زیر قابل بررسی هستند [۱۴]:

- نگهداشت تراز
 - سیستم‌های اسکن، سطح مؤثر بزرگ، تلسکوپ سبک، موضوعات مکانیکی، اپتیک فیلترهای نازک باند
 - آشکارسازها و تقویت‌کننده‌ها، آنالیزورهای طیفی با رزولوشن اپتیکی بالا، الکترونیک آشکارساز
- در مورد گیرنده نیز مشابه فرستنده، می‌توان گرافی بین موضوعات مطرح شده، کاربرد و ملاحظات سیستمی مرتبط به محموله لیدار

جدول ۳: مشخصات محدودیت‌های ایجاد شده ناشی از اختلاف قابلیت‌های فناوری [۱۴]

Table 3: Limitations caused by differences in technological capabilities [14]

Capability Gap	Measurements	Current TRL	"Greatest Challenge" TRL
High-efficiency detectors in 1.5-2 μm range	CO ₂ (ASCENDS)	5	Space qualification/radhard assurance
Field-widened interferometric receiver	Aerosol/Clouds/Ecosystems (ACE)	4	Wavefront error
High-bandwidth, high-sensitivity detector arrays	3D Biomass (NISAR/GEDI, formerly DESDynI)	5	N/A
None	Gravity (GRACE-2)	6	N/A
Multiple aperture/beam receiver	Topography (LIST in 2007 Decadal)	3	Large-area detector with high readout bandwidth
Single telescope supporting multiple look angles	3D Winds	3	Large-aperture receive optics (HOE/DOE, interferometer)



شکل ۵: بررسی کاربردی انواع دسته‌بندی لیزرها در گیرنده [۱۴]

Fig. 5: Practical examination of the classification of lasers in the receiver [14]

جدول ۴: کاربردها در کنار فناوری‌های مربوطه و الزامات آن‌ها از دیدگاه گیرنده [۱۴]

Table 4: Applications, related technologies and their requirements from the receiver's point of view [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Wind, Aerosols	Beryllium or SiC field lens-corrected Ritchey-Chrétien or other Cassegrain receive telescope	Single aperture, 1-1.5 m, ~0.2-0.5 mrad FOV	Light-weight telescopes >1 m	Light-weight, deployable telescopes >2-m diameter*
Aerosol, Ocean, Non-CO ₂ , Phytoplankton			2-5 m primary mirror telescope for space based lidar, <F/1 primary, <100-μm blur circle, high transmission (>95%) at target wavelength(s), low thermal distortion, high rigidity	
Topography			1 - 1.5 m diameter, <10-μrad blur circle	
CO ₂ , Ozone	Deployable large aperture diffractive primary and corrector optics ^a	Sub-aperture elements of 5-m primary used for imaging	3-m diameter deployable, ~100-mrad FOV, areal density <25 kg/m ²	

ج) ملاحظات حرارتی و کنترل حرارت

بررسی آثار ایتوترمال، تعیین حد آستانه آسیب‌های ایتیکی، بررسی ملاحظات حرارتی محیط بهره و پمپ، سیستم‌های سرمایش، سیستم‌های جبران‌ساز، طراحی بهینه شامل بازده بالا و تولید پرتو با کیفیت، ساختار ایتیکی، انتخاب مواد، طراحی سازه، طراحی سناریو، تجمیع ایتیکی و مدیریت حرارتی از نکات مهم گلوگاه‌های طراحی لیزر محموله لیدار از دیدگاه حرارتی می‌باشد [۱۶-۱۸]. سایر موارد عبارتند از:

- ایجاد محیط همگن و پایدار از نظر حرارتی در اطراف محفظه لیزر، بر دهانه الکترونیکی و کاواک تلسکوپ
- استفاده از پوشش‌های MLI برای عایق‌بندی تبادل حرارتی محموله با محیط خارج و جلوگیری از تغییر دما ناشی از تشعشعات تابشی محیط فضا
- ایجاد رسانش ضعیف حرارتی در آینه‌ها و اتصالات
- رعایت ملاحظات و استانداردهای حرارتی اجزا
- استفاده از لوله‌های حرارتی
- استخراج بازه حرارتی مناسب
- عملکرد مناسب قطعات و خروجی قابل قبول در بازه حرارتی معین
- محاسبه و شبیه‌سازی توزیع حرارتی، خمش، تنش
- کنترل حرارت در اتصالات و انتخاب اتصال حرارتی مناسب در قطعات و عناصر ایتیکی و الکترواپتیکی

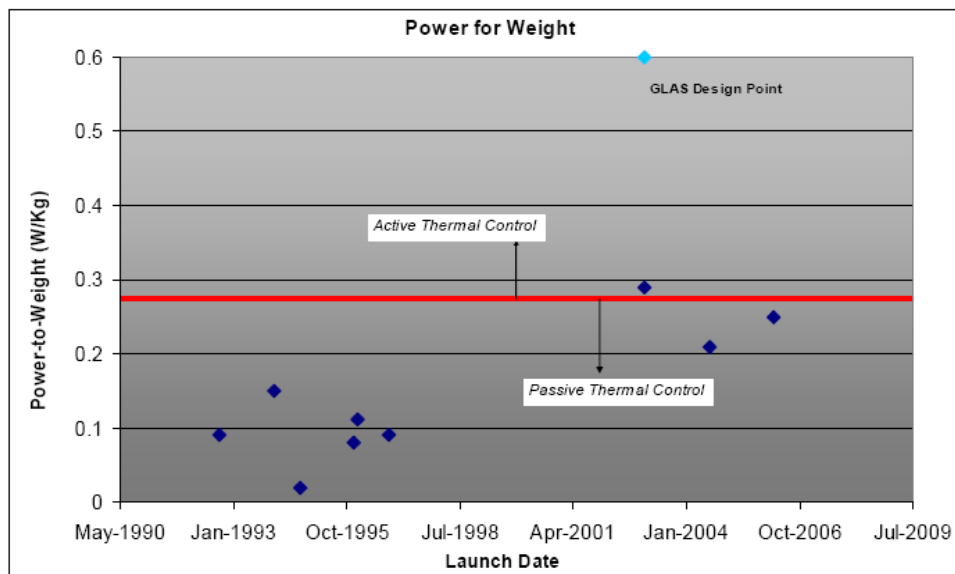
مدیریت چرخه حرارتی در یک محموله توسط زیرسیستم کنترل حرارت شامل: عایق کردن یا مجزا کردن شاسی ایتیکی از منابع گرمایی و حرارتی و کمینه کردن تمامی گرادیان‌های حرارتی می‌باشد. عدسی‌ها، آینه‌ها، گسیلنده پرتو و همه اتصالات به‌کار رفته در سامانه ایتیک لیدار می‌بایست الزامات حرارتی را طی کرده باشند. خواص ترموایتیکی

پوشش‌های حرارتی در سطوح مختلف، تأثیر بسیار زیادی بر پایداری حرارتی نهایی محموله لیدار دارد [۱۹ و ۲۰]. به‌طور کلی آزمون‌های محیطی حرارتی، با توجه به شرایط عملکردی محموله لیدار طراحی و اجرا می‌شود. در حالت عملکردی، بازه دمایی پیشنهادی برای تست حرارتی محیطی ۱۰+ درجه به حد بالا و ۱۰- درجه به حد پایین افزوده می‌شود. سیکل‌های حرارتی نیز متناسب با نوع قطعات و ماژول‌ها، برای تست تعریف و اجرا می‌شوند. به‌عنوان مثال برای تجمیع با قابلیت اطمینان بالا، ۶۰ سیکل، برای تجمیع پرخطر ۳۰ سیکل، برای زیرسیستم اپتو الکترونیک ۱۰۰ سیکل و بیشتر طراحی و اجرا می‌گردد.

شکل ۶ بررسی‌های انجام شده در خصوص ماژول لیزر پرکاربرد در لیدارهای فضایی را نشان می‌دهد. طراحی زیر سیستم کنترل حرارت در یک محموله لیدار با شاخص POWER to Weight بررسی می‌شود. این شاخص، بیان می‌کند هر چه نسبت توان به وزن لیزر بیشتر باشد، حرارت بیشتری در محفظه لیزر ایجاد می‌شود که می‌بایست از سیستم لیدار حذف شود و هرچه این شاخص کمتر باشد، انباشت گرمای کمتری در محفظه ایجاد می‌شود.

مطابق با بررسی‌های صورت گرفته، شاخص میانگین حدودی ۰/۲۹ برای معیار کنترل حرارت فعال و غیرفعال تعریف شده است. اگر ضریب P-W بالای این عدد باشد کنترل حرارت ماهواره می‌بایست با استفاده از فناوری فعال طراحی شود. به‌عنوان مثال این شاخص برای ماهواره لیداری GLAS حدود ۰/۶ می‌باشد.

توجه به این نکته ضروری است که گرم شدن و افزایش دمای لیزر و دیودهای پمپی آن، موجب کاهش بازده لیزر می‌شود. استفاده از آرایه‌های دیودی پمپی به‌جای دیودهای خطی در یک ماژول فضایی لیزر باعث افزایش ۳ تا ۵ درصدی راندمان کلی لیزر می‌گردد [۲۱].



شکل ۶: مرور مشخصات حرارتی محموله‌های لیدار در گذر زمان [۲۱]

Fig. 6: Thermal characteristics review of Lidar payload over time [21]

هیترهای فعال حفظ می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی حرارتی ماهواره و محموله لیدار، بازه حرارتی محیطی، مشخصات هندسی و ترموپاتیکی نشان می‌دهد که بازه نوسانات دمایی قبل از اعمال طراحی حرارتی در حالت سرد و در یک مدار، حدود ۱۴ درجه بوده و بعد از آن به حدود ۵ درجه کاهش یافته است. در شرایط گرم مداری نیز، بعد از طراحی حرارتی، شرایط دمایی بسیار بهبود یافته و حداکثر دمای عملکردی حدود ۲۷ درجه، متوسط دمایی حدود ۲۲ درجه و نوسانات دمایی نیز ۲۱ درجه کاهش یافته است.

در بررسی دمای یک گیرنده پس از اعمال طراحی‌های حرارتی توسط خوش سیما و همکاران در [۲۲]، افزایش دمایی قابل توجهی در شرایط سرد اتفاق افتاده است که البته همچنان در محدوده مجاز قرار گرفته است. این درحالی است که در شرایط گرم بعد از اعمال طراحی حرارتی تغییر زیادی در دمای گیرنده روی نداده است. در مورد بازتابنده شرایط کاملاً متفاوت بوده به نحوی که حداقل دما در شرایط سرد ۴۲ درجه افزایش و حداکثر دما در شرایط گرم ۷ درجه کاهش داشته است. ضمن این‌که تغییرات دمایی نیز در هر دو حالت یکنواخت‌تر شده است.

بر اساس استاندارد فضایی اروپا [۲۳]، الگوریتم‌های کمینه کردن انحراف حرارتی یک سامانه اپتیکی عبارتند از:

- استفاده از طراحی‌هایی که تغییر شکل سازه سامانه لیدار تأثیری بر مسیر اپتیکی پرتو لیزر نداشته باشد و همراستایی اولیه برای عبور و گسیل پرتو لیزر دستخوش تغییر نشود.
- استفاده از آلیاژهای ترکیبی مقاوم در برابر انبساط حرارتی
- استفاده از مواد و عناصر با ضریب حرارتی انبساطی پائین
- رعایت ملاحظات مسیر اپتیکی و مقیاس اپتیکی مناسب و بهینه در سامانه لیدار [۲۴]

در خصوص ماهواره‌هایی با محموله‌های مشابه لیدار با لیزر ND:YAG و پمپاژ دیودی در دنیا (و به صورت خاص پروژه‌های ناسا) مطالعات زیادی انجام شده است. زیرسیستم کنترل حرارت ماهواره MOLA (تاریخ پرتاب ۱۹۹۵) از هیتر و ترموستات تشکیل شده است. در ماهواره گلاس این زیرسیستم از سه سری لوله‌های حرارتی بسته و در ماهواره‌های MLA و LOLA (تاریخ پرتاب ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲) از هیتر و ترموستات حرارتی تشکیل شده است. ماهواره CALIPSO (تاریخ پرتاب ۲۰۰۶) نیز از هیترهای کنترل‌کننده فعال و پوشش‌های عایق حرارتی MLI استفاده کرده است. در این ماهواره، حرارت تولیدی لیزر در EBOX با استفاده از رادیاتورهای تعبیه شده در سمت فوقانی هر محفظه به بیرون منتقل می‌شود. سازه ماژولار محموله لیدار کالیپسو از فیبر M55J با رسانش حرارتی حدودی ۳۰ وات بر m-K ساخته شده است. در سازه کالیپسو، شاسی اپتیکی، محفظه محموله و تلسکوپ از یکدیگر عایق‌بندی شده‌اند. تغییرات دما در سامانه‌های اپتیکی منجر به تغییر ساختار المانهای عبوردهنده نور و در نهایت تغییر مسیر نور از راستای اولیه می‌شود. به‌طور کلی، تغییر شکل و جابه‌جایی المان‌ها در سامانه اپتیکی لیدار، خمش سازه، اغتشاش در پایداری همراستایی و یا تغییر خواص اپتیکی باعث ایجاد انحراف در مسیر پرتو می‌شود [۱۹].

لیزر به‌عنوان یکی از حساس‌ترین ماژول‌ها به دما در یک محموله رادار، تأثیر زیادی بر پایداری حرارتی نهایی محموله دارد. در حالتی که لیزر روشن است، گرمایی معادل ده برابر حالت آماده به‌کار ماهواره تولید می‌کند. ماژول لیزر می‌بایست کاملاً نسبت به تلسکوپ و باس محموله عایق‌بندی شده و باس ماهواره و تلسکوپ می‌بایست از نظر حرارتی کوپل باشند و سمتی از تلسکوپ که به‌سوی خورشید است، با MLI پوشانیده می‌شود. تعادل حرارتی در تلسکوپ محموله لیدار معمولاً با

(د) ملاحظات تشعشعی

مساحت جانبی حجم حسّاس به تشعشع، تعداد ذرات برخوردکننده برابر با 7×10^{12} خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد اثر تشعشعی میزان دوز یونیزان کل بر بخش لیزر باعث افزایش ۱۵ درصدی جریان آستانه و کاهش توان اپتیکی می‌گردد [۲۷].

تحلیل سیستمی در فاز بهره‌برداری

ملاحظات محموله لیدار از دیدگاه سیستمی در فاز بهره‌برداری شامل بررسی چالش استخراج داده‌ها، کیفیت سیگنال و شاخص سیگنال به نویز دریافتی است که در ادامه بررسی شده است.

(الف) ملاحظات استخراج داده

استخراج داده، ملاحظات خاصی دارد که در ادامه با توجه به دریافت تا کاربرد داده، حجم و زمان آن بررسی شده و ارتباطات و نسبت‌های آن به‌صورت خلاصه در شکل ۷ ارائه شده است. بر این مبنا و با توجه به فناوری‌های توانمندسازی که در حوزه استخراج داده مدنظر هستند، در نموداری میزان کاربرد هر فناوری با توجه به سناریوهای اندازه‌گیری مورد نیاز آن، به نمایش گذاشته شده است. با توجه به مواردی که بررسی شده و در نمودارها گزارش شده، می‌توان مجموعه‌ای از فناوری‌های مورد نیاز در استخراج داده محموله لیدار را تعیین نموده و ملاحظات مختلف آن را مبنای پارامترهای چالش مشاهده کرد [۲۱].

تابش‌های محیط فضا بر عملکرد و طول عمر قطعات اپتیکی و الکترونیکی محموله ماهواره‌ها تأثیرگذار است. بازده و عملکرد تجهیزات اپتیکی و قطعات الکترونیکی ماهواره‌ها پس از قرار گرفتن در معرض تشعشعات فضایی دچار تغییر می‌شوند. تشعشعات محیط فضا موجب بروز آسیب‌های تشعشعی شده و آسیب تشعشعی بر مائول لیزر به‌علت دوز یونیزان کل، بازده را در مأموریت‌های بیش از دو سال با افت مواجه خواهد کرد [۲۵]. انواع این آسیب‌ها بر اساس نوع مکانیزم عبارتند از:

○ آسیب دوز یونیزان کل [۲۶]

○ آسیب تک رخدادی

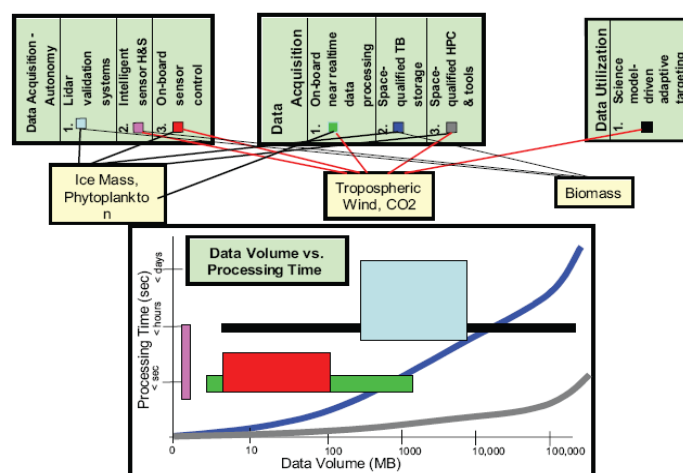
○ آسیب جابجایی

در جدول ۵ می‌توان اثر تشعشعات را بر قطعات نوری مشاهده نمود. شبیه‌سازی‌های تشعشعی محیط بهره و پمپ یک محموله لیدار به‌منظور تخمین آسیب تشعشعی دوز یونیزان کل بر عملکرد زیرسیستم لیزر محموله لیدار یک ماهواره سنجشی در مدار نزدیک به زمین، نشان می‌دهد میزان دوز تشعشعی دریافت شده در قسمت محیط بهره در حالت بدون محافظ برابر با 1951 rad است. میزان دوز القایی با در نظر گرفتن شیلد آلومینیومی با ضخامت ۲ میلی‌متر حدود 275 rad برای محیط بهره و حدود 623 rad برای پمپ لیزر، کاهش می‌یابد. همچنین، براساس محاسبات انجام شده و با در نظر گرفتن مدت زمان مأموریت و

جدول ۵: اثرات تشعشعی بر منابع نوری نیمه هادی و آشکارسازها

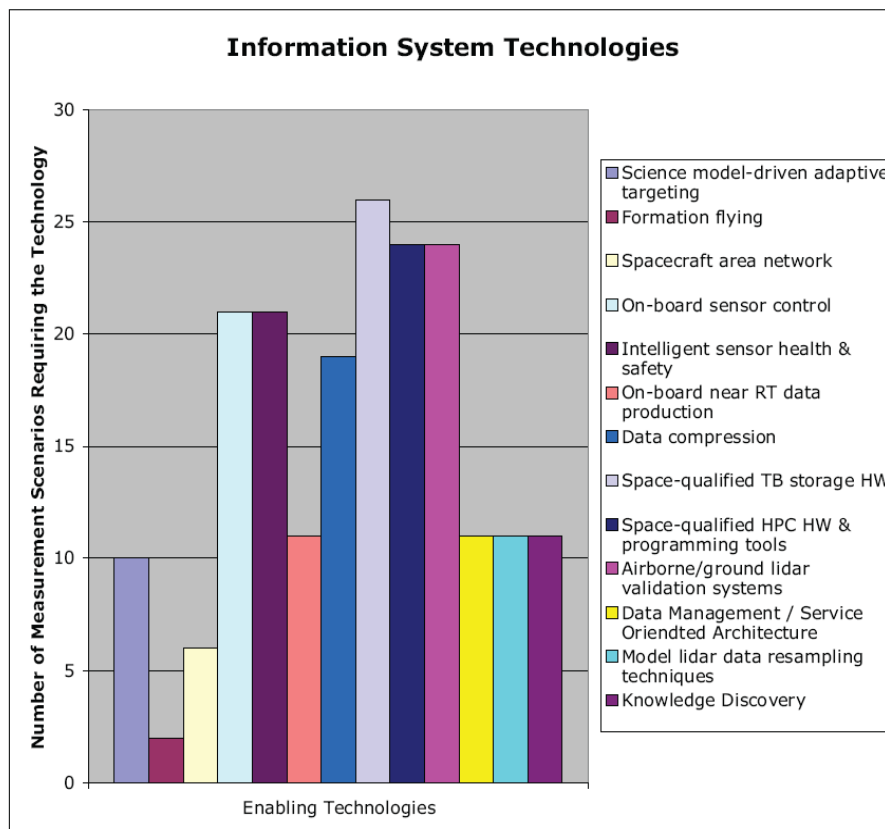
Table 5: Radiation effects on semiconductor light sources and detectors

شار پروتون Proton flux	شار نوترون Neutron flux	قطعه piece
کاهش توان خروجی Reduce the output power	کاهش توان خروجی Reduce the output power	LED
افزایش جریان آستانه Increase the threshold current	افزایش جریان آستانه و کاهش بازده کوانتومی Increasing the threshold current and reducing the quantum efficiency	دیود لیزری Laser diode
افزایش جریان نشتی Increased leakage current	افزایش جریان نشتی، کاهش پاسخ‌دهی مدار Increasing the leakage current, reducing the response of the circuit	دیود نوری (فوتودیود) Light diode (photodiode)



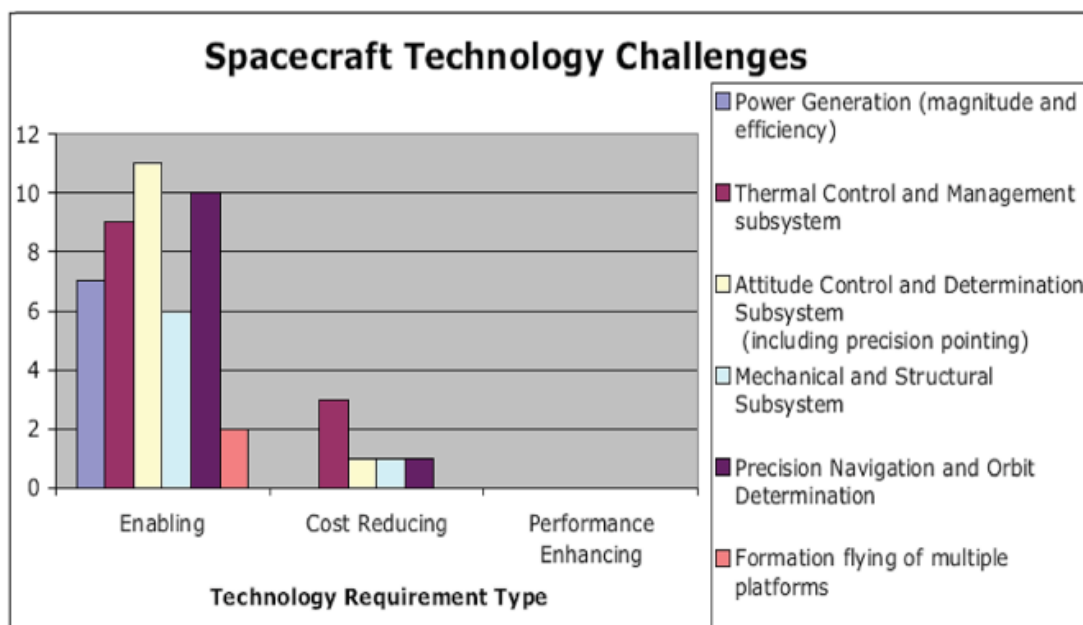
شکل ۷: مرور ملاحظات استخراج داده [۲۲]

Fig. 7: data mining considerations [22]



شکل ۸: کاربردهای فناوری‌های مرتبط با استخراج داده [۱۴]

Fig. 8: Applications of technologies related to data mining Analysis [14]



شکل ۹: ملاحظات فناوری‌های مرتبط با پارامترهای چالش و میزان اثرگذار آنها [۱۴]

Fig. 9: Considerations of technologies related to challenge parameters and their effectiveness [14]

جدول ۶: کاربردها در کنار فناوری‌های مربوطه و الزامات آن‌ها از دیدگاه استخراج داده [۱۴]

Table6: Applications along with related technologies and their requirements from a data mining perspective [14]

Measurement	Technology	State-of-the-Art	Requirements	Development Need
Wind (direct or hybrid), Aerosol	MCP PMT, CMOS Delta-doped Si III-N PIN arrays or APD	PMTs, QE ~25% Si APD, >65% QE, <300 cps DCR, <50 ns dead time ACCD: 85% QE, 16x16 pixels, 25 x 2.1 μ s range gates, 7 noise e ⁻ per pixel, 16-bit ADC I ² PC: 40% PDE, 256x256 pixels, 10s of ps	Single element or array detectors with single photon counting sensitivity, PDE > 50%, internal gain 10 ⁶ , dark current <1 kcps, active area >2 mm ²	Develop and demonstrate photon counting detector arrays for increased dynamic range
Wind (coherent) CO ₂ , non-CO ₂ GHG, water	HgCdTe APD arrays	80-K, 2x8 pixel arrays, 75% QE, 200-kHz DCR, few photon sensitive, 10-MHz bandwidth, 400-4200 nm responsivity	Multipixel arrays, >75% QE, <200 kHz DCR, few photon sensitive, 10-MHz bandwidth, 750-3400 nm responsivity, low power consumption (<5 W including cooler)	Develop and demonstrate arrays
Ocean Mixed Layer	Si APD or PMT	PMTs, QE ~25% Si APD, >65% QE, <300 cps DCR, <50 ns dead time	Gated on and off within 20-50 ns, high quantum efficiency (>50%, goal >70%), excess noise factor <2 (variance domain), low afterpulsing, large dynamic range, large aperture (>1 mm ²), low dark noise, gain 10 ⁵ -10 ⁶	Develop and demonstrate arrays
Topography, 3D biomass, Aerosol	Si APD or PMT (532 nm) InGaAs or HgCdTe APD (1064 nm)	InGaAs: 256x64 pixel arrays, 35% QE, <10 kHz DCR, single photon sensitive, ~350 ps timing jitter, asynchronous HgCdTe: 80-K, 2x8 pixel arrays, 75% QE, 200 kHz DCR, few photon sensitive, 10-MHz bandwidth, 400-4200 nm responsivity	Large arrays (256x256), high-efficiency (>50%), high-bandwidth (1 GHz), low-timing jitter (<100 ps) arrays with high count rates (>100 Mcps).	Low-cost, high efficiency, larger format, radiation hard photon counting arrays

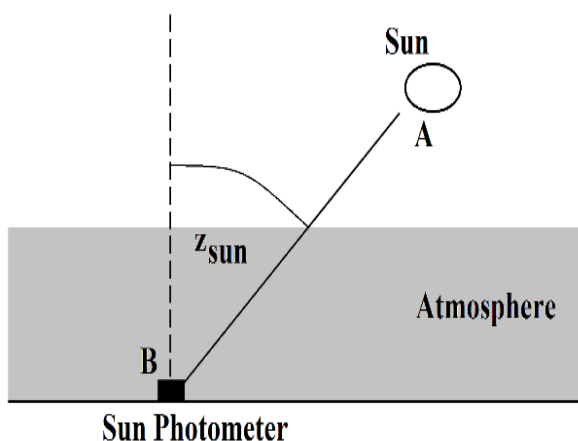
(ب) ملاحظات سیگنال به نویز در هنگام اخذ داده

در یک سامانه لیدار، پارامتر سیگنال به نویز از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. توان اپتیکی رسیده به ورودی تلسکوپ با عبور از اپتیک گیرنده به آشکارسازها رسیده و بعد از تقویت به ولتاژ تبدیل می‌شود. ولتاژ ناشی از پس‌پراکندگی اتمسفر V_s ، با ولتاژ نویز V_n (نویز پس زمینه V_b ، نویز جریان تاریک و نویز گرمایی V_t) آمیخته شده و ثبت می‌شود:

$$V = V_s + V_n = V_s + (V_b + V_d + V_t) \quad (۱)$$

این بررسی‌ها به مجموعه‌ای از فناوری‌ها منتج خواهد شد که کاربرد معادل آن‌ها به صورت مشخصات اندازه‌گیری مطرح شده و فناوری مرتبط آن‌ها به همراه الزامات مربوطه در جدول ۶ دسته‌بندی و مستند شده است. مجموع این ملاحظات به صورتی که بتواند به عنوان ورودی برای طراحی محموله‌های لیدار استفاده شده و بر مبنای الزامات فناوری قابل استفاده باشد، در طراحی سیستمی به شدت مورد توجه است.

می‌شود. ضریب خاموشی نیز به نوبه خود از مجموع دو اثر پراکنش و جذب تابشی ذرات در جو به‌دست می‌آید. هواویزهای جوی با دو فرآیند جذب و پراکنش، باعث کاهش شدت نور مستقیم خورشید می‌شوند. پراکنش پرتو نور توسط ذرات و قطرات معلق در جو (با فرض کروی بودن) به‌وسیله نظریه می (Mie) توصیف می‌شود. البته نکته مهم در این‌جا محلی بودن این تغییرات یا به‌عبارتی وابستگی این تغییرات به ترکیبات فیزیکی و شیمیایی جو منطقه اندازه‌گیری است. عمق نوری هواویزها در یک چرخه شبانه‌روزی دچار تغییر می‌شود. همرفت در لایه مرزی نقش مهمی در اختلاط شبانه‌روزی هواویزها و عمق نوری آن‌ها دارد. در ساعات اولیه روز، به‌دلیل وجود مه و غبار صبحگاهی، معمولاً تیرگی جو افزایش دارد که این، امری کاملاً طبیعی محسوب می‌شود. همچنین، در ساعات پایانی بعد از ظهر، به‌دلیل طولانی‌تر شدن مسیر عبور پرتو نور از لایه مرزی، هواویزهای بیشتری در مسیر پرتو قرار می‌گیرند که این مسئله نیز از دلایل احتمالی تیرگی در این زمان به‌شمار می‌رود (شاپ، ۲۰۰۳). علاوه بر ملاحظات و موارد مذکور برخی دیگر از الزامات مرتبط با نويز در سایر بخش‌های لیدار می‌بایست بررسی شود.



شکل ۱۰: تغییرات زاویه تابش خورشید مرتبط با تغییرات شبانه‌روزی عمق نوری ابروسل‌ها

Fig. 10: Variations of solar radiation angle associated with Day and night changes of optical depth of aerosols

تغییرات عمق نوری ابروسل‌ها در زاویه‌های زینت مختلف (۶ صبح، ۱۲ ظهر و ۶ غروب) محاسبه شده توسط دستگاه سان فتومتر در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. یکی از دلایل استفاده از سه طول موج ۴۴۰، ۶۷۵ و ۸۷۰ نانومتر در اندازه‌گیری و محاسبه AOD افزایش قابلیت اطمینان در اندازه‌گیری دستگاه سان فتومتر بوده است. مطابق با شکل ۱۱ در یک بازه یک‌ساله، AOD در طول روز حدود ۱۵ درصد نسبت به میانگین سالانه تغییرات دارد، به‌عبارت دیگر، زاویه زینت در طول یک روز حدود ۱۵٪ در تغییر عمق نوری ابروسل‌ها و به تبع آن نويز پس زمینه مؤثر است. به‌عبارت دیگر، پیش‌بینی می‌شود نقش زاویه زینت خورشید در فاز بهره‌برداری از محموله لیدار در آسمان ایران (منطقه زنجان، با شرایط اتمسفری منحصر به‌فرد) حدود ۱۵ درصد باشد.

نويزهای جریان تاریک و نويز گرمایی برای یک سامانه مشخص، ثابتند اما نويز پس زمینه با تغییر شدت پس زمینه و همچنین شرایط فیزیکی و شیمیایی اتمسفر تغییر می‌کند. از این‌رو، ولتاژ نويز به دو قسمت نويز ثابت (ولتاژ جریان تاریک و نويز گرمایی) و متغیر (نويز پس زمینه) تقسیم می‌شود.

$$V_n = V_b + DC \quad (2)$$

بر اساس روابط (۲ و ۱)، نويز پس زمینه بیشترین تغییرات زمانی و مکانی را در فاز بهره‌برداری و اندازه‌گیری لیدار دارد. پارامتر بهبود نرخ سیگنال به نويز با در نظر گرفتن P_b به‌عنوان توان نويز پس زمینه آسمان با رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$G_{imp} = \frac{SNR_{Max}}{SNR_{Unpol}} = \sqrt{\frac{P_b^{min} + P_b^{max}}{P_b^{min}}} = \sqrt{1 + \frac{P_b^{max}}{P_b^{min}}} \quad (3)$$

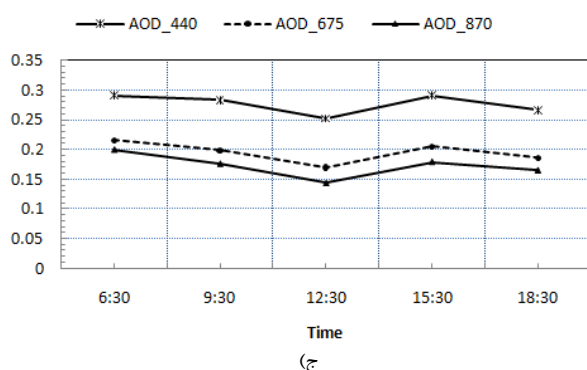
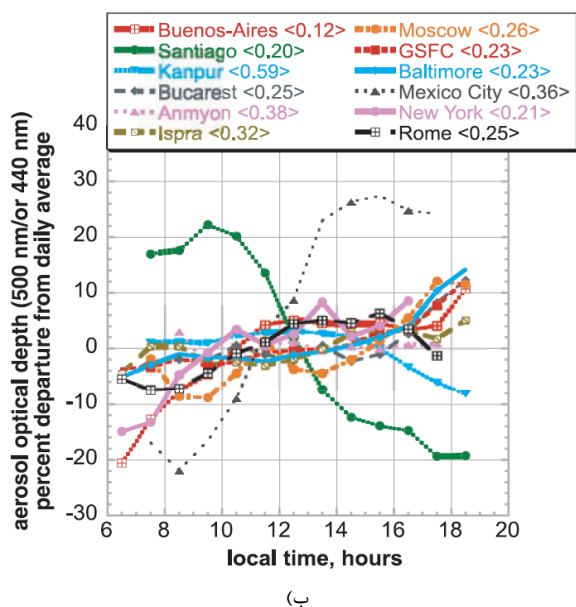
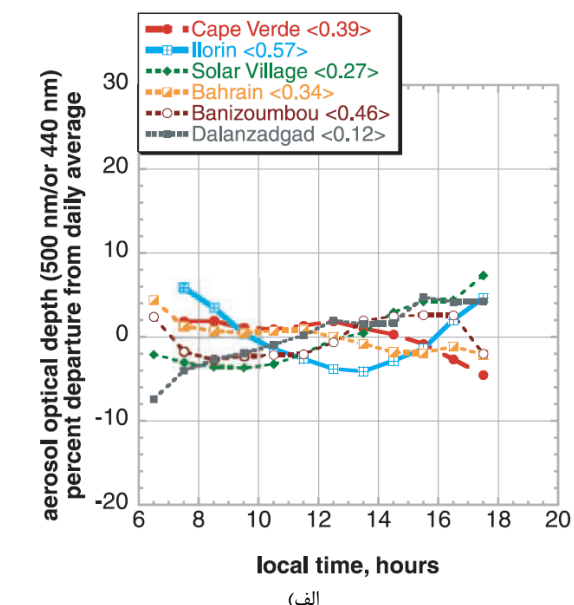
یکی از مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با نويز پس زمینه اتمسفر، زاویه تابش خورشید یعنی زاویه زینت است. در فاز طراحی محموله لیدار، به‌دلیل این‌که ماهواره در مدار قرار ندارد و هنوز داده‌ای اخذ و اندازه‌گیری حاصل نشده است، برای بررسی دقیق‌تر نقش زاویه زینت بر نرخ سیگنال به نويز در هنگام بهره‌برداری از عمق نوری ابروسل‌ها (AOD) استفاده می‌شود. از این‌رو، ابتدا می‌بایست عمق نوری ابروسل‌ها (τ یا AOD) با استفاده از اندازه‌گیری دقیق زمینی (دستگاه سان‌فتومتر) محاسبه و اندازه‌گیری شود. شدت نور خورشید هنگامی که از جو عبور می‌کند، توسط هواویزهای موجود در جو با فرآیندهای جذب و پراکنش تضعیف می‌شود (شکل ۱۰). با استفاده از قانون بیر-لامبرت، رابطه بین شدت نور عبوری از جو (شدت نوری که به دستگاه نورسنج می‌رسد)، شدت نور قبل از ورود به جو و عمق نوری جو از رابطه ۴ به‌دست می‌آید:

$$I = I_0 \exp(-m\tau(\lambda)) \quad (4)$$

که I شدت تابش نور رسیده به سطح زمین (دستگاه نورسنج خورشیدی) در طول موج مشخص λ و زاویه سرسوی z بوده و I_0 شدت نور تابیده شده به تارک جو است. m بیانگر جرم هوای در مسیر عبور پرتو و τ عمق نوری جو است [۲۸].

مسیر AB در شکل ۱۰ در طول یک شبانه‌روز کاملاً با زاویه زینت خورشید (z) تغییر می‌کند و در واقع با بررسی اثر تغییرات AOD می‌توان نقش زاویه زینت را در هنگام بهره‌برداری مشخص نمود. شایان ذکر است در این مطالعه داده‌های AOD مرکز داده‌های سان‌فتومتر ناسا (ایرونِت) از سراسر دنیا استفاده شده است. از آن‌جا که در ایران فقط در شهر زنجان این مرکز تأمین داده وجود دارد، انتخاب به همین شهر محدود می‌شود. به‌عبارت دیگر، ملاک انتخاب شهرهای دنیا، وجود مراکز داده AERONET بوده است.

تغییرات ساعتی عمق نوری ابروسل‌ها در طول روز در لایه مرزی اتمسفر با تغییرات زاویه تابشی خورشید (زاویه زینت) مرتبط است. عمق نوری هواویزها با انتگرال‌گیری از ضریب خاموشی در یک ستون جو محاسبه



شکل ۱۱: تغییرات شبانه‌روزی AOD نسبت به میانگین در طول موج‌های متفاوت (الف) در زنجان، (ب) شهرهای پرجمعیت و صنعتی دنیا و (ج) مناطق متأثر از گرد و غبار [۲۸]

Fig. 11: Changes of AOD relative to the mean during different wavelengths (a) in Zanjan, (b) populated and industrialized cities of the world and (c) dust-affected areas [28]

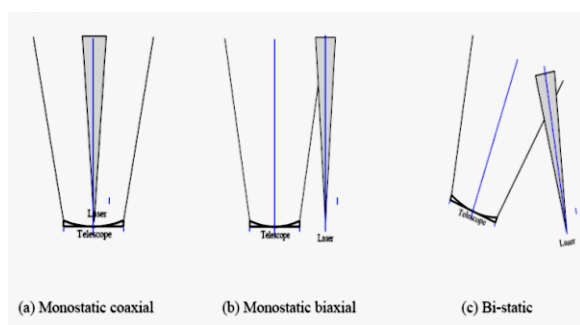
همچنین، در زوایای زنیت زیر ۵۰ درجه در ساعات حدود ۱۰ صبح و ۲ بعد از ظهر زمان مناسبی برای داده‌برداری تخمین شده است که این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در اتمسفر مرتبط است. بر اساس مطالعات جهانی انجام شده توسط اسمیرنوف و همکاران [۲۸]، بازه تغییرات شبانه‌روزی عمق نوری ایروسل‌ها بین ۱۰ تا ۴۰ درصد نسبت به مقدار میانگین شبانه‌روزی است. این تغییرات در مناطق شهری آلوده و صنعتی بیشترین و در مناطق روستایی کمترین مقدار را دارد. با استفاده از نتایج لیو و همکاران، در چین و به‌علت تشابهات منطقه‌ای می‌توان گفت در زنجان، علت این تغییرات شبانه‌روزی در عمق نوری هواویزها احتمالاً ناشی از تغییر خواص شیمیایی هواویزها (ترکیب هواویزهای گردوغبار و هواویزهای شهری صنعتی) و شرایط هواشناسی منطقه می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود که الگوی تغییرات شبانه‌روزی عمق نوری هواویزها در شهرهای صنعتی و پرجمعیت دنیا نظیر مکزیکوسیتی دارای تغییرات حدود پنجاه درصد و سانتیاگو حدود ۴۰ درصد است. شکل ۱۱-ج مربوط به برخی دیگر از مناطق جهان نظیر کیپ ورده واقع در غرب آفریقا، ایلورین، نیجریه و بحرین که نمونه‌هایی از مناطقی هستند که متأثر از رویدادهای گردوغبار می‌باشند، تغییرات شبانه‌روزی کمتر از ده درصد است. تغییرات در شهر زنجان تقریباً مشابه تغییرات در برخی از مناطق دنیا نظیر کانپور (با تغییرات شبانه‌روزی حدوداً ده درصدی) در شمال هند و شهر رم در ایتالیا (با تغییرات شبانه‌روزی ده تا پانزده درصد) که متأثر از آلاینده‌های شهری-صنعتی و گردوغبار هستند، می‌باشد.

همچنین، از دیگر الزامات برای بهبود نرخ سیگنال به نویز در فاز بهره‌برداری که با زاویه‌های تابشی خورشید در طول روز مرتبط است نوع تکنیک گسسته‌سازی قطبش سیگنال است [۲۹].

بهبود نرخ سیگنال به نویز از روی اندازه‌گیری لیدار با استفاده از روش انتخاب- رهگیری قطبیده برای کاهش مؤلفه‌های نویز پس زمینه نرخ سیگنال به نویز را در مقایسه با آشکارسازی و قطبیده به‌طور واضح افزایش می‌دهد. نتایج، نشان می‌دهد این تکنیک برای ساعات روز و در شرایط حضور نویز پس زمینه آسمان در طول موج ۵۳۲ نانومتر نرخ سیگنال به نویز به‌میزان حدود ۳/۳ و در بهره‌مندی از رنج لیدار حدود ۳۴ درصد نسبت به حالت موج واقطبیده افزایش خواهد داشت. این بهبود، برای سایر لیدارهایی که هم به‌صورت نقطه‌ای و هم قائم اسکن می‌کنند در هنگام طلوع و غروب خورشید که زوایای پراکنش بیشترین است رخ می‌دهد. همچنین، با زاویه زنیت زیر ۵۰ درجه حدود ساعات ۱۰ صبح و ۲ بعد از ظهر این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در جو مرتبط است. هرچند بررسی تأثیر میزان ابرناکی بر نرخ سیگنال به نویز کمی پیچیده و تا حدودی مبهم است. تغییرات شبانه‌روزی نرخ سیگنال به نویز می‌تواند به‌علت تغییرات رطوبت نسبی، عمق نوری ایروسل‌ها و تغییرات زاویه تابش خورشید رخ دهد.

تفکیک قائم، هدایت پرتو و ملاحظات واگرایی، کارایی و اثربخشی بهتری دارد.

برای محموله‌های لیدار با هر مأموریتی، انطباق‌پذیری با تعداد فوتون‌های ورودی (به‌منظور دسترسی به بالاترین قدرت تفکیک مکانی چه افقی و چه عمودی در فاصله اندازه‌گیری) به‌عنوان یک ملاحظه باید رعایت شود. در یک سامانه لیدار اپتیکی صفحه و فاصله کانونی متأثر از بازده کوانتومی (میزان بازدهی انتقال‌دهی فوتون‌ها به الکترون‌ها) است که وابسته به میزان سیگنال به نویز است و در نهایت، نقش چیدمان هندسی بر نرخ سیگنال به نویز را نشان می‌دهد. از این‌رو، در محموله‌های لیدار فارغ از مأموریت آن، انطباق‌پذیری با تعداد فوتون‌های ورودی به‌منظور دسترسی به بالاترین قدرت تفکیک مکانی چه به صورت افقی و چه عمودی، به‌عنوان یک ملاحظه می‌بایست رعایت شود.



شکل ۱۳: (الف) چیدمان طراحی لیدار و میدان دید متناسب با آن، (ب) میزان همپوشانی میدان دید لیزر و تلسکوپ در ساختار منواستاتیک [۳۱]
Fig. 13: a) Lidar design arrangement and field of view corresponding to it, b) overlap of laser and telescope field of view in the monostatic structure [31]

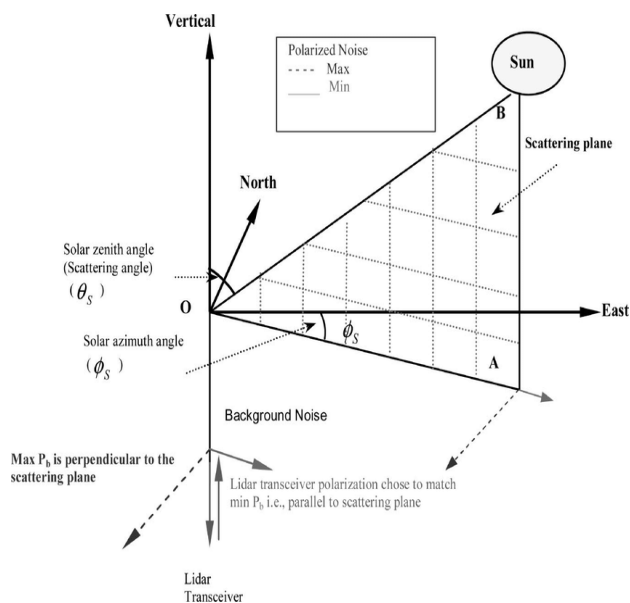
تأثیر چیدمان هندسی بر نرخ سیگنال به نویز در لیدارهای رامن و دیال (لیدارهای جذبی) به مراتب پیچیده‌تر از لیدارهای پس پراکنشی است. چالش اصلی در فاز بهره‌برداری و طی روز جهت بهبود نرخ سیگنال به نویز، نویز پس زمینه آسمان (BGP) است. این حساسیت در لیدارهایی که از فناوری رامن استفاده می‌کنند، بیشتر مشهود است [۳۱].

حذف نویزهای پس زمینه در طول روز و هنگامی که همپوشانی کامل بین میدان دید لیزر و تلسکوپ ایجاد می‌شود، مسأله بسیار با اهمیتی است و لازم است این قید در طراحی‌ها حتماً لحاظ گردد.

ج) آشکارساز و محدودیت‌های زیرسیستم آشکارساز

آشکارساز یک المان الکترواپتیکی است که انرژی نور را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و ابتدا شدت نور را به‌صورت کمی اندازه‌گیری و سپس موج (نور) الکترومغناطیس را در ناحیه خارج از طیف مرئی ثبت می‌نماید. در سیستم‌های لیدار معمولاً از فتو مالتی تیوب (PMT) به‌عنوان آشکارساز، برای ثبت سیگنال پس پراکنشی در طیف مرئی و فرابنفش و سیگنال لیدار رامن استفاده می‌شود. فتودیودهای بهمنی (APD) نیز برای ثبت سیگنال‌های برگشتی (پس پراکنشی) در محدوده مادون قرمز کاربرد دارند.

نکته مهمی که در این حوزه می‌بایست مورد توجه قرار گیرد، بهبود نرخ سیگنال به نویز در خروجی PMT است. با در نظر گرفتن شرایط فاصله کانونی کم f_s و زیاد f_L برای تلسکوپ، در رژیم نویز شات، ضریب بهبود نرخ سیگنال به نویز SNR_{imp} به‌عنوان تابعی از نویز پس زمینه آسمان (BGP) در فواصل کم و زیاد کانونی تلسکوپ بیان می‌شود. علاوه بر موارد فوق و مطابق با نظریه پراکنش یگانه، کمترین شدت نویز پس زمینه آسمان زمانی است که جهت قطبش موج با زاویه آزیموت خورشید معادل باشد و از این‌رو، اثر زاویه آزیموت بر بهبود نرخ سیگنال به نویز قابل بررسی می‌باشد. (شکل ۱۲)



شکل ۱۲: نقش زاویه زینت و آزیموت در ملاحظات نویز پس زمینه آسمان [۳۰]
Fig. 12: Zenith and azimuth angle role in sky background noise considerations [30]

د) تأثیر چیدمان هندسی و مشخصات تلسکوپ بر نرخ SNR

چیدمان هندسی سامانه‌های لیدار مطابق شکل ۱۳ شامل سه نوع ساختار فیزیکی است.

ساختار منواستاتیک به‌عنوان یک سامانه پیشرفته اغلب در همه سکوها خصوصاً سکوه‌های فضایی، استفاده می‌شود. چیدمان سامانه‌های لیدار دارای لیزر پالسی منواستاتیک می‌باشد که لیزر و تلسکوپ در کنار هم قرار دارند. این ساختار، نسبت به ساختار بای‌استاتیک از نظر قدرت

همچنین، زاویه زنیت زیر ۵۰ درجه در ساعات ۱۰ صبح و ۲ بعد از ظهر مشاهده می‌شود که این امر کاملاً با زاویه تابش خورشید و میزان پراکنش نور در جو مرتبط بوده و زمان مناسبی برای داده‌برداری در منطقه ایران خصوصاً زنجان می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج حاصله، هنگام طلوع و غروب خورشید که بیشترین پراکنش وجود دارد، نرخ سیگنال به نویز را تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی عمق نوری ایروسل‌ها پیش‌بینی می‌شود در اتمسفر ایران به‌جز در مناطق صنعتی و آلوده، زاویه زنیت تا حدود میانگین ۱۵ درصد بر نرخ سیگنال به نویز در زمان داده‌برداری محموله لیدار مؤثر باشد که البته این مقدار برای مناطق آلوده نظیر تهران تا حدود ۴۰ درصد و بیشتر پیش‌بینی می‌شود. به‌عنوان مثال همپوشانی ایجاد شده بین پرتو لیزر و میدان دید تلسکوپ، در لیدارهایی با ساختار هندسی بای‌اکسیال، مهم‌ترین جنبه از ملاحظات نویز در یک سامانه لیدار می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Imai T, Kawamura Y, Tanioka N, Asai K, Itabe T, Uchino O, Kobayashi T, Sasano Y, Aoyagi T. NASDA ELISE (MDS-lidar) program. Proc. of SPIE. 1997; 3218: 177-183. <https://doi.org/10.1117/12.295656>
- [2] Mori T and Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*. 1973; 21(5): 571-574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- [3] An H, Zhang K. Functional Safety Design of Lidar System for Autonomous Vehicles. 2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2022. <https://doi.org/10.1109/AEECA55500.2022.9919087>
- [4] Jayakumar P. Modeling and identification in structural dynamics. [dissertation]. California Institute of Technology, Pasadena, California, 1987.
- [5] Morciano A, Perenzoni M, D'Amico S. Signal-to-Noise Ratio in Pulsed Mode SiPMs for LiDAR Applications. 2021 International Conference on IC Design and Technology (ICIDT), Dresden, Germany: 2021. <https://doi.org/10.1109/ICIDT51558.2021.9626464>.
- [6] Schaap M, Apituley A, Timmermans R.M.A., Koelemeijer R.B.A., de Leeuw G. Exploring the relation between aerosol optical depth and PM2.5 at Cabauw, the Netherlands. *Atmos. Chem. Phys.* 2009; 9: 909-925.

شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که خصوصاً در اندازه‌گیری‌های قائم، کمینه‌کردن نویز پس زمینه آسمان در بهبود نرخ سیگنال به نویز تأثیر زیادی دارد. البته در این حالت طراحی مناسب دهانه تلسکوپ نیز حائز اهمیت است.

بزرگترین نقص یک محموله لیدار با الگوریتم چیدمان کواکسیال که پرتو لیزر بر محور میدان دید تلسکوپ منطبق است، این است که مسأله اشباع آشکارساز از سیگنال‌های پراکنش غیرمفید و مزاحم در اپتیک گسیلنده لیدار رخ داده و در کاهش نرخ سیگنال به نویز مؤثر بوده و به‌عنوان یک عامل منفی همیشه مطرح می‌شود. اگرچه الگوریتم چیدمان لیدارهای بای‌اکسیال که در آن‌ها گسیلنده لیزر و تلسکوپ در کنار هم قرار دارند، می‌تواند به عنوان یک رهیافت عملیاتی در حل این مشکل مطرح شود، اما از سوی دیگر، پارامتر شکل هندسی لیدار (GF)، تأثیر منفی بر کمیت و کیفیت داده‌های ثبت شده در رنج کوتاه را دارد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق، علاوه بر آن‌که ملاحظات موجود در طراحی فرستنده و گیرنده محموله لیدار و استخراج داده از این محموله را بیان نموده و نگاشت آن‌ها را با توجه به کاربردهای مختلف به فناوری‌های مرتبط ارائه می‌کند، اثرات محیطی مهم را که در این‌جا تشعشع و محیط حرارتی است، مورد بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق، نه تنها می‌تواند برای بهره‌برداری در مطالعات موردی کارگشا باشد، بلکه امکان تکمیل دستاوردهای این تحقیق با بررسی و افزودن ملاحظات دیگر و همچنین توسعه آن‌ها در سطح زیرسیستم‌ها یا المان‌های دیگر محموله نیز وجود دارد.

مأموریت‌های اندازه‌گیری ایروسل‌ها، طراحی مشخصات فنی فرستنده لیزر و سناریو مأموریت اندازه‌گیری دی‌اکسیدکربن و ازون در الزامات فنی تلسکوپ (سامانه اپتیکی) محدودکننده خواهد بود.

همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد در خصوص پارامترهای محیطی تشعشعی، محاسبه آسیب دوز یونیزان کل به‌عنوان یک گلوگاه طراحی، افت بازده عملکرد ماژول لیزر را موجب شده و در زیرسیستم کنترل حرارت با استفاده از شاخص بحرانی توان به وزن، کنترل حرارت فعال و غیرفعال را تعیین می‌نماید.

در ادامه این پژوهش، ملاحظات سیستمی و عوامل مؤثر بر نرخ سیگنال به نویز در فاز طراحی و بهره‌برداری محموله لیدار ماهواره‌های سنجشی بررسی گشته و با تأکید بر فاز بهره‌برداری و داده‌برداری به تأثیر تغییرات زاویه زنیت و نویز پس زمینه آسمان اشاره شد. چالش‌های فنی تأثیر ساختار هندسی و نحوه جانمایی لیدار، اپتیک و الکترونیک در بهینه‌کردن نرخ سیگنال به نویز از موارد دیگری است که در مقاله به آن پرداخته شده است.

نتایج، نشان می‌دهد تغییرات عمق نوری ایروسل‌ها در ساعات مختلف روز و به تبع آن تغییرات زاویه زنیت بین ۱۰ تا ۴۰ درصد مبتنی بر شرایط اتمسفر می‌تواند بر نرخ سیگنال به نویز لیدار مؤثر باشد.

- [18] do Carmo J. P. and et al. Atmospheric LIDar (ATLID): pre-launch testing and calibration of the European space agency instrument that will measure aerosols and thin clouds in the atmosphere. *Atmosphere*. 2021; 12(1):76. <https://doi.org/10.3390/atmos12010076>
- [19] Abshire J.B. NASA's space lidar measurements of the earth and planets. IEEE Photonics Society Meeting, University of Maryland, 2011. <https://doi.org/10.1364/FIO.2010.SMB1>
- [20] Ma G, Vukobratovich D, Valente T.M, Valente M.J. Design and construction of an optical system for infrared target simulator. *Proceedings of the SPIE*. 1995; 2469: 53-56. <https://doi.org/10.1117/12.210634>
- [21] Ott M.N., Coyle D.B., Canham J., Leidecker H. Qualification and issues with Space Flight Laser Systems and Components. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 6100. 2006; <https://doi.org/10.1117/12.674042>
- [22] M. Khoshshima, M. Shahriary, S. Ghazanfarinia, S. Emami, Y. Saffar, "Thermal Modeling of Lidar Payload in a Remote Sensing Satellite under System Level Considerations with a Review on its Challenges," *Space Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 79-91, 2003. [In Persian]
- [23] ECSS Secretariat. Thermal analysis handbook. Noordwijk, The Netherlands, ESA Requirements and Standards Division, 2016.
- [24] Hönninger C. et al. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers. *Applied Physics B*. 1999; 69:3-17. <https://doi.org/10.1007/s003400050762>
- [25] Johnson A.H, Miyahira T.F. Radiation Degradation Mechanisms in laser diodes. *IEEE Transactions on Nuclear science*. 2004; 51(6): 3564-3571. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.839166>
- [26] Khoshshima M, Amjadifard R, Zamani Moghadam S, Ghazanfarinia S. Effect of total ionizing dose damage on laser subsystem of space lidar payloads. *Journal of the Earth and Space Physics*. 2018; 44(1): 163-167-91. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2017.60296>
- [27] Khoshshima M, Amjadifard R, Zamani Moghadam S. Investigating the space environmental requirements in reducing the functional risk of the laser payload of the remote sensing satellite lidar: the effect of the total ionizing dose in the design. *16th international conference of Iranian Aerospace Society papers*, 2017. [In Persian]
- [28] Smirnov A, Holben B. N, Eck T. F, Slutsker I, Chatenet B, Pinker R. T. Diurnal variability of aerosol optical depth observed at aeronet (aerosol robotic network) sites. *geophysical research letters*. 2002; 29(23): 30-1 - 30-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL016305>
- [29] Hassebo Y, Gross B, Moshary F, Ahmed S. Lidar signal-to-noise ratio improvements by receiver aperture design analysis and optimization techniques. *Junior Scientist Conference*: 2006: Vienna, Austria.
- <https://doi.org/10.5194/acp-9-909-2009>
- [7] Nakajima T, Hayasaka T, Higurashi A, Hashida G, Moharram-Nejad N, Najafi Y, Valavi H. Aerosol Optical Properties in the Iranian Region Obtained by Ground-Based Solar Radiation Measurements in the summer of 1991. *Journal of Applied Meteorology*. 1996; 35: 1265-1278. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1265:AOPITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1265:AOPITI>2.0.CO;2)
- [8] Chih-Chung W, Hui-Hsuan Y. Comparative influences of airborne pollutants and meteorological parameters on atmospheric visibility and turbidity. *Atmospheric Research*. 2010; 96: 496-509. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.12.005>
- [9] Guo J, Xiao-Ye Zh, Hui-Zheng C, Sun- Ling G, Xingqin A, Chun-Xiang C, Jie G, Hao Zh, Ya-Qiang W, Xiao-Chun Zh, Min X, Xiao-Wen L. Correlation Between PM Concentrations and Aerosol Optical Depth in Eastern China. *Atmospheric Environment*. 2009; 43(37): 5876-5886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.026>
- [10] Crockett S.K. Mechanical Design of a LIDAR system for Space Applications LITE. *Proc. SPIE 1222, Laser Radar V*, <https://doi.org/10.1117/12.18382>
- [11] Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, Alpers M, Millet B, Abshire JB, Bovensmann H, Burrows JP, Chevallier F, Ciais P, et al. MERLIN: A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane. *Remote Sensing*. 2017; 9(10):1052. <https://doi.org/10.3390/rs9101052>
- [12] Cheng L, Xie C, Zhao M, Li L, Yang H, Fang Z, Chen J, Liu D, Wang Y. Design of Lidar Data Acquisition and Control System in High Repetition Rate and Photon-Counting Mode: Providing Testing for Space-Borne Lidar Sensors. 2022; 22(10):3706. <https://doi.org/10.3390/s22103706>
- [13] Cosentino A, Mondello A, Sapia A, D'Ottavi A, et. al. All-Solid-State Laser Transmitter for Space Based LIDAR Applications, 22nd Int. Laser Radar Conf.: 2004: Matera, Italy.
- [14] Evans D, Glackin D, Kunkee D, Valinia A. Working Group Report: Active and Passive Microwave Technologies. NASA Earth Science Technology Office report, ESTO 2004.
- [15] Hughen L. IEEE Citation Reference," IEEE, [Online]. Available: <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>. [Accessed: 10-Sep-2016].
- [16] Guentchev G. N, Bayer M. M, Li X, Boyraz O. Mechanical design and thermal analysis of a 12U CubeSat MTCW lidar based optical measurement system for littoral ocean dynamics. *CubeSats and SmallSats for Remote Sensing*. 2021; 11832: 71-98. <https://doi.org/10.1117/12.2597709>
- [17] Veisi Khanghahi I, Fakoor M, Shahryari M. Optimal Layout Design of a Satellite Considering Thermal Control Subsystem Constraints. *Modares Mechanical Engineering*. 2019; 19(8):1959-1969. [in Persian] <https://doi.org/10.10275940.1398.19.8.16.4>

 m.khoshsima@isrc.ac.ir



سجاد غضنفری‌نیا دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا می‌باشند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مهندسی سیستم‌های فضایی.

Ghazanfarinia, S. Researcher at Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

 s.ghazanfarinia@isrc.ac.ir



راضیه نریمانی دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات میدان از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بوده و هم‌اکنون عضو هیأت علمی پژوهشگاه فضایی ایران می‌باشند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: مخابرات ماهواره‌ای، سیستم‌های فضایی، فرستنده و گیرنده‌های مخابراتی.

Narimani, R. Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

 r.narimani@isrc.ac.ir

[30] Hassebo Y, Gross B, Min O, Moshary F, Samir A. Polarization-discrimination technique to maximize the lidar signal-to-noise ratio for daylight operations. *Applied optics*. 2006; 45(22): 5521-31. <https://doi.org/10.1364/AO.45.005521>

[31] Hassebo Y. Lidar Signal-to-Noise Ratio Improvements: Considerations and Techniques. Doctor Of Philosophy, The City University Of New York, 2007.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مسعود خوش‌سیما استادیار پژوهشگاه فضایی ایران می‌باشند. ایشان دارای مدرک دکتری در رشته فیزیک می‌باشند. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه علوم و فناوری فضایی و سنجش از دور می‌باشد. در حال حاضر، ایشان بیش از ۳۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین، در کمیته علمی و داوری بیش از ۲۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند.

Khoshsima, M. Assistant Professor at Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Citation (Vancouver): Khoshsima M, Ghazanfarinia S, Narimani R. [Systematic Analysis of Space Lidar Payload of Remote Sensing Satellites with Emphasis on the Effect of Environmental Parameters]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 187-204

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11050.1072>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluation of Surface Temperature Changes in Ilam City with a Combined Approach to Geostatistical Models and Spatial Information Systems

A. Vafaeinejad^{*1}, F. Hemati², S. Haery³¹ Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran² Faculty of Environment and Energy, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran³ Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 14 July 2024
 Reviewed: 26 August 2024
 Revised: 09 October 2024
 Accepted: 29 October 2024

KEYWORDS:

Geostatistical model
 Spatial Information System
 Surface temperature changes
 Ilam

* Corresponding author

✉ a_vafaei@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932452

Background and Objectives: Monitoring and analyzing variations in land surface temperature is essential for agriculture, biodiversity, human health, and water resources as it is a major indication of climate change. By analyzing and assessing these alterations, one can get a thorough understanding of the causes and effects of global warming and be better equipped to take preventative and remedial action against this rapidly spreading phenomena. Because remote sensing data may show the features of land phenomena and their spatial distribution at various scales, it is crucial to gather LST. Several factors need to be taken into account, including data distribution and spatial correlation analysis, associated geostatistical model investigation, model selection, and result validation. In light of the foregoing, the purpose of this research is to ascertain the trend of variations in LST in Ilam County and to propose a suitable mathematical model for the interpolation of meteorological station data in the area.

Methods: The thermal band of the Landsat 7 satellite has proven to be an effective tool in this research to study changes in surface temperature in Ilam city. The data in this band, which is recorded as thermal radiation emitted from the register, allows the surface to be calculated with a reasonable degree of accuracy. One benefit of using satellite images is their large coverage and periodicity, which allows the study of changes in surface temperature in a region and over time. This comprehensive view allows the temperature changes in Ilam city to be well-analyzed and the factors that affect these changes are identified in various locations. To do this, a regular grid with 291 points was sampled from satellite photos. Next, experimental variogram points were created using the geostatistical method, and various spatial models, including Gaussian, exponential, circular, and spherical, were fitted to the sampled data. Ultimately, distinct surface temperature maps have been produced using the normal kriging interpolation method and each of these models. The correctness of each map has been determined using statistical markers like the coefficient of determination and root mean square error.

Findings: The findings of the study demonstrate that the thermal band data from the Landsat 7 satellite exhibits a Gaussian geographical pattern, and this model provides a strong justification for the observed spatial variations in surface temperature. The findings demonstrate that the Gaussian spatial model fits the experimental variogram of surface temperature in the investigated region the best. This demonstrates that variations in surface temperature in this area are spatially autocorrelated, with the correlation between locations decreasing with increasing distance. High accuracy interpolated maps are produced by the traditional kriging approach using the Gaussian model. These maps' coefficient of determination was 0.94, indicating a good degree of agreement between the estimated and real surface temperature data.

Conclusion: The integration of remote sensing data and geostatistical methods offers a powerful tool for examining spatial variations and interpolating environmental data, including land surface temperature changes. In this study, the pattern of LST changes in Ilam County was determined using satellite remote sensing data, and the Gaussian model was introduced as the optimal spatial model for interpolating LST at weather stations. Data analysis revealed that LST in the region has increased significantly over the past few decades.



NUMBER OF REFERENCES

37



NUMBER OF FIGURES

18



NUMBER OF TABLES

7

مقاله پژوهشی

ارزیابی تغییرات دمای سطحی در شهرستان ایلام با رویکردی ترکیبی به مدل‌های زمین‌آماري و سامانه‌های اطلاعات مکانی

علیرضا وفایی نژاد^{۱*}، فرشاد همتی^۲، ثنا حایری^۳

^۱ دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ دانشکده محیط‌زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

^۳ گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: بررسی و ارزیابی تغییرات دمای سطحی، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی تغییرات آب‌وهوایی، نقشی حیاتی در سلامت انسان، کشاورزی، منابع آب و تنوع زیستی ایفا می‌کند. بررسی و ارزیابی این تغییرات، درک عمیقی از روند گرمایش زمین و پیامدهای آن به ارمغان می‌آورد و به اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و سازگاران در برابر این پدیده شتابان، کمک می‌کند. برای دستیابی به تغییرات دمای سطحی، وجود داده‌های سنجش از دور به دلیل قابلیت نمایش خصوصیات پدیده‌های زمینی و توزیع مکانی آن‌ها در مقیاس‌های گوناگون، ضروری است. بررسی توزیع و همبستگی مکانی داده‌ها، بررسی مدل‌های زمین‌آماري مرتبط، انتخاب مدل بهینه و در نهایت، صحت‌سنجی نتایج از مواردی است که باید در نظر گرفته شود. با توجه به موارد یاد شده، هدف از این مطالعه، تعیین الگوی تغییرات دمای سطحی در شهرستان ایلام و ارائه مدل ریاضی مناسب برای درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه است. **روش‌ها:** در این پژوهش، از باند حرارتی ماهواره لندست ۷ به‌عنوان ابزاری کارآمد برای مطالعه تغییرات دمای سطحی در شهرستان ایلام استفاده شده است. اطلاعات موجود در این باند، که به صورت تابش حرارتی ساطع شده از زمین ثبت می‌شود، امکان محاسبه دمای سطح را با دقت قابل قبولی فراهم می‌کند. مزیت کلیدی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، پوشش مکانی وسیع و تناوب زمانی مناسب آن‌ها است که امکان بررسی تغییرات دمای سطحی را در مقیاس منطقه‌ای و در طول زمان فراهم می‌کند. این امر دیدگاهی جامع فراهم می‌کند تا توزیع فضایی تغییرات دما در شهرستان ایلام به خوبی تجزیه و تحلیل شود و عوامل مؤثر بر این تغییرات در مقیاس‌های مختلف مکانی شناسایی شود. بدین منظور، یک شبکه منظم شامل ۲۹۱ نقطه بر روی تصاویر ماهواره‌ای نمونه‌گیری شده و سپس با استفاده از روش زمین‌آمار، نقاط واریوگرام تجربی محاسبه شده است و مدل‌های مختلف فضایی مانند گوسی، نمایی، دایره‌ای و کروی بر آن‌ها برازش شده است. در نهایت، با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی و به‌کارگیری هر کدام از این مدل‌ها، نقشه‌های جداگانه‌ای از دمای سطحی ایجاد و دقت هر یک با استفاده از شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا محاسبه شده است.

یافته‌ها: نتایج پژوهش، نشان می‌دهد که اطلاعات باند حرارتی ماهواره لندست ۷ دارای الگوی فضایی گوسی می‌باشد و تغییرات مکانی دمای سطحی با این مدل به خوبی قابل توجیه است. نتایج نشان می‌دهد که مدل فضایی گوسی بهترین برازش را برای واریوگرام تجربی دمای سطحی در منطقه مورد مطالعه دارد. این موضوع، نشان‌دهنده آن است که تغییرات دمای سطحی در این منطقه به‌صورت فضایی خود همبسته هستند و با افزایش فاصله، همبستگی بین نقاط کاهش می‌یابد. نقشه‌های درون‌یابی شده با استفاده از مدل گوسی در روش کریجینگ معمولی از دقت بالایی برخوردار هستند. ضریب تعیین این نقشه‌ها برابر با ۰/۹۴ به‌دست‌آمد که نشان‌دهنده تطابق بالای بین مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی دمای سطحی است. همچنین جذر میانگین مربعات خطای این نقشه‌ها ۱/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالای آن‌ها در برآورد دمای سطحی در نقاط مختلف منطقه است.

نتیجه‌گیری: ترکیب داده‌های سنجش از دور و روش‌های زمین‌آمار، ابزاری قدرتمند برای بررسی تغییرات مکانی و درون‌یابی داده‌های محیطی از جمله تغییرات دمای سطحی به‌شمار می‌رود. در این مطالعه، الگوی تغییرات دمای سطحی

تاریخ دریافت: ۲۴ تیر ۱۴۰۳

تاریخ داوری: ۰۵ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح: ۱۸ مهر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۸ آبان ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

مدل زمین‌آماري

سامانه اطلاعات مکانی

تغییرات دمای سطحی

ایلام

* نویسنده مسئول

a_vafaei@sbu.ac.ir

① ۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۵۲

در شهرستان ایلام با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور تعیین شده و مدل گوسی به‌عنوان مدل فضایی بهینه جهت درون‌یابی دمای سطحی ایستگاه‌های هواشناسی معرفی شده‌است. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که دمای سطحی در این منطقه در طول چند دهه گذشته به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌است.

مقدمه

داده‌های سنجش از دور قادر به نمایش خصوصیات برخی از پدیده‌های زمینی و همچنین نحوه توزیع مکانی آن‌ها در مقیاس‌های مختلف می‌باشند. از طرفی دیگر، اولین و مهم‌ترین گام در انجام درون‌یابی داده‌های برداشت‌شده صحرائی، بررسی همبستگی مکانی آن‌ها و معرفی مدل بهینه جهت اعمال وزن مناسب برای درون‌یابی آن متغیر در منطقه است. بنابراین، با کمک داده‌های سنجش از دور که مناسب متغیر مورد مطالعه باشد، امکان بررسی نحوه توزیع مکانی و تغییرات آن شاخص وجود دارد [۲،۱].

زمین آمار یا آمار مکانی مجموعه‌ای از روش‌های آماری است که همبستگی فضایی و روند تغییرات داده‌های نقاط را نسبت به یک منبع شرح و آن را در انواع مختلف مدل‌های فضایی نشان می‌دهد [۴،۳]. اخیراً کاربرد روش‌های ژئواستاتستیکی در اکولوژی طبیعی رایج شده و در این عرصه بسیار مفید واقع شده‌است [۵]. در بررسی‌های آمار کلاسیک، اجزاء یا نمونه‌هایی از کل جامعه که به منظور شناخت آن جامعه برداشت می‌شوند، فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا بوده و به عبارت دیگر، نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها مستقل از موقعیت فضایی آن‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد؛ در حالی که در زمین آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، موقعیت فضایی نمونه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد [۶]. بدین لحاظ می‌توان موقعیت فضایی نمونه‌ها را همراه با مقدار کمیت مورد نظر، تحلیل کرد. به عبارت دیگر، باید بتوان بین مقادیر مختلف یک کمیت در جامعه نمونه و فاصله و جهت قرارگیری نمونه‌ها نسبت به هم ارتباطی برقرار کرد. این ارتباط فضایی بین مقدار یک کمیت در جامعه نمونه‌های برداشت‌شده ممکن است در قالب‌های ریاضی قابل بیان باشد که به این قالب‌های ریاضی ساختار فضایی گفته می‌شود [۷].

سنجش از دور حرارتی پیرامون پردازش و تفسیر داده‌های به‌دست آمده در ناحیه مادون قرمز حرارتی و طیف الکترومغناطیس بحث می‌کند و تابش ساطع شده از سطح هدف، اندازه‌گیری می‌شود. به دلیل ماهیت متفاوت داده‌های سنجش از دور حرارتی به داده‌های سنجش از دور انعکاسی و همچنین قدرت تفکیک مکانی متفاوت این نوع داده، تاکنون در مطالعاتی مانند طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای از داده‌های سنجش از دور حرارتی صرف نظر می‌شده‌است. اما امروزه به دلیل اهمیت سنجش از دور حرارتی در مطالعات محیطی، بسیاری از محققان، تحقیقات پایه در زمینه سنجش از دور حرارتی و توسعه بیشتر فناوری سنجنده‌ها و کاربردهای جدید باندهای حرارتی را ضروری دانسته‌اند. از طرف دیگر حرارت به‌عنوان کمیت مهم ترمودینامیکی می‌تواند برای شناسایی ماده و انتقال حرارت استفاده شود؛ زیرا حرارت آن چنان عامل مهمی در درک

سیستم بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی در زمین و فضا است که با اطمینان می‌توان گفت که باید در هر مطالعه مرتبط با علوم زمین مدنظر قرار گیرد. ۹۵٪ از کل انرژی وارده به کره زمین به صورت تشعشعات خورشیدی است و تقریباً نیمی از این مقدار به حرارت تبدیل می‌شود و ۲۳٪ آن صرف پدیده تبخیر و نزولات و تنها ۱۲٪ صرف فتوسنتز گیاهان می‌شود. خورشید مهم‌ترین منبع انتشار امواج الکترومغناطیسی مورد نیاز در سنجش از دور است. تمامی مواد در درجه حرارت بالاتر از صفر مطلق از خود امواج الکترومغناطیسی ساطع می‌کنند. میزان انرژی ساطع شده از یک ماده با توان چهارم دمای ماده نسبت مستقیم دارد؛ یعنی با افزایش دما، سرعت تابش ساطع شده از ماده افزایش می‌یابد. همان‌گونه که کل انرژی ساطع شده از یک جسم با دما تغییر می‌کند، توزیع انرژی ساطع شده نیز متغیر است [۹،۸،۷].

دمای سطح زمین، یک عامل مهم در مطالعه تغییرات جهانی میزان تابش تخمینی در مطالعات تعادل گرمایی و یک عامل کنترل‌کننده در مطالعات مدل‌های اقلیمی است. علم به دمای سطح زمین برای موضوعات مربوط به زمین مانند اقلیم شناسی شهری، تغییرات محیطی جهانی و برهم کنش‌های متقابل انسان و محیط از اهمیت فراوانی برخوردار است. دمای سطح زمین می‌تواند اطلاعات مهمی درباره مشخصات فیزیکی سطح زمین و آب‌وهوا، ارائه دهد [۱۰]. برای دستیابی به این مهم، می‌توان از مزایای سنجش از دور که در دسترس بودن سریع، تصاویر با وضوح بالا، قابلیت تکرار شونده پوششی و قابلیت اندازه‌گیری شرایط سطح زمین می‌باشد، بهره برد [۱۱].

هر یک از شاخص‌های محیطی دارای رفتاری در طبیعت هستند که پیش‌بینی یا تخمین آن‌ها نیازمند گزینش روشی خاص می‌باشد. روش انتخاب‌شده تابعی از شرایط حاکم بر همان مجموعه از داده‌ها است، به طوری که برای شاخص‌های دیگر و یا شرایط محیطی دیگر صدق نمی‌کند. انتخاب نامناسب مدل بهینه باعث می‌شود تا وزن اختصاص یافته به هر یک از نقاط نقشه غیردقیق شود و در نهایت، تخمین نادرستی از آن شاخص در نقاط مورد نظر صورت گیرد. از طرفی برای تعیین مدل مناسب، به داشتن یک آمار دقیق و کافی از شاخص مورد مطالعه نیاز است؛ همچنین، محل‌های نمونه‌گیری باید نماینده خوبی از شاخص مورد نظر در منطقه مورد مطالعه باشند. رعایت همه موارد یادشده جهت منطبق نمودن مشاهده‌ها با طبیعت حاکم بر آن منطقه صورت می‌گیرد بنابراین، چنانچه منبعی وجود داشته باشد که بتواند طبیعت و نحوه تغییرات مکانی شاخص مورد مطالعه را نشان دهد، می‌تواند باعث کاهش خطای تخمین در عملیات درون‌یابی شود [۱۳،۱۲،۸]. تصاویر ماهواره‌ای دارای چنین قابلیت‌هایی هستند؛ به‌طوری که که قادر به نمایش نحوه تغییر برخی شاخص‌های زمینی

و محتوای اطلاعات بالقوه مفید باشد. این پژوهش، نشان داد که درک مفهومی محکم از اندازه‌گیری و نمونه‌برداری از طریق مدل‌های داده تا توصیف مدل‌های آماری، کلید استنتاج و پیش‌بینی مفید است. همچنین توسعه یک مدل مفهومی مناسب قبل از انتخاب روش‌های آماری فضایی ضروری می‌باشد [۳].

میرموسوی و همکاران در پژوهشی که در سطح استان اصفهان انجام گرفته است از سه روش کریجینگ ساده، معمولی و یونیورسال جهت تعیین پارامتر میانگین بارندگی سالانه استان اصفهان استفاده کردند و در نهایت روش کریجینگ معمولی با مدل واریوگرام دایره‌ای به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی اطلاعات مقادیر بارندگی سالانه انتخاب و نقشه بارندگی بر اساس این مدل تهیه شد [۱۷].

میثاقی و همکاران در تحقیقی که در حوزه آبریز رودخانه مارون انجام گرفت به این نتیجه رسیدند که روش‌های زمین آماری کریجینگ و کوکریجینگ نسبت به دیگر روش‌ها جهت استخراج خطوط هم‌باران در این حوزه آبریز برتری داشته و لذا تخمین‌گرهای کریجینگ و کوکریجینگ دارای این توانایی هستند که در نقاط فاقد آمار با دقت قابل قبولی برای برآورد نقاط مجهول استفاده شوند [۱۸].

تحقیقی به‌منظور پایش و تحلیل مکانی خشکسالی در سطح استان گلستان با استفاده از روش‌های زمین آماری انجام گرفته‌است و تعدادی ایستگاه باران سنجی با پراکنش مناسب در سطح استان انتخاب شده و سپس برای پایش و سنجش خشکسالی در هر منطقه، روش‌های GPI و IDW قطعی درون‌یابی و RBF و روش زمین آماری کریجینگ مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده روش‌های درون‌یابی کریجینگ در دوره‌های زمانی مختلف در پهنه‌بندی شدت خشکسالی، نتایج بهتری را نشان داده و مقادیر برآورد شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده دارای بیشترین میزان همبستگی و کمترین میزان ریشه میانگین مربع خطاها با استفاده از این تخمین‌گر می‌باشد [۱۹].

ایوبی و همکاران به بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از روش‌های زمین آماری و GIS در حوزه آبخیز مهر سبزوار پرداخت. آنالیزهای زمین آماری نشان دادند که مدل‌های کروی، گوسی و نمایی برای متغیرهای مورد بررسی خاک در این منطقه مناسب‌تر هستند [۲۰].

عمادی و همکاران در تحقیقی، یکپارچه کردن زمین آماری، سنجش از دور و GIS برای بهبود تشخیص کیفی تناسب اراضی در اکوسیستم‌های خشک و نیمه خشک دشت ارسنجان را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق داده‌های اولیه شامل ۸۵ نمونه خاک جمع‌آوری شده از عمق‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتیمتری و داده‌های ثانویه شامل داده‌های سنجش از دور ماهواره IRS-6P، مورد استفاده قرار گرفت. برای شناسایی وابستگی مکانی پارامترهای مهم خاک، از تخمین‌گرهای زمین آماری کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده استفاده شده و مشاهده شد که استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از ارزش‌های طیفی باند ۱ ماهواره در روش کریجینگ ساده، باعث کاهش میانگین مربعات خطا برای تهیه

می‌باشند. بنابراین، با به‌کارگیری سنجش از دور می‌توان رفتار کلی یک پدیده را مطالعه کرد و روند تغییرات آن را مشاهده نمود. لازمه استفاده از این تکنیک، شناخت ماهیت تصاویر اخذ شده توسط سنجنده‌های مختلف ماهواره‌ای و نیز نحوه ارتباط آن با عامل محیطی و شاخص مورد مطالعه می‌باشد [۱۴، ۱۵، ۱۶].

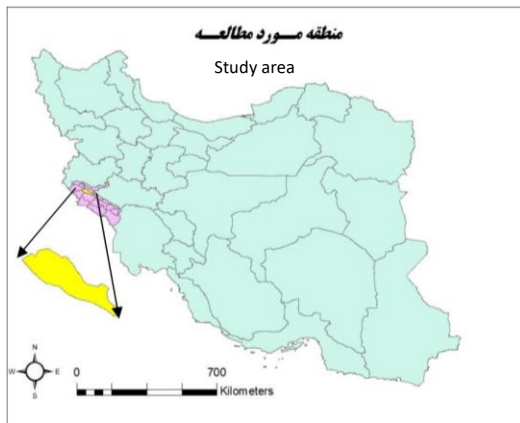
در سال ۲۰۲۳، Tavebi و همکاران مطالعه‌ای با هدف بررسی پتانسیل کاربرد روش‌های درون‌یابی برای حل مشکل پوشش ابری در تصاویر ماهواره‌ای انجام دادند. در این تحقیق از روش تخمین زمین آماری OK با انواع مختلف محله‌ها برای پیش‌بینی مقادیر پیکسل در زیر ابرها استفاده شده است. محققان ابتدا تغییرپذیری فضایی سه باند اصلی (RGB) را با برازش مدل‌های واریوگرام، بر روی واریوگرام‌های تجربی بررسی کردند. این کار اجازه داد تا رفتار فضایی داده‌ها در اطراف منطقه تحت پوشش ابر تجزیه و تحلیل شود. سپس از محله‌های مختلف برای تخمین مقادیر پیکسل در زیر ابرها استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شدند. نتایج این مطالعه، نشان داد که ابزارهای زمین آمار همراه با GIS پیش و پس از پردازش تصاویر می‌توانند با موفقیت برای محدود کردن مشکل پوشش ابری در تصاویر ماهواره‌ای اعمال شوند. این مطالعه، نشان می‌دهد که روش‌های تخمین عددی پتانسیل قابل توجهی برای حل مشکل پوشش ابری در تصاویر ماهواره‌ای دارند [۱].

Zakeri و همکاران در پژوهشی، کاربردهای مختلف شبیه‌سازی زمین‌آماري در داده‌های سنجش از دور را بررسی کردند. در این تحقیق، انواع مختلف مدل‌های شبیه‌سازی مورد بحث قرار گرفت و ویژگی‌ها و مزایای هر رویکرد بررسی شد. همچنین، کاربردهای هر مدل شبیه‌سازی در حوزه‌های مختلف علوم طبیعی، از جمله خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی و علوم جوی دسته‌بندی شد. طیف گسترده‌ای از مدل‌های شبیه‌سازی زمین‌آماري برای داده‌های سنجش از دور وجود دارد که هر کدام نقاط قوت و ضعف خود را دارند. مدل‌های پارامتریک رایج‌ترین مدل‌های مورد استفاده هستند. مدل‌های مبتنی بر TI پتانسیل استفاده کامل از محتوای اطلاعات مکانی غنی تصاویر سنجش از دور را دارند، اما هنوز به طور کامل مورد کاوش قرار نگرفته‌اند. شبیه‌سازی زمین‌آماري می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از وظایف پردازش داده‌های سنجش از دور، از جمله کاهش مقیاس، طراحی نمونه‌برداری، پر کردن شکاف و ارزیابی خطا استفاده شود. این بررسی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی زمین‌آماري یک ابزار ارزشمند برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های سنجش از دور است [۲].

Atkinson و همکاران در تحقیقی، توسعه و کاربرد مدل‌های آماری فضایی در سنجش از دور نوری ماهواره‌ای را بررسی کردند. این پژوهش بر توسعه یک مدل مفهومی متمرکز شد که شامل فرآیندهای اندازه‌گیری و نمونه‌برداری ذاتی در سنجش از دور است. تصاویر سنجش از دور تابعی از آن‌چه که در واقعیت وجود دارد و فرآیندهای نمونه‌برداری مکانی (فضا- زمان) هستند. همچنین مشخصات زمین آماری RF می‌تواند در آشکار کردن مقیاس‌های تغییرات مکانی در داده‌های مکانی

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

استان ایلام یکی از استان‌های غربی کشور می‌باشد که بین طول‌های جغرافیایی $45^{\circ}40'$ تا $48^{\circ}03'$ شرقی و عرض‌های $33^{\circ}03'$ تا $34^{\circ}02'$ شمالی قرار دارد. مساحت این استان 20150 کیلومتر مربع بوده و مرکز آن شهر ایلام می‌باشد.

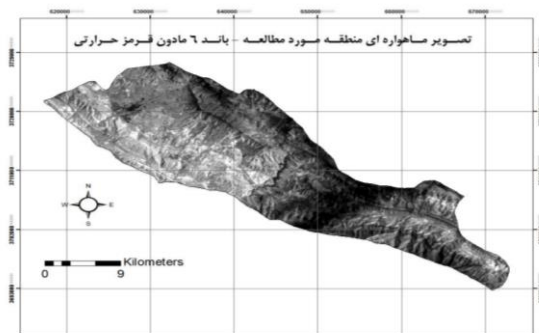


شکل ۱: منطقه مورد مطالعه
Fig. 1: Study area

روش تحقیق

پس از انتخاب باند ۶ ماهواره لندست ETM+ در تاریخ ۲۴ ام ماه می ۲۰۰۷، به عنوان نقشه بیان‌کننده نحوه توزیع درجه حرارت سطحی، اقدام به کالیبره نمودن تصویر جهت تبدیل DN تصویر به تشعشع و سپس درجه حرارت بر مبنای درجه کلونین شد. باند ۶ لندست ETM+ به صورت دو باند با نام‌های B۶۱ و B۶۲ ارائه می‌شود که باند B۶۱ را Low Gain و باند B۶۲ را High Gain می‌نامند. استفاده از Low Gain در مناطق همگن و مسطح مانند بیابان‌ها که روشنایی سطحی زیادی دارند توصیه می‌شود و از High Gain برای مناطق کوهستانی و ناهمگن استفاده می‌شود.

در این تحقیق به دلیل این که منطقه مورد مطالعه یک منطقه کوهستانی و ناهمگن است از باند B۶۲ استفاده شد. تصویر حاصل، شامل مقادیری است که هر پیکسل، درجه حرارت سطحی زمین را در آن نقطه بر حسب درجه کلونین نشان می‌دهد.



شکل ۲: تصویر ماهواره‌ای باند ۶ لندست ETM+ از منطقه مورد مطالعه
Fig. 2: Landsat ETM+ band 6 satellite image of the studied area

نقشه PH و هدایت الکتریکی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتیمتری می‌شود [۹].

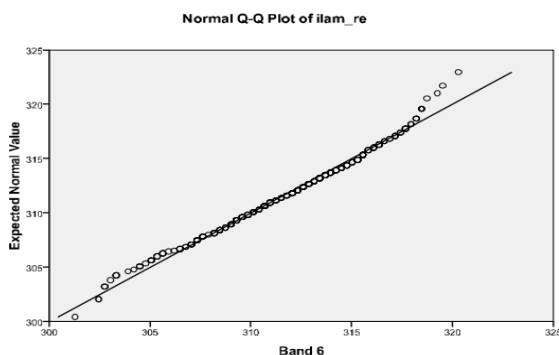
پژوهشی توسط رضایی و همکاران، با هدف بررسی تغییرات مکانی، چند شاخص مهم کیفیت آب‌های زیرزمینی در سطح استان گیلان با استفاده از زمین آمار و با داده‌های شاخص کیفیت نمونه‌برداری شده از ۱۳۵ حلقه چاه مربوط به شهریور سال ۱۳۸۶، در سطح این استان انجام گرفت. ابتدا دقت روش‌های کریجینگ معمولی و وزن‌دهی معکوس فاصله با سه توان مختلف بررسی و در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی در سطح استان رسم شد و مدل کروی، بهترین مدل برای برازش واریوگرام تشخیص داده شد [۲۱].

روش تحقیق

در این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ETM+ استفاده شده است. سنجنده این ماهواره دارای باندهایی با خصوصیات طیفی متفاوت می‌باشد. هر یک از این باندها قادر به نمایش بارزتر برخی خصوصیات زمینی هستند. به عنوان مثال، تغییرات درجه حرارت سطحی زمین در باند ترمال (باند ۶) این ماهواره نشان داده شده است [۲۳، ۲۲]. به طور کلی، از دیرباز، روش‌های مختلفی برای جمع‌آوری داده‌های مبتنی بر مکان وجود داشته است. سنجش از دور، یکی از روش‌های جمع‌آوری داده‌هاست که کمترین تماس مستقیم با اشیاء و داده‌های مورد اندازه‌گیری را دارد و بر خلاف روش‌های دیگر، که عوامل انسانی در جمع‌آوری و تفسیر داده‌های زمینی نقش دارند، در روش سنجش از دور، مسئولیت جمع‌آوری اطلاعات بر عهده سنسورها خواهد بود [۲۵، ۲۴]. تعیین درجه حرارت سطح زمین به کمک اطلاعات ماهواره‌ای از موضوعاتی است که مورد علاقه بسیاری از محققان است [۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۶]. روش متداول در این زمینه، شامل کالیبره نمودن داده‌ای طیفی باند ترمال می‌باشد. این کار با تبدیل DN باند ترمال به تشعشع طیفی بر اساس شیب تغییرات بازتابش طیفی (Gain) و عرض از مبدأ (Bias) انجام می‌شود [۳۰]. بنابراین، با قطعیت می‌توان گفت که اطلاعات این باند مبنای انجام محاسبات درجه حرارت است و به خوبی می‌تواند جهت مطالعه روند و نحوه تغییرات مکانی درجه حرارت سطحی نیز مورد استفاده قرار گیرد. با درک این مطلب، می‌توان اطلاعات این باند را جایگزین مناسبی جهت تعیین نحوه پراکندگی مکانی آمار درجه حرارت روزانه ایستگاه‌های هواشناسی نیز دانست. با مشخص شدن مدل ریاضی همبستگی مکانی اطلاعات باند ۶، درون‌یابی داده‌های درجه حرارت به دست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی یک منطقه با اطمینان بیشتری صورت می‌گیرد و خطاهای ناشی از نامناسب بودن احتمالی مدل اعمال شده به حداقل خواهد رسید و نقشه درجه حرارت که مبنای بسیاری از محاسبات دیگر است، با دقت بیشتری ساخته می‌شود. مزیت اصلی این روش این است که جهت انتخاب بهترین مدل بیانگر همبستگی یک شاخص، از اطلاعات میدانی استفاده نخواهد شد؛ بلکه اطلاعات سنجش از دور این نقش را ایفا خواهد کرد.

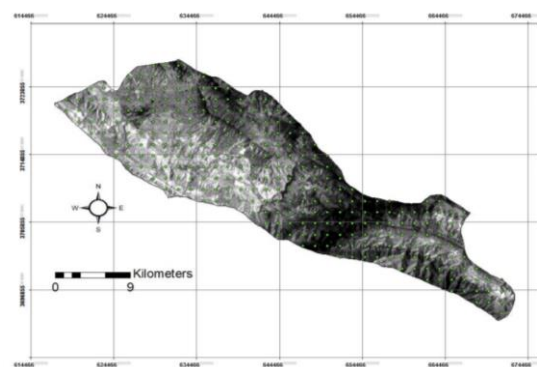
نمودار Q-Q

نمودار Q-Q، یک توزیع تجمعی با مرتب‌سازی داده‌ها ایجاد می‌کند و گرافی از مقادیر مرتب شده را در مقابل مقادیر توزیع تجمعی از $\frac{c}{c_0+c}$ برای i امین مقدار مرتب شده برای n داده محاسبه می‌کند. اگر نقاط در اطراف خط نیمساز قرار بگیرند و انحراف عمده از اطراف خط نداشته باشند، فرض نرمال بودن داده‌ها پذیرفته می‌شود. البته انحراف جزئی نقاط از قسمت بالا و پایین خط نیمساز مهم نیست.



شکل ۵: نمودار نرمال Q-Q داده‌های نمونه‌گیری شده باند ۶
Fig. 5: Normal Q-Q diagram of the sampled data of band 6

جهت به‌دست‌آوردن الگوی درجه حرارت سطحی، نیاز به نمونه‌گیری از تصویر حاصل از پروسه ذکر شده در بالا می‌باشد تا بتوان با استفاده از درون‌یابی به کمک مدل‌های موجود زمین آماری به این الگو دست یافت. در این تحقیق، از روش نمونه‌گیری منظم یا سیستماتیک استفاده شده است. جهت انجام این کار، یک شبکه منظم با رعایت فواصل ۱۵۰۰ متری روی تصویر قرار داده شد و نقاط به‌دست آمده به‌عنوان محل‌های نمونه‌برداری مشخص شد. تعداد ۲۹۱ نقطه به‌دست آمد و سپس نسبت به جداسازی مقادیر عددی باند ۶ در نقاط مورد نظر، اقدام شد.



شکل ۳: تصویر منطقه مورد مطالعه به همراه نقاط نمونه‌گیری شده
Fig. 3: Image of the study area with the sampled points

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

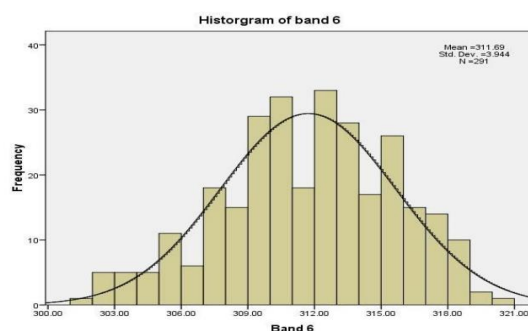
این آزمون، یک آزمون آماری ناپارامتری است و جهت بررسی این که آیا داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند یا خیر به کار می‌رود. در این آزمون یک آماره محاسبه می‌شود که با توجه به سطح معنی داری تعیین شده است. اگر مقدار آماره از سطح معنی دار بیشتر شود، فرض نرمال بودن داده‌ها پذیرفته می‌شود در غیر این صورت، داده‌ها نرمال نیستند. جدول ۱ آزمون کولموگروف-اسمیرنوف را برای داده‌های نمونه‌گیری شده باند ۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص می‌باشد، با توجه به این که مقدار آماره برابر 0.2 به‌دست آمده است، بنابراین با اطمینان 95% می‌توان گفت که داده‌های نمونه‌گیری شده دارای توزیع نرمال می‌باشند و فرض نرمال بودن داده‌ها پذیرفته می‌شود.

به‌منظور مقایسه روش‌های به کار برده شده در این تحقیق و انتخاب مناسب‌ترین مدل زمین آمار، از تکنیک ارزیابی متقاطع استفاده شده است. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای کلیه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به‌طوری که در نهایت به تعداد نقاط مشاهده‌ای، مقادیر برآوردی وجود داشته باشد. جهت ارزیابی و تعیین بهترین مدل، دقت هر یک از نقشه‌های تولید شده محاسبه می‌شود.

آزمون‌های نرمال بودن داده‌ها

نمودار هیستوگرام

هیستوگرام یک توصیف تک متغیره از داده‌ها را فراهم می‌کند. این نمودار فراوانی توزیع را برای یک مجموعه داده محاسبه کرده و خلاصه وضعیت آماری داده‌ها را محاسبه می‌کند. هیستوگرام داده‌های نمونه باید به شکل زنگوله توزیع نرمال باشد و یا حداقل شبیه به آن باشد و دارای چولگی نباشد.



شکل ۴: هیستوگرام داده‌های نمونه‌گیری شده باند ۶
Fig. 4: Histogram of the sampled data of band 6

جدول ۱: آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های نمونه‌گیری شده باند ۶

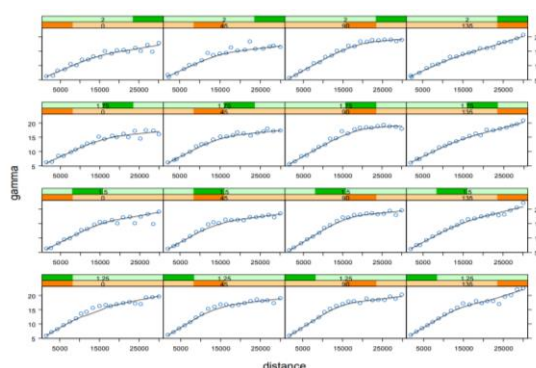
Table 1: Kolmogorov-Smirnov test for band 6 sampled data

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف Kolmogorov-Smirnov test	Tests of Normality			Shapiro-Wilk		
	Kolmogorov-Smirnov					
	Statistic	Df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Band-6	.043	291	.200	.987	291	.011

و همچنین واریانس داده‌های کل منطقه به نقاط نمونه‌گیری شده، نتیجه می‌شود که نمونه‌های انتخاب شده می‌توانند نماینده خوبی برای کل منطقه باشند.

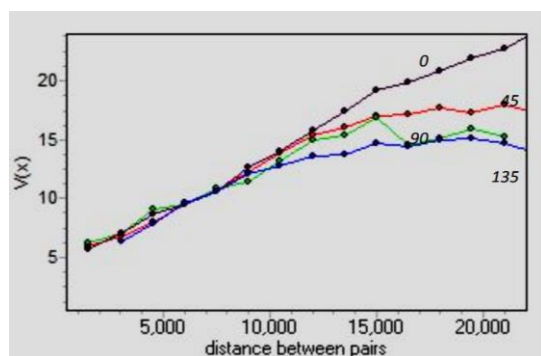
بررسی همسانگردی و ناهمسانگردی در داده‌ها

جهت تشخیص همسانگردی در داده‌ها، واریوگرام آن‌ها در حداقل ۴ جهت (۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵) و با نسبت‌های ناهمسانگردی ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵ و ۲ رسم می‌شود. نتایج این تحلیل در شکل ۷ دیده می‌شود. همچنین شکل ۸، واریوگرام داده‌ها را در ۴ جهت ذکر شده در یک نمودار واحد نشان می‌دهد.



شکل ۷: بررسی همسانگردی داده‌ها در جهت‌های مختلف

Fig. 7: Examining data isotropy in different directions



شکل ۸: واریوگرام داده‌ها در جهت ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه

Fig. 8: Variogram of data in 4 directions 0, 45, 90 and 135 degrees

با توجه به این‌که نمودار واریوگرام داده‌ها در جهات رسم شده اختلافی با یکدیگر ندارند در نتیجه داده‌های نمونه‌گیری شده، همسانگرد می‌باشند؛ یعنی با افزایش فاصله در تمام جهات، تغییرپذیری داده‌ها یکسان است. همچنین با استفاده از واریوگرام رویه‌ای داده‌ها نیز می‌توان به همسانگردی داده‌ها پی برد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، تغییرپذیری داده‌ها در مرکز تصویر به صورت یک دایره نمایان می‌شود.

جدول ۲: شاخص‌های آماری داده‌های باند ۶ ماهواره لندست مربوط به کل منطقه و نقاط نمونه‌گیری شده

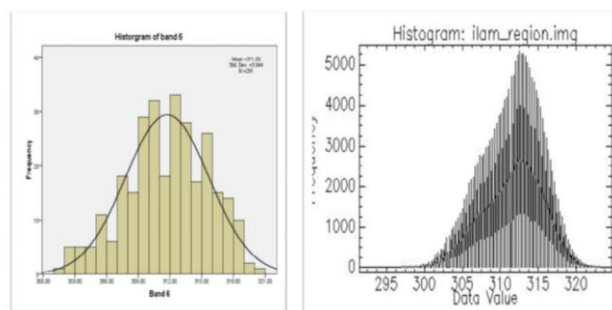
Table2: Statistical indicators of band 6 Landsat satellite data related to the entire region and sampled points

واریانس	انحراف معیار	میانگین	مقدار حداکثر	مقدار حداقل	تعداد نقاط (پیکسل)	مجموعه داده‌ها
Variance	Standard deviation	Average	The maximum value	Minimum amount	The number of points (pixels)	Data set
15.507	3.938	311.676	324.625	291.481	560512	کل منطقه The whole area
15.25	3.94	311.69	320.29	301.28	291	نقاط انتخابی Selected points

بدین منظور، مقادیر تخمین زده شده در محل نقاط از روی نقشه‌ها استخراج و با مقادیر اولیه نمونه‌گیری شده بر روی یک نمودار قرار می‌گیرند. با برازش خط مستقیم بر آن‌ها و محاسبه ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده، میزان دقت نقشه‌ها و یا مدل‌های اعمال شده تعیین می‌شود. ضریب همبستگی شاخصی است که جهت و مقدار رابطه بین دو متغیر (مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده) را توصیف می‌کند. اگر مقادیر دو متغیر مانند هم تغییر کنند یعنی با کم یا زیاد شدن یکی دیگری هم کم یا زیاد شود به گونه‌ای که بتوان رابطه آن‌ها را به صورت یک معادله بیان کرد، بین این دو متغیر همبستگی وجود دارد. نمودار پراکنش یا دیاگرام پراکنش بهترین تصویر برای نشان دادن همبستگی بین دو متغیر است. با مشخص شدن بهترین مدلی که قادر به توجیه مکانی اطلاعات باند ۶ ماهواره لندست می‌باشد، مدل بهینه جهت توجیه مکانی درجه حرارت سطحی نیز به دست آمد. بنابراین با اطمینان زیادی می‌توان این مدل را جهت برازش و تخمین داده‌های درجه حرارت منطقه مورد مطالعه استفاده نمود [۳۳، ۳۲، ۳۱].

بررسی نرمالیت داده‌ها

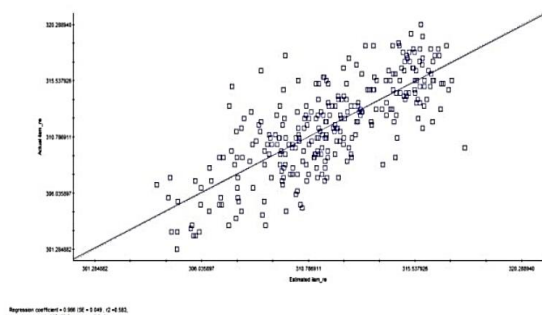
شکل ۶ هیستوگرام‌های مربوط به اطلاعات برداشت شده از باند ۶ ماهواره لندست ETM+ مربوط به کل منطقه مطالعاتی و نیز هیستوگرام نقاط برداشت شده انتخابی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: هیستوگرام مقادیر عددی باند ۶ (الف) کل منطقه مورد مطالعه (ب) نقاط نمونه‌گیری شده

Fig. 6: Histogram of the numerical values of band 6 (a) the entire studied area (b) the sampled points

با اعمال تست نرمالیت کولموگروف - اسمیرنوف و به دست آمدن مقدار p-value برابر ۰.۶۵۹ نتیجه می‌شود که داده‌های نمونه‌گیری شده از توزیع نرمال برخوردارند. سایر شاخص‌های آماری این داده‌ها نیز در جدول ۲ آمده است. با توجه به نزدیکی مقادیر میانگین و انحراف معیار



شکل ۱۱: نمودار ارزیابی نقاط واقعی و برآورد شده بر اساس مدل کروی
Fig. 11: Evaluation diagram of actual and estimated points based on the spherical model

مدل نمایی

بر اساس مدل نمایی، نقشه درونیابی شده تخمین گر کریجینگ معمولی و همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده، در جدول ۴ و شکل ۱۲ آورده شده است. همچنین خط رگرسیونی نقاط واقعی و برآورد شده این مدل مطابق شکل ۱۳ می باشد. و ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و برآورد شده بر طبق این مدل، ۰.۷۵۵۹ به دست آمد.

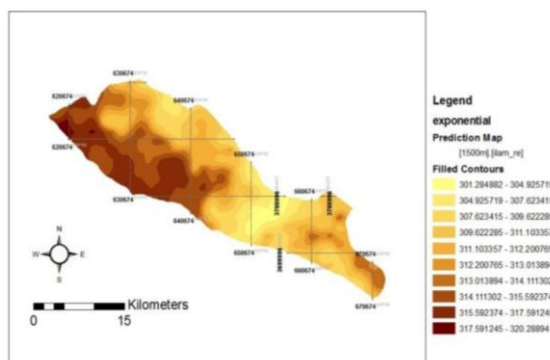
جدول ۴: پارامترهای برآورد شده مدل نمایی بر اساس تخمین گر کریجینگ معمولی

Table 4: The estimated parameters of the exponential model based on the normal kriging estimator

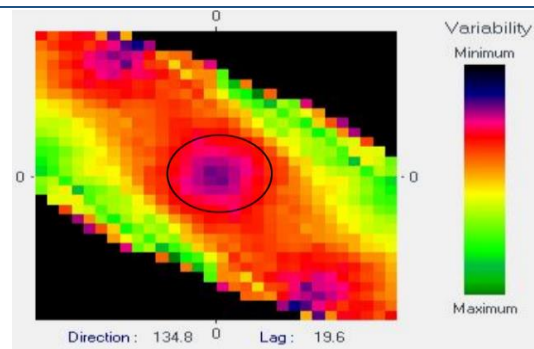
Exponential Model:

corr(Obs, Pred): 0.7559 [using ordinary kriging]

	observed	predicted	pred.-obs.	pred.std.	zscore
minimum	301.3	303.4	-8.299	2.13	-3.797
1st q.	309	309.7	-1.652	2.131	-0.7657
median	312.1	311.7	0.0811	2.131	0.04134
3rd q.	314.8	314.4	1.787	2.2	0.8035
maximum	320.3	318	8.117	2.739	3.276
n	291	291	291	291	291
mean	311.7	311.7	0.0111	2.178	0.002006
std.dev.	3.944	3.178	2.589	0.09178	1.186



شکل ۱۲: نقشه پیش بینی حاصل از درونیابی به روش کریجینگ معمولی بر اساس مدل نمایی
Fig. 12: Prediction map resulting from interpolation using the normal kriging method based on the exponential model



شکل ۹: واریوگرام رویه ای
Fig. 9: Procedural variogram

تخمین نقاط مجهول بر اساس مدل های ورودی به تخمین گر کریجینگ

مدل کروی

بر اساس مدل کروی، نقشه درونیابی شده تخمین گر کریجینگ معمولی [۳۷،۳۶،۳۵،۳۴] و همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده، در جدول ۳ و شکل شماره ۱۰ آورده شده اند. همچنین، نمودار ارزیابی نقاط واقعی و برآورد شده این مدل مطابق شکل ۱۱ می باشد و در نهایت ضریب همبستگی بین مقادیر ورودی و برآورد شده بر اساس مدل کروی، ۰.۷۵۸۸ به دست آمد.

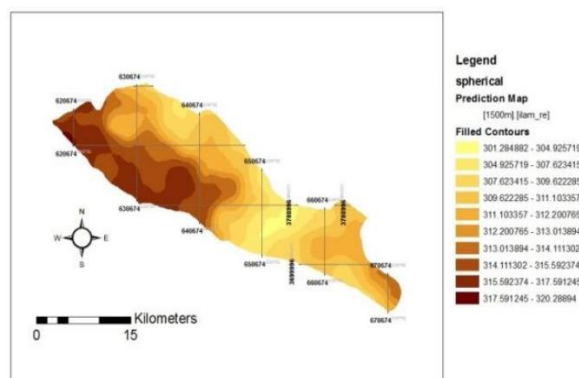
جدول ۳: پارامترهای برآورد شده مدل کروی بر اساس تخمین گر کریجینگ معمولی

Table 3: The estimated parameters of the spherical model based on the normal kriging estimator

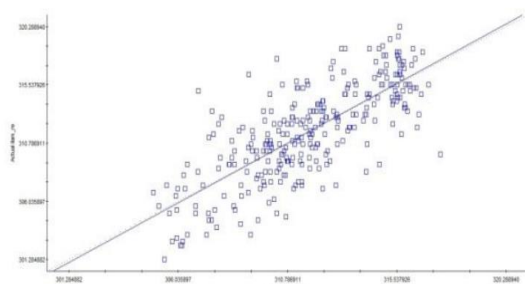
Spherical Model:

corr(Obs, Pred): 0.7588 [using ordinary kriging]

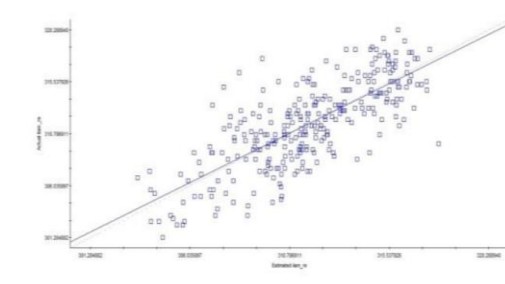
	observed	predicted	pred.-obs.	pred.std.	zscore
minimum	301.3	303.6	-8.367	2.397	-3.435
1st q.	309	309.6	-1.696	2.397	-0.6981
median	312.1	311.6	0.138	2.397	0.05758
3rd q.	314.8	314.4	1.77	2.436	0.7384
maximum	320.3	317.5	7.487	2.842	2.807
n	291	291	291	291	291
mean	311.7	311.7	0.01175	2.428	0.002667
std.dev.	3.944	3.186	2.576	0.06646	1.059



شکل ۱۰: نقشه حاصل از درونیابی به روش کریجینگ معمولی بر اساس مدل کروی
Fig. 10: The map resulting from interpolation using the normal kriging method based on the spherical model



شکل ۱۵: خط رگرسیونی نقاط واقعی و برآورد شده در مدل گوسی
Fig. 15: Regression line of real and estimated points in Gaussian model



شکل ۱۳: خط رگرسیونی نقاط واقعی و برآورد شده در مدل نمایی
Fig. 13: Regression line of actual and estimated points in the exponential model

مدل دایره‌ای

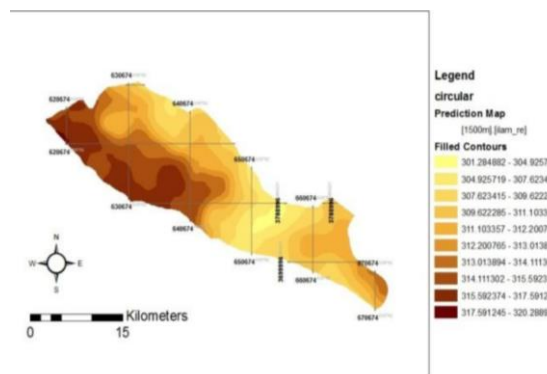
بر اساس مدل دایره‌ای، نقشه درون‌یابی شده تخمین‌گر کریجینگ معمولی و همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده، در جدول ۶ و شکل ۱۶ آورده شده‌اند. همچنین خط رگرسیونی نقاط واقعی و برآورد شده این مدل مطابق شکل ۱۷ می‌باشد و ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و برآورد شده طبق این مدل، ۰.۷۵۹۱ به‌دست آمد.

جدول ۶: پارامترهای برآورد شده مدل دایره‌ای بر اساس تخمین‌گر کریجینگ معمولی
Table 6: Estimated parameters of the circular model based on the normal kriging estimator

Circular Model :

corr(Obs, Pred): 0.7591 [using ordinary kriging]

	observed	predicted	pred.-obs.	pred.std.	zscore
minimum	301.3	303.7	-8.37	2.458	-3.356
1st q.	309	309.6	-1.683	2.458	-0.6754
median	312.1	311.6	0.1477	2.458	0.06007
3rd q.	314.8	314.4	1.76	2.494	0.7105
maximum	320.3	317.4	7.473	2.874	2.756
n	291	291	291	291	291
mean	311.7	311.7	0.01042	2.487	0.002282
std.dev.	3.944	3.182	2.574	0.06169	1.033



شکل ۱۶: نقشه پیش‌بینی حاصل از درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی بر اساس مدل دایره‌ای
Fig. 16: Prediction map resulting from interpolation using the normal kriging method based on the circular model

مدل گوسی

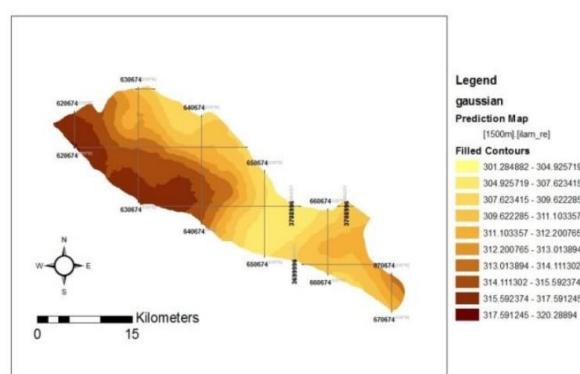
بر اساس مدل گوسی، نقشه درون‌یابی شده تخمین‌گر کریجینگ معمولی و همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده، در جدول ۵ و شکل ۱۴ آورده شده‌است. همچنین خط رگرسیونی نقاط واقعی و برآورد شده این مدل مطابق شکل ۱۵ می‌باشد. و ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و برآورد شده بر طبق این مدل، ۰.۷۶۵۷ به‌دست آمد.

جدول ۵: پارامترهای برآورد شده مدل گوسی بر اساس تخمین‌گر کریجینگ معمولی
Table 5: Estimated parameters of Gaussian model based on ordinary kriging estimator

Gaussian model :

corr(Obs, Pred): 0.7657 [using ordinary kriging]

	observed	predicted	pred.-obs.	pred.std.	zscore
minimum	301.3	304.5	-7.888	2.512	-3.134
1st q.	309	309.9	-1.505	2.512	-0.5986
median	312.1	311.6	-0.08615	2.513	-0.03381
3rd q.	314.8	314.2	1.613	2.539	0.6358
maximum	320.3	317.4	7.569	2.834	2.777
n	291	291	291	291	291
mean	311.7	311.7	-0.00335	2.535	-0.002119
std.dev.	3.944	2.979	2.537	0.04384	0.9992



شکل ۱۴: نقشه پیش‌بینی حاصل از درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی بر اساس مدل گوسی
Fig. 14: Prediction map resulting from interpolation using the normal kriging method based on the Gaussian model

نتایج و بحث

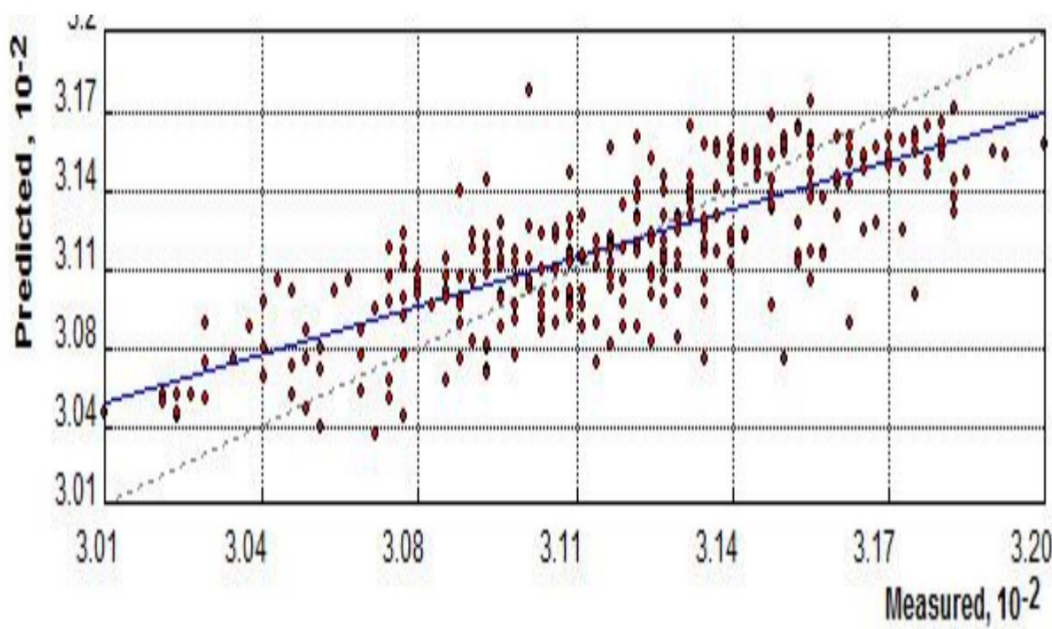
است. با توجه به مشابهت بسیار زیاد بین اطلاعات این باند و درجه حرارت سطحی زمین، می‌توان چنین استنباط نمود که توزیع مکانی بین داده‌های درجه حرارت ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه نیز از مدل گوسی تبعیت خواهند نمود. بنابراین، با اطمینان مضاعفی می‌توان از مدل گوسی و شاخص‌های آن برای درون‌یابی اطلاعات درجه حرارت ایستگاه‌های هواشناسی موجود استفاده و نقشه درجه حرارت منطقه را با اطمینان زیادی ترسیم کرد. نقشه نهایی درون‌یابی شده توسط مدل گوسی در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

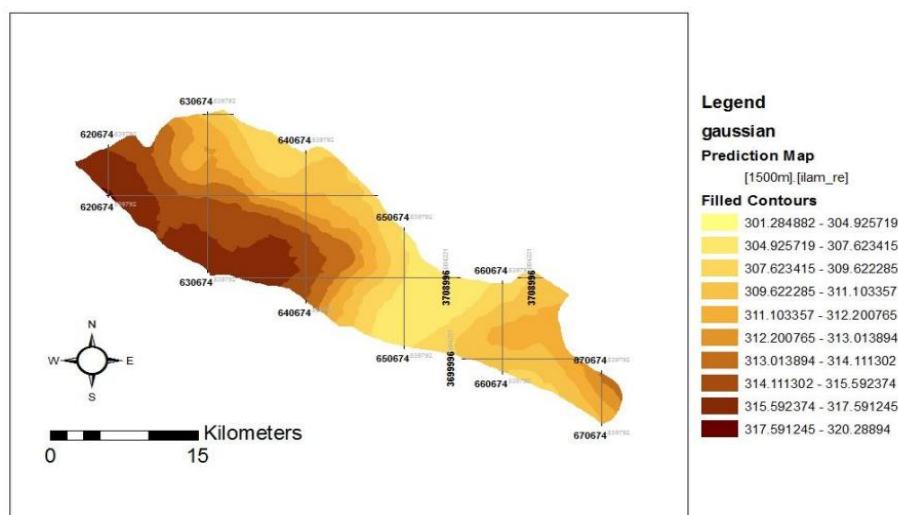
در این مطالعه، به بررسی تغییرات دمای سطحی در شهرستان ایلام با استفاده از داده‌های سنجش از دور و روش‌های زمین‌آمار پرداخته شد. نتایج نشان داد که الگوی فضایی تغییرات دمای سطحی در این منطقه گوسی است و مدل فضایی گوسی بهترین برازش را برای واریوگرام تجربی دمای سطحی دارد. همچنین، نقشه‌های درون‌یابی شده با استفاده از این مدل از دقت بالایی برخوردار هستند و دمای سطحی در این منطقه در طول چند دهه گذشته به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. لازم به ذکر است که مدل‌های انتخابی، فقط برای همان منطقه مورد اعتماد هستند، اما چنانچه یک مدل خاص برای چندین محل مناسب تشخیص داده شد، می‌توان نتیجه گرفت که آن مدل می‌تواند با اطمینان زیادی برای شرایط مشابه دیگر نیز مورد استفاده واقع شود.

هدف این تحقیق، به‌دست آوردن یک مدل بهینه زمین آماری است که با استفاده از آن بتوان به درون‌یابی نقاط در مناطق فاقد اطلاعات مکانی (در این تحقیق، دمای سطح زمین) پرداخت. جهت شناسایی این مدل از بین ۴ مدل آزمون شده کروی، دایره‌ای، نمایی و گوسی، به مقایسه این مدل‌ها بر اساس معیارهای استاندارد که در این زمینه موجود می‌باشند پرداخته شده است. مقایسه این معیارها در جدول ۷ ارائه شده است.

در جدول ۷ هرچه ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برآورد بهتر مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن مدل می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطاهاست که هرچه این مقدار کمتر باشد به معنای کمتر بودن مقدار خطای مدل در برآورد و پیش‌بینی مقادیر در نقاط مجهول توسط آن مدل است. هر قدر میزان اثر قطعه‌ای زیاد باشد، توان پیش‌بینی توسط مدل واریوگرافی کاهش می‌یابد. در نتیجه، هرچه این مقدار کمتر باشد، مدل از اعتبار بالاتری برخوردار است. مدل گوسی، با بیشترین ضریب همبستگی (۰.۷۶۵) و کمترین مقدار ریشه متوسط مجذور خطا (۰.۹۷۹) و همچنین کمترین نسبت $\frac{c}{c_0+c}$ (۰.۵۵)، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. این مدل دارای بیشترین کارایی در توزیع و روند حاکم بر تغییرات مکانی درجه حرارت سطحی داده‌های باند ۶ در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۷: خط رگرسیونی نقاط واقعی و برآوردشده در مدل نمایی
Fig. 17: Regression line of actual and estimated points in the exponential model



شکل ۱۸: نقشه نهایی درون‌یابی شده توسط مدل گوسی

Fig. 18: Final map interpolated by Gaussian model

جدول ۷: مقایسه آماری دقت مدل‌های اعمال شده به تخمین گر کریجینگ

Table 7: Statistical comparison of the accuracy of the models applied to the kriging estimator

معیار / مدل Criterion/Model	ضریب همبستگی Correlation coefficient	RMSE	نسبت $\frac{c}{c_0+c}$ Ratio
کروی Spherical	0.7588	1.106	0.749
نمایی View	0.7559	1.17	0.9
گوسی Gossi	0.7657	0.9791	0.55
دایره‌ای Circular	0.7591	1.083	0.716

روش پیشنهادی دارای خطاهای واضح نظیر لکه‌های ابر و یا غبارهای محلی باشد، انجام تصحیحات مختلف بر روی آن ضروری خواهد بود. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های سنجش از دور و روش‌های زمین‌آمار، ابزاری قدرتمند برای بررسی تغییرات مکانی و درون‌یابی داده‌های محیطی، از جمله تغییرات دمای سطحی، به‌شمار می‌رود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، کشاورزی و تنوع زیستی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود که بررسی تغییرات مکانی دمای سطحی در سایر مناطق کشور با استفاده از داده‌های سنجش از دور و همچنین مطالعه الگوی تغییرات سایر شاخص‌های محیطی مانند رطوبت خاک و پوشش گیاهی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار انجام شود.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از کلیه عزیزانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

مبنای ساخت واریوگرام در بسیاری از تحقیقات مشابه، نقاطی است که به‌صورت صحرایی اندازه‌گیری شده‌اند. چنانچه محل این نقاط مناسب و تعداد داده کافی باشد و داده‌ها از دقت لازم برخوردار باشند، مدل برازش شده قابل اعتماد خواهد بود؛ در حالی که این کار به‌دلیل صرف وقت و هزینه صورت نمی‌گیرد و بنابراین مدل مشخص شده با آنچه که در طبیعت وجود دارد، متفاوت خواهد شد. در بیشتر تحقیقات مشابه، معرفی یک مدل براساس نمونه‌گیری از چند نقطه خاص صورت می‌گیرد؛ در حالی که روش پیشنهادی امکان نمونه‌گیری از بی‌نهایت نقطه را فراهم می‌کند. فراوانی بالای نقاط منجر به برازش بهتر مدل بر نقاط واریوگرام تجربی شده و دقت تعیین مدل بهینه را افزایش می‌دهد. دقت درون‌یابی در مناطقی که تغییرات ارتفاعی زمین زیاد باشد بسیار مهم است، زیرا متغیر مورد نظر ممکن است در مقیاس‌های کوچک مکانی تغییرات زیادی داشته باشد. توصیه می‌شود که جهت درون‌یابی داده‌های درجه حرارت در چنین مناطقی از روش‌های دیگر مانند کوکریجینگ استفاده شود، زیرا تعیین درجه حرارت در این روش با استفاده از نحوه تغییرات داده‌های کمکی دیگر از قبیل ارتفاع صورت می‌گیرد. تعیین درجه حرارت سطحی زمین به کمک داده‌های باند ترمال ماهواره‌ای از مواردی است که نیازمند انجام تصحیحات دقیق و کالیبره نمودن طیفی آن‌ها می‌باشد. هدف تحقیق حاضر تعیین نحوه تغییرات مکانی درجه حرارت بوده‌است و به تعیین درجه حرارت سطحی زمین پرداخته نشد. اما در صورتی که تصویر گرفته شده برای انجام

منابع و مآخذ

- [12] Wang C, Li X, Zhang J, Xuan K, Jia R, Jiang Y, Liu J. regularized total variation minimization model for soil interpolation based on geostatistical priors. *Geoderma*. 2023; 432(116412). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116412>
- [13] Tariq A, Quantitative comparison of geostatistical analysis of interpolation techniques and semivariogram spatial dependency parameters for soil atrazine contamination attribute, *Geoinformatics for Geosciences, Advanced Geospatial Analysis Using RS. GIS and Soft Computing, Earth Observation*. 2023, Pages 261-279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98983-1.00016-8>
- [14] Walvoort D, de Gruijter J. Compositional Kriging: A Spatial Interpolation Method for Compositional Data. *Mathematical Geology*. 2001. 33(8):951-966. <https://doi.org/10.1023/A:1012250107121>
- [15] Alijani B, Ghohroudi M, Arabi N. Developing a climate model for Iran using GIS". *Theoretical and Applied Climatology*. 2007. 92(1):103-112. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-006-0292-y>
- [16] Koike K. Matsuda S. Gu B. Evaluation of Interpolation Accuracy of Neural Kriging with Application to Temperature-Distribution Analysis. *Mathematical Geology*. 2001. 33(4):421-448. <https://doi.org/10.1023/A:1011084812324>
- [17] Mirmousavi S. Muzeydi A, Khosravi Y. Determining the best geostatistical method to estimate rainfall distribution using GIS (case study: Isfahan province). 1389. *Geospace*, 10(30):105-120. SID. [In Persian]
- [18] Misaghi F. Mohammadi K. Rainfall information zoning using classical statistical methods and geostatistics and comparison with artificial neural networks. *Scientific Journal of Agriculture*. 1385. 29(4): 1-13. SID. [In Persian]
- [19] Ayouzi M. Mosaedi A. Monitoring and spatial analysis of meteorological drought in Golestan province using geostatistical methods. *Pasture and Watershed (Natural Resources of Iran)*. 1390., 64(1): 65-78. SI D. [In Persian]
- [20] Ayoubi S. Hosseinalizade M. Assessment spatial variability of soil erodibility by using of Geostatistic and GIS (Case study MEHR watershed of SABZEVAR).1386. 60(2): 369-382. [In Persian]
- [21] Rezaei M. Devatgar N. Tajdari K. Abolpour B. Investigating the spatial changes of some groundwater quality indicators in Gilan province using geostatistics. *Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*. 1389. 24(5):932-941. SID. [In Persian]
- [22] Roth W. M. Lee S. Scientific Literacy as Collective Praxis. *Public Understanding of Science*. 2002. 11(1): 33-56. <http://dx.doi.org/10.1088/0963-6625/11/1/302>
- [23] Shams Al-Dini A. Esmaili S. Vafainejad A. improving the classification accuracy of Landsat + ETM images using the combination of spectral and texture data (the studied area of Shahr Karaj). *International Conference on Architecture. Urban Planning, Civil Engineering, Art and the environment*. 2014.
- [1] Tayebi A, Kasmaeeyazdi S, Tinti F, Bruno R. Contributions from experimental geostatistical analyses for solving the cloud-cover problem in remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2023; 118(103236). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103236>
- [2] Zakeri F, Mariethoz G. A review of geostatistical simulation models applied to satellite remote sensing: Methods and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2021; 259(112381). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112381>
- [3] Golmohammadi G. Maroufi S. Mohammadi K., regionalizing the runoff coefficient in Hamedan province using geostatistical and GIS methods. 1387. [In Persian]
- [4] Kesai Rudrsari B. Kahraman B. Sharifi M. Investigating the density of the network of rain gauge stations using geostatistical methods (case study: Razavi, North and South Khorasan provinces). 1389. [In Persian]
- [5] Akhavan R. Zobeyri M. Amiri G. Namiranian M. Spatial Structure and Estimation of Forest Growing Stock Using Geostatistical Approach in the Caspian Region of Iran. *Geostatistics*. 1385. 4(1). [In Persian]
- [6] Atkinson P, Stein A, Jeganathan C, Spatial sampling, data models, spatial scale and ontologies: Interpreting spatial statistics and machine learning applied to satellite optical remote sensing. *Spatial Statistics*. 2022 ; *Spatial Statistics*, 50(100646). <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100646>
- [7] AbdelRahman M. Natarajan A, Hegde A. Prakash S. Assessment of land degradation using comprehensive geostatistical approach and remote sensing data in GIS-model builder. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2019. 22(3): 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.002>
- [8] Kumar Mehla M. Kumar A. Kumar S. Jhorar R.K. Soil salinity assessment and mapping using spectral indices and geostatistical techniques concepts and reviews. *Remote Sensing of Soils, Mapping, Monitoring, and Measurement*. 2024.1(5): 429-437. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-443-18773-5.00019-3>
- [9] Emadi M. Baghernejad M. An approach for land suitability evaluation using geostatistics, remote sensing, and geographic information system in arid and semiarid ecosystems. *Environ Monit Assess*. 2010. 164(4):501-511. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0909-6>
- [10] Dousset B. Gourmelon F. Satellite Multi-Sensor Data Analysis of Urban Surface Temperatures and Landcover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2003. 58(2): 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(03\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(03)00016-9)
- [11] Owen T.W. Carlson T.N. Gillies R.R. Remotely Sensed Surface Parameters Governing Urban Climate Change. *Internal Journal of Remote Sensing*. 1998. 19(9): 1663-1681. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

[36] Mardikis M. Kalivas D. Kollias V. Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration, An Application in Greece. Water Resources Management. 2005. 19(3): 251-278. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-005-3179-2>

[37] Ghahrodi Tali M. Evaluation of forecasting by kriging method. Geographical Research. 1381. 34(43):95-108. SID. [In Persian]

[24] Dostanian M. Sabrian J. Evaluation of vegetation map production methods using spatial information system and remote sensing. Remote sensing and spatial information research. 1401. 1 (1): 83-90. <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2022.1979>

[25] Abdulahi J. Rahimian M. Using remote sensing to determine the best geostatistical model for field information interpolation. Iran Pasture and Desert Research. 1386. 14(27): 156-170. SID. [In Persian]

[26] Boer E. P. J. deBeurs K. Hartkamp A. Kriging and thin plate splines for mapping climate variables, Int. J. Appl. Earth Observation Geoinform. 2001. 3(2):146-154. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85006-6](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85006-6)

[27] Hlavka C. Dungan J. Thirulanambi R. Roy D. Application of Geostatistical Simulation to Enhance Satellite Image Products. Geostatistics Banff. 2004, 60(1): 913-919. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-3610-1_95

[28] Henshaw S. Curriero F. Shields T. Geostatistics and GIS: Tools for Characterizing Environmental Contamination. Journal of Medical Systems. 2004. 28(4):335-348. <https://doi.org/10.1023/B:JOMS.0000032849.42310.4e>

[29] Schro Der W. Schmidt G. Hasenclever J. Geostatistical Analysis of Data on Air Temperature and Plant Phenology. Environmental Monitoring and Assessment. 2006. 120(1-3): 27-43. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9047-y>

[30] Yang J, Wang Y. August P. Estimation of Land Surface Temperature Using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity. Journal of Environmental Informatics. 2004. 4(1):37-44. <https://doi.org/10.3808/jei.200400035>

[31] Niu D. Tarumi T. Estimation for the Parameters in Geostatistics. Cooperation in Classification and Data Analysis. 2009.1(1): 123-130. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00668-5_13

[32] Burrough P. GIS and Geostatistics: Essential Partners for Spatial Analysis. Environmental and Ecological Statistics. 2001. 8(4):361-377. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1012734519752>

[33] Haji Hashemi Jezi, M. Ateshgahi M. Hamidian A. Spatial estimation of groundwater quality components using geostatistical methods (case study: Golpayegan plain). Journal of Natural Environment. 1389. 63(4): 347-357. [In Persian]

[34] Alsamamra H, Santos-Alamillos F, Pozo-Vázquez D, Ruiz-Arias J. A Comparative Study of Ordinary and Residual Kriging Techniques for Mapping Global Solar Radiation Over Southern Spain. Agricultural and Forest Meteorology. 2009. 149(8):1343-1357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.005>

[35] Adab H. Fallah G. Mirzabayati R. Evaluation of interpolation methods of kriging and linear regression based on DEM in preparation of annual rainfall map in Razavi Khorasan province. The 87th Geomatic Conference and the 4th Conference on the Unification of Geographical Names. [In Persian]

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



علیرضا وفائی‌نژاد دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی نقشه‌برداری گرایش سیستم اطلاعات مکانی از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد. ایشان در حال حاضر به‌عنوان دانشیار در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید

بهشتی مشغول فعالیت بوده و تاکنون بیش از ۳۵ مقاله در نشریات معتبر بین‌المللی، ۷۰ مقاله در نشریات معتبر داخلی و ۵۰ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و بین‌المللی ارائه نموده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از سیستم‌های اطلاعات مکانی هوشمند، یادگیری ماشین، بهینه‌سازی با سیستم‌های اطلاعات مکانی و کاربردهای سیستم‌های اطلاعات مکانی در مدیریت منابع آب و محیط زیست.

Vafaeinejad, A. Associate Professor at the Department of Geotechnical and Transportation Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

a_vafaei@sbu.ac.ir



فرشاد همتی فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی از دانشکده محیط‌زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات است. ایشان در زمینه‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی تخصص دارد و به موضوعات

زمین آمار و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و کاربردهای مختلف سنجش از دور در حوزه‌های محیط زیست علاقه‌مند است.

Hemati, F. Master's degree in remote sensing and geographic information system, Faculty of Environment and Energy, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

f.hemati@gmail.com

ثنا حایری دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش سیستم‌های اداره زمین دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان تجزیه و تحلیل و ارزیابی داده‌های

Haery, S. Master's student in the field of surveying engineering majoring in land administration systems, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
✉ s.haery@mail.sbu.ac.ir



مکانی با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی هوشمند و کاربردهای یادگیری ماشین می‌باشد.

Citation (Vancouver): Vafaeinejad A, Hemati F, Haery S. [Evaluation of Surface Temperature Changes in Ilam City with a Combined Approach to Geostatistical Models and Spatial Information Systems]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 205-218

 <https://doi.org/10.22061/jrsg.2024.10977.1069>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Development of a Decision Support System for Optimizing Land Use Allocation Using the Ant Colony Algorithm (Case Study: 7th Municipal District of Isfahan)

A. Sahebgharani

Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

ABSTRACT

Received: 18 June 2024
Reviewed: 10 August 2024
Revised: 05 September 2024
Accepted: 11 October 2024

KEYWORDS:

Ant Colony Optimization
Decision Support System
Land Use Optimization
Spatial Planning

* Corresponding author

✉ a_sahebgharani@iut.ac.ir

☎ (+9831) 33911410

Background and Objectives: Population growth in human settlements leads to an increase in land use demand. Consequently, optimal urban land use planning is critical for planners and decision-makers. Given that land use allocation involves multiple objectives and a large set of data and variables, solving this problem requires developing decision support systems (DSSs) and applying meta-heuristic algorithms.

In this paper, a DSS equipped with an optimization method (i.e., Ant Colony Optimization algorithm) is developed to solve the land use allocation problem. The study aims to design a graphical user interface (GUI) to facilitate the algorithm implementation process and apply it to a study area to assess how such a tool can help achieve the optimal land use layout. Additionally, the outputs of the ACO are compared with the results of two other meta-heuristics (i.e., the Genetic and the Simulated Annealing algorithms) to evaluate the performance of the designed DSS.

Methods: To fulfill the research objective, first, the land use optimization problem is formulated, which includes the decision variable and how it is discretized, three objective functions (i.e., compatibility, compactness, and suitability maximization), two area controlling constraints, and the way of combining the objective functions. Second, the ACO algorithm customized with the land use allocation problem is presented. Third, the study area, the 7th municipal district of Isfahan divided into 334 allocation cells, is introduced, and the requirements such as parameters and weights for calculating and combining the objective functions are described based on the case study characteristics, related studies, and expert opinions. Fourth, a code is developed, and a GUI is designed in MATLAB programming to carry out the computational process, solve the equations, and handle the spatial data. Finally, the ACO parameters are tuned, and the code is applied to the study area within the depicted DSS framework. Alongside the ACO implementation, two other meta-heuristics (i.e., the genetic and simulated annealing algorithms) are executed to constitute a ground for the performance analysis.

Findings: Outputs of the developed DSS illustrated the land use distribution within the 7th municipal district of Isfahan and the ACO's convergence process. It showed that the cultural and sports land types were in the central part of the study area, and a major amount of the service land types was placed close to the green spaces. In addition, service types were located in the central and northern parts of the study area providing access for the residents to such necessary amenities.

Conclusion: The results indicated that the ACO algorithm performed satisfactorily in the study area. In other words, the DSS, including this algorithm, demonstrated effective land management and planning performance. It also displayed benefits for users interested in applying different objectives and constraints. Besides, the ACO performed better in the study area than the other utilized methods. Although this article delivered a DSS along with optimization algorithms advantageous for resource management and spatial planning, incorporating land use levels (e.g., urban and neighborhood) and compatibility of the modeling context with more realistic conditions (e.g., cell area variation) are proposed for future research that are of limitations of this article.



NUMBER OF REFERENCES

34



NUMBER OF FIGURES

6



NUMBER OF TABLES

6

مقاله پژوهشی

توسعه‌ی یک سامانه‌ی پشتیبان تصمیم به منظور بهینه‌سازی تخصیص کاربری زمین با استفاده از الگوریتم مورچگان (مورد مطالعه: منطقه‌ی ۷ شهرداری اصفهان)

علیرضا صاحبقرانی

دانشکده‌ی مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، اصفهان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: رشد جمعیت در سکونتگاه‌های انسانی منجر به افزایش تقاضای زمین می‌شود. به این ترتیب، برنامه‌ریزی کاربری زمین شهری برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران امری مهم و اساسی به شمار می‌رود. با توجه به آن که تخصیص کاربری زمین اهداف متعدد و مجموعه بزرگی از داده‌ها و متغیرها را در بر می‌گیرد، حل چنین مسأله‌ای مستلزم و نیازمند توسعه سامانه‌های پشتیبان تصمیم و به‌کارگیری الگوریتم‌ها فراابتکاری می‌باشد. در این مقاله، یک سامانه پشتیبان تصمیم مجهز به یک روش بهینه‌سازی که الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان می‌باشد، به منظور حل مسئله تخصیص کاربری زمین توسعه می‌یابد. این مطالعه، به دنبال طراحی یک واسطه گرافیکی کاربر برای تسهیل اجرای مراحل الگوریتم و استفاده از آن در یک مورد مطالعاتی، به منظور ارزیابی آن که چنین ابزاری چگونه به دستیابی به چیدمان بهینه کاربری زمین کمک می‌نماید، است. به‌علاوه، مقایسه خروجی‌های الگوریتم مورچگان با نتایج دو روش (ژنتیک و انجماد تدریجی) برای ارزیابی عملکرد سامانه پشتیبان تصمیم توسعه یافته نیز انجام می‌شود.

روش‌ها: به‌منظور دستیابی به هدف پژوهش، در گام اول، مسئله بهینه‌سازی کاربری زمین فرموله شده که شامل: تعریف متغیر تصمیم و نحوه گسسته‌سازی آن، سه تابع هدف (بیشینه‌سازی سازگاری، فشردگی و تناسب)، دو قید کنترل‌کننده مساحت و نحوه ترکیب توابع هدف می‌باشد. در گام دوم، الگوریتم مورچگان تطابق یافته با مسأله تخصیص کاربری زمین ارائه می‌شود. در گام سوم، محدوده مورد مطالعه، منطقه ۷ شهر اصفهان که از ۳۳۴ سلول تخصیص تشکیل شده است، معرفی می‌گردد و ملزوماتی از جمله پارامترها و اوزان لازم برای محاسبه و ترکیب توابع هدف تشریح شده که از منابعی هم‌چون: ویژگی‌های محدوده مورد مطالعه، مطالعات مرتبط و نظرات متخصصین حاصل می‌شود. در گام چهارم، کدهای مربوطه و یک واسطه گرافیکی کاربر در محیط متلب به منظور اجرای فرآیند محاسبه، حل معادلات و مدیریت داده‌های فضایی، برنامه‌نویسی می‌شود. در گام پایانی، پارامترهای الگوریتم مورچگان تنظیم شده و برنامه‌ی نوشته شده در چارچوب سامانه پشتیبان تصمیم در محدوده مورد مطالعه اجرا می‌شود. علاوه بر پیاده‌سازی الگوریتم مورچگان، دو الگوریتم فراابتکاری دیگر (الگوریتم‌های ژنتیک و انجماد تدریجی) نیز برای فراهم نمودن زمینه تحلیل عملکرد سامانه نیز اجرا می‌شوند.

یافته‌ها: خروجی‌های سامانه پشتیبان تصمیم توسعه یافته، توزیع کاربری زمین در محدوده منطقه ۷ شهرداری اصفهان و فرایند همگرایی الگوریتم مورچگان می‌باشد. یافته‌ها، حاکی از آن است که کاربری‌های فرهنگی و ورزشی در بخش مرکزی محدوده مورد مطالعه قرار گرفته و بخش عمده‌ای از کاربری‌های خدماتی در مجاورت فضای سبز استقرار یافته است. به علاوه، کاربری خدماتی در بخش‌های شمالی و مرکزی محدوده مورد مطالعه شکل گرفته است و دسترسی افراد به خدمات اساسی را فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری: نتایج، نشان می‌دهد که الگوریتم مورچگان عملکرد رضایت‌بخشی در محدوده مورد مطالعه داشته است. به بیان دیگر، سامانه پشتیبان تصمیم شامل الگوریتم مورچگان، کارکرد مؤثری در مدیریت و برنامه‌ریزی زمین را نشان می‌دهد. نتایج مؤید آن است که چارچوب ارائه شده، امکان توسعه و گسترش متناسب با شرایط کاربران در محیط‌های دیگر را دارا می‌باشد. به علاوه، نتایج حاکی از آن است که الگوریتم مورچگان در محدوده مورد مطالعه از عملکرد بالاتری نسبت به دو روش به‌کارگرفته شده دیگر برخوردار است. اگرچه این مقاله یک سامانه پشتیبان تصمیم

تاریخ دریافت: ۲۹ خرداد ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۰ مرداد ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۵ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۰ مهر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

بهینه‌سازی کلونی مورچه
سامانه پشتیبان تصمیم
بهینه‌سازی کاربری زمین
برنامه‌ریزی فضایی

* نویسنده مسئول

a_sahebgharani@iut.ac.ir

۰۳۱-۳۳۹۱۱۴۱۰ ①

مجهز به یک الگوریتم بهینه‌سازی که برای مدیریت منابع و برنامه‌ریزی فضایی مفید می‌باشد را معرفی می‌کند، در نظر گرفتن سطوح مختلف کاربری‌ها (مانند: شهری و محلی) و نیز بسترهای مدل‌سازی سازگارتر با شرایط واقعی (مانند: سلول‌ها با مساحت متغیر) از جمله محدودیت‌های این مطالعه بوده که پیگیری آن‌ها در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

مقدمه

با استفاده از داده‌های سنجش از دور، شناسایی و کنترل جزایر گرمایی شهری را مورد نظر قرار داده‌اند [۹]. در ارتباط با حفظ محیط زیست نیز، سامانه‌های پشتیبان تصمیم به برنامه‌ریزان برای شناسایی محدوده‌های بهینه برای حفاظت با توجه به تنوع محیطی، خدمات بوم‌شناختی و فشار استفاده از زمین کمک می‌نمایند. در این خصوص، گلنتی کاربرد سامانه‌های پشتیبان تصمیم در حفاظت محیطی را مورد تأکید قرار داده [۱۰] و مویلان و همکاران نیز به کاربرد ابزارهایی مانند: Marxan در این زمینه اشاره می‌نمایند [۱۱]. در حوزه برنامه‌ریزی شهری نیز توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های پشتیبان تصمیم به‌طور گسترده‌ای به منظور مدیریت پراکنده‌رویی شهری، بهینه‌سازی زیرساخت‌ها و کاربری زمین، بهبود فضای سبز و توسعه‌ی شهری مورد توجه قرار داده شده است، به‌طوری که ودل با استفاده از سکوی UrbanSim به مدل‌سازی رشد شهری و تسهیل برنامه‌ریزی مبتنی بر سناریو پرداخته است [۱۲].

در کنار زمینه‌های موضوعی کاربرد سامانه‌های پشتیبان تصمیم که نشان‌دهنده اهمیت ساخت و معرفی این گروه از ابزارها برای برنامه‌ریزی فضایی می‌باشد، می‌توان گفت که در توسعه این سامانه‌ها از مدل‌های مختلفی جهت انجام محاسبات بهره گرفته شده است. به‌طور مثال، در برخی از پژوهش‌ها، روش‌های مبتنی بر ارزیابی چندمعیاره به‌عنوان هسته اصلی سامانه‌های پشتیبان تصمیم در نظر گرفته شده‌اند تا امکان مدیریت سناریوهای پیچیده تصمیم‌گیری که شامل معیارهای چندگانه و متقابل می‌شوند را فراهم سازند. این دسته از مدل‌ها در ارزیابی سناریوهای مختلف کاربری زمین بر اساس معیارهایی هم‌چون: بازگشت اقتصادی، اثرات محیطی و پذیرش اجتماعی کاربرد داشته و با ترکیب لایه‌های اطلاعاتی متنوع منجر به شکل‌گیری تصویری کلی از زمینه مداخله برنامه‌ریزی می‌شوند. مالچفسکی و رینر ضمن ترکیب سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، کاربری زمین را برنامه‌ریزی نموده‌اند [۱۳]. اکامپو نیز با تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و منطق فازی به بررسی و مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در تصمیم‌گیری تمرکز کرده است [۱۴].

در دسته‌ای دیگر از مطالعات نیز با در نظر گرفتن مدل‌سازی عامل‌مبنا، شبیه‌سازی تعامل عوامل و اثر آن‌ها بر شکل‌گیری الگوهای کاربری زمین به منظور درک رفتار سامانه پیچیده زمین را مورد مطالعه قرار داده‌اند. فیلاتو با مدل‌سازی عامل‌مبنا، تغییرات کاربری زمین را با در نظر گرفتن پویایی این پدیده تحلیل و تصویر کرده است [۱۵]. لیگمن-زلینسکا و جنکوفسکی نیز با استفاده از این مفاهیم به شبیه‌سازی رشد شهری و تغییرات کاربری زمین پرداخته‌اند [۱۶].

در حال حاضر، برنامه‌ریزی کاربری زمین به‌دلیل رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضای مصرف به عملی بسیار پیچیده تبدیل شده است. شهرها از یک طرف مملو از جمعیت بوده و از طرف دیگر اراضی با ارزشی که در معرض توسعه قرار نگرفته‌اند از دست رفته و تحت تأثیر گسترش پراکنده قرار می‌گیرند. با تداوم این شرایط و در کنار تخصیص غیر بهینه کاربری‌ها، شهرها در آینده با مشکلات اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی مواجه خواهند شد. با توجه به این وضعیت، برنامه‌ریزی کاربری زمین به‌طور بهینه، به یکی از جنبه‌های کلیدی و حیاتی در برنامه‌ریزی فضایی تبدیل شده است که در آن، تخصیص منابع به‌طور کارآمد برای ایجاد تعادل در اهداف مختلف سازماندهی مکانی دنبال می‌شود. در برنامه‌ریزی کاربری زمین، پس از برآورد تقاضا، نوبت به مرحله تخصیص زمین و تقسیم این منبع محدود و ارزشمند در میان کاربری‌های مختلف می‌رسد. در این مرحله، به‌دلیل محدودیت در امکانات مالی، انسانی و جز آن، لازم است شرط بهینگی استقرار کاربری‌ها در نظر گرفته شده تا از منابع موجود بیش‌ترین استفاده به‌عمل آمده و کم‌ترین تبعات منفی نظیر: جدایی گزینی اقتصادی و اجتماعی [۱]، فرسودگی محیط [۲]، شکل‌گیری الگوهای پراکنده و با تراکم پایین [۳] و اتلاف منابع در شهرها [۴]، ایجاد شود.

با توجه به آن‌که برنامه‌ریزی کاربری زمین، در پی تحقق اهداف متعددی بوه و این اهداف از منابعی نظیر: ایده‌آل‌ها، آموزه‌ها و تجربیات برنامه‌ریز، و ذینفعان درگیر در فرآیند برنامه‌ریزی کاربری زمین نشأت می‌گیرد، برنامه‌ریز فضایی با مجموعه وسیعی از متغیرها، داده‌ها، روابط غیر خطی و ابعاد بالا که مسأله را به مسئله‌ای دشوار (NP-hard) تبدیل می‌نماید، درگیر است. به این ترتیب، و با عنایت به لزوم یافتن نقطه یا نقاطی که در آن، میان اهداف سازش شده تا از این طریق علاوه بر تخصیص مناسب منبع زمین، تحقق‌پذیری برنامه‌ها نیز افزوده شده، و توجه به آن‌که این موضوع امری پیچیده است؛ استفاده از فرآیندهای پیشرفته و مبتنی بر رایانه برای مواجهه با این مسأله اجتناب‌ناپذیر خواهد بود [۵-۷]. در این میان، توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های پشتیبان تصمیم به‌عنوان ابزارهای کنترل پیچیدگی ضروری بوده تا مدیریت و فرآیند برنامه‌ریزی را تسهیل نماید. این سامانه‌ها، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، فنون مدل‌سازی و روش‌های حل مسائل را با یکدیگر تلفیق نموده تا تصمیم‌گیران و سیاست‌سازان و سایر ذینفعان را در دستیابی به تصمیمات آگاهانه یاری نمایند. به همین جهت، ساخت و استفاده از سامانه‌های پشتیبان تصمیم توجه محققان در حوزه‌ها مختلف را به خود جلب نموده است. به‌عنوان نمونه، ریتن و همکاران به معرفی سامانه پشتیبان تصمیم برای مدیریت بهینه زمین‌ها و ذخایر کشاورزی پرداخته [۸] و ژو و چن نیز

[۲۱]. آرتز و همکاران، به بهینه‌سازی کاربری زمین با استفاده از روش فراابتکاری انجماد تدریجی، در ارتباط با برنامه‌ریزی اهداف برای بهینه‌سازی کاربری زمین پرداخته‌اند. در این مقاله اشاره شده است که این روش‌ها قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه با ابعاد بالا را دارند. ضمن آن که توابع هدف مورد نظر این تحقیق، هزینه توسعه و فشردگی کاربری‌های تخصیص یافته می‌باشد [۲۲].

همان‌گونه که مرور برخی از منابع موجود در زمینه موضوعی مطالعه نشان می‌دهد، تاکنون الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی کاربری زمین توسعه یافته است. با این وجود، دستیابی به یک سامانه پشتیبان تصمیم مجهز به الگوریتمی کارآ با امکان تولید جواب مناسب، هنوز هم در کانون توجه محققین در عرصه‌های گوناگون قرار دارد. لازم به ذکر است که توجه به این امر در حوزه برنامه‌ریزی فضایی و استفاده از روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی در قالب سامانه‌های پشتیبان تصمیم و نیز کاربست آن در تهیه برنامه‌های توسعه و تسهیل فرآیند برنامه‌ریزی به‌منظور مدیریت زمین به شکلی کارآمد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عبارت دیگر، با توجه به ماهیت پیچیده موضوع برنامه‌ریزی و تخصیص کاربری زمین (به دلیل تعدد کاربری‌ها، مقیاس‌ها و واحدهای تخصیص) و بهره‌گیری از رویکردهای طراحانه در محیط‌های برنامه‌ریزی کشور، ضرورت معرفی سامانه‌های پشتیبان تصمیم و برنامه‌ریزی که به‌عنوان ابزاری کمکی در اختیار تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان قرار گرفته تا علاوه بر خروجی‌های ناشی از فرآیندهای طراحانه و مبتنی بر تجربه، توزیع بهینه کاربری‌ها را با توجه به اهداف و قیود حاکم بر سامانه کاربری زمین تولید نماید، به نحوی که خروجی و تصمیم نهایی با در نظر گرفتن چیدمان‌های مختلف کاربری‌ها و تعامل رویکردهای مختلف (طراحانه و کمی) حاصل گردد، دو چندان خواهد بود.

با توجه به آن که تاکنون روش الگوریتم مورچگان در حل مسائل مختلفی از جمله: مسأله فروشنده دوره گرد، خوشه بندی داده‌ها، بهینه‌سازی ترکیبی و مسأله مسیریابی شبکه و توزیع گونه‌های فعالیت [۲۳-۲۵] مورد استفاد قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی را به همراه داشته است، در مطالعه حاضر، به توسعه یک سامانه پشتیبان تصمیم با استفاده از الگوریتم مورچگان به‌منظور بهینه‌سازی کاربری زمین پرداخته شده و علاوه بر آن مقایسه خروجی‌های سامانه معرفی شده با روش‌های دیگر (الگوریتم ژنتیک و انجماد تدریجی) صورت می‌گیرد. به‌علاوه، این پژوهش در تلاش است تا به پرسش: "کاربری‌ها در محدوده‌های شهری بایستی با چه آرایشی توزیع شوند تا اهدافی خاص بیشینه و یا کمینه-گردند؟" پاسخ دهد و در راستای آن به توسعه و به‌کارگیری یک سامانه پشتیبان تصمیم بپردازد. نوآوری‌های این تحقیق عبارتند از: (۱) توسعه و به‌کارگیری الگوریتم مورچگان در تخصیص کاربری‌ها در قالب یک سامانه پشتیبان تصمیم دارای یک واسطه گرافیکی کاربر (GUI) و در یک محدوده واقعی و (۲) مقایسه نتایج الگوریتم مورچگان با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری (ژنتیک و انجماد تدریجی) از نظر کارایی و کیفیت.

در گروهی دیگر از مطالعات نیز از روش‌های بهینه‌سازی به‌عنوان واحد مرکزی سامانه‌های پشتیبان تصمیم و به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی کاربری زمین بهره‌گرفته شده است. به‌عنوان نمونه، به دلیل ابعاد بالا و سطح بالای پیچیدگی مسأله تخصیص کاربری زمین و لزوم استفاده از روش‌های فراابتکاری برای حل مسأله [۱۷]، سائو و همکاران، الگوریتم ابتکاری ژنتیک را برای جست‌وجوی راه حل بهینه کاربری زمین پایدار توسعه داده‌اند. توابع هدف مورد نظر در این تحقیق عبارتند از: مطلوبیت اکولوژیک و ژئولوژیک، دسترسی، هزینه تبدیل، سازگاری و فشردگی. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی از کارآمدی لازم برای دستیابی به الگوی بهینه کاربری برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان سامانه پشتیبان برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵]. ژنگ و همکاران، به تخصیص کاربری زمین با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مدل چند عامله، با در نظر گرفتن اهداف: حفظ منابع و سازگاری محیطی، پرداخته‌اند. مدل پیشنهادی در این پژوهش به‌طور عملی در شهر چانگشو به کار گرفته شده است. کارایی بالاتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک مرسوم در این پژوهش مورد تأیید قرار گرفته و استفاده از آن برای تولید گزینه‌های مختلف کاربری زمین در تصمیم‌گیری فضایی پیشنهاد شده است [۱۷]. شایگان و همکاران، قابلیت الگوریتم ژنتیک نخبه‌گرا را برای حل مسأله تخصیص کاربری زمین مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق دو نوع عملکرد تقاطع یکنواخت و تقاطع دو بعدی برای تولید سناریوهای مختلف کاربری زمین مورد استفاده قرار گرفته و قابلیت بالاتر عملکرد تقاطع دو بعدی نسبت به تقاطع یکنواخت نشان داده شده است. توابع هدف این تحقیق، میزان فرسایش، میزان رواناب، تناسب اراضی و فشردگی را در بر می‌گیرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پس از بهینه‌سازی کاربری اراضی در بخشی از حوضه طالقان، علاوه بر کاهش فرسایش خاک، میزان سوددهی کلی نیز افزایش یافته است [۱۸]. خوش‌آموز و همکاران، از الگوریتم ژنتیک برای تخصیص کاربری‌ها در مقیاس آمایشی استفاده کرده و اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را مورد بهینه‌سازی قرار داده‌اند [۱۹]. سائو و همکاران، کاربرد الگوریتم انجماد تدریجی را برای تخصیص واحدهای زمین به مجموعه‌ای از کاربری‌های ممکن، با در نظر گرفتن اهداف: مناسب کاربری‌ها، و فشردگی مورد آزمون قرار داده‌اند. مدل ارائه شده در این مطالعه در شهر تراچا در اسپانیا به‌کار گرفته شده است. نتایج این تحقیق، نشان می‌دهد که در خروجی حاصل، کاربری‌های پیشنهادی و نحوه هم‌جواری آن‌ها از فشردگی و مناسبیت قابل قبولی برخوردار است [۲۰]. دا و براون، پس از مطرح نمودن چند هدفه بودن و پیچیدگی تخصیص و بهینه‌سازی کاربری زمین، و بیان ضعف مدل‌های دقیق برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم انجماد تدریجی را برای حل مسأله تخصیص فضایی کاربری، به‌کار گرفته‌اند. در این مطالعه، ۱۲۰۰ الگوی تخصیص کاربری زمین مورد نظر قرار گرفته است. نتایج این پژوهش، نشان می‌دهد که الگوریتم انجماد تدریجی از کارایی لازم در تخصیص فضایی کاربری زمین برخوردار است

روش تحقیق

مروری بر مبانی بهینه‌سازی

مسئله بهینه‌سازی، یک بردار تصمیم است که قیود را برآورده ساخته و تابع هدف را بهینه می‌نماید. این توابع که تشریح ریاضی تعدادی عملکرد هستند معمولاً با یکدیگر در تقابل قرار دارند. بنابراین، اصطلاح "بهینه"، به معنای یافتن جواب‌هایی است که به هدف، پاسخی قابل قبول داده و برای تصمیم‌گیر نیز رضایت‌بخش باشد [۲۶]. در عمل و در مسائل بهینه‌سازی بزرگ، یافتن نقطه بهینه، عملی زمان‌بر بوده و به همین علت، در حل این مسائل بر یافتن مجموعه‌ای از پاسخ‌ها یا پاسخی که در آن بهینگی نسبی برآورده گردد، تکیه می‌شود. به‌طور کلی مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به طور ریاضی، در قالب روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\text{minimize / maximize } f_n(x); n=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$g_i(x) \leq 0; i=1, \dots, m; h_j(x) = 0; j=1, \dots, p \quad (2)$$

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_m]^T \quad (3)$$

رابطه (۱) بردار توابع هدف است که به‌صورت $f(x) = [f_1(x), \dots, f_n(x)]$ قابل نمایش است. رابطه (۲) قیود و محدودیت‌های توابع هدف را بیان می‌کند که می‌تواند به‌طور تساوی یا نامساوی باشد. رابطه‌ی (۳) نیز متغیرهای تصمیم را معرفی می‌کند. به‌طور کلی به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه رویکردهای مختلفی وجود دارد. به‌عنوان مثال، در یک رویکرد به تبدیل مسئله چندهدفه به یک مسئله تک هدفه پرداخته و در رویکردی دیگر، به یافتن پاسخ‌های نامغلوب (جواب‌های پارتو)، پاسخ‌هایی که در هیچ هدفی از سایر پاسخ‌ها بدتر نبوده و حداقل در یکی از اهداف از سایر جواب‌ها بهتر باشد، مبادرت می‌شود. رویکرد اول در زمانی که ترجیحات میان اهداف معین باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

معرفی الگوریتم مورچگان

الگوریتم مورچگان برای اولین بار توسط دوریگو در سال ۱۹۹۲ با الهام از رفتار مورچگان توسعه یافته و تاکنون در علوم و زمینه‌های مختلف به‌کار گرفته شده است. در طبیعت، مورچگان در فرآیند جست‌وجوی منابع غذایی، مسیر رسیدن به منبع را با ترشح فرومون نشانه‌گذاری می‌کنند. با توجه به تغییر غلظت فرومون و تبخیر آن در محیط، مورچگان مسیر با بالاترین غلظت فرومون را دنبال نموده و به نشانه‌گذاری ادامه می‌دهند. با گذشت زمان و افزایش شمار مورچگان، مقدار فرومون افزایش یافته و هر چه عبور از مسیرهای مشابه بیشتر شود، محبوبیت مسیرها نیز افزایش می‌یابد. با تکرار این فرآیند مسیر یا مسیرهای بهینه که اغلب کوتاه‌ترین مسیر دستیابی به منبع غذایی می‌باشد، تعیین می‌گردد [۲۷]. جدول ۱، مراحل الگوریتم اجتماع مورچگان را نشان می‌دهد.

احتمال انتخاب مسیر و سرعت تبخیر فرومون، دو مورد از مهم‌ترین بخش‌های این الگوریتم هستند. یکی از روش‌های مورد توجه برای تعیین احتمال به‌صورت زیر است:

$$p_{ij} = \frac{\varphi_{ij}^\alpha d_{ij}^\beta}{\sum_{i,j=1}^n \varphi_{ij}^\alpha d_{ij}^\beta} \quad (4)$$

به‌صورتی که α و β ضرایب تاثیر بوده و مقادیر آن‌ها به‌طور معمول تقریباً برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، φ_{ij} غلظت فرومون میان مسیر i و j و d_{ij} درجه مطلوبیت مسیر است. این فرمول بازتاب دهنده آن است که مورچه‌ها اغلب از مسیری پیروی می‌کنند که از غلظت فرومون بیش‌تری نسبت به سایر مسیرها برخوردار باشد. غلظت فرومون به‌دلیل تبخیر، در طول زمان تغییر می‌کند و منجر به جلوگیری از افتادن الگوریتم در بهینه محلی می‌شود. مقدار فرومون موجود در محیط از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود به طوری که $\gamma \in [0,1]$ است [۲۸].

جدول ۱: الگوریتم مورچگان [۲۸]

Table1: The ant colony algorithm [28]

شروع (Begin)

تعریف توابع هدف (Define the objective function)

تعریف نرخ تبخیر فرومون γ (Define the pheromone evaporation rate)

تازمانیکه معیار توقف برآورده شود (While stoppage criterion)

برای تمام گره‌های شبکه (For all nodes in the network)

تولید جواب جدید (Generate a new solution)

ارزیابی جواب جدید (Evaluate the new solution)

نشانه‌گذاری مکان‌ها یا مسیرهای بهتر با فرومون $\delta \varphi_{ij}$ (Mark better locations or paths with pheromone)به روز رسانی فرومون $\varphi_{ij} \leftarrow (1-\gamma)\varphi_{ij} + \lambda\varphi_{ij}$ (Update pheromone)

اتمام حلقه برای (End for)

تعیین بهترین مکان یا مسیر موجود (Determine the best location or path)

اتمام تازمانیکه (End while)

پایان (Finish)

انتخاب و فرموله‌سازی توابع هدف

مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد، که در تحقیقات مختلف، اهداف گوناگونی به‌منظور تخصیص کاربری زمین در نظر گرفته شده است. به‌طور مثال: بالینگ و همکاران، چهار هدف: بیشینه‌سازی توسعه اقتصادی و کمینه‌سازی تراکم ترافیک، مالیات و هزینه‌ها و تبدیل مکان‌های فرهنگی و تاریخی را به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی کاربری زمین در نظر گرفته‌اند [۲۹]؛ وانگ و همکاران، در فرآیند بهینه‌سازی تخصیص کاربری زمین، بیشینه‌سازی ارزش اقتصادی، و کمینه‌سازی از دست دادن کیفیت خاک، آب و پوشش جنگلی را دنبال کرده‌اند [۳۰]؛ چاندرامولی و همکاران، بیشینه‌سازی سطح کاربری مسکونی، فضای سبز شهری، امکانات رفاهی و سازگاری کاربری‌ها را مد نظر قرار داده [۳۱] و چنگ و کو، در تخصیص اراضی به بیشینه‌سازی توسعه اقتصادی و فرصت‌های شغلی و کمینه‌سازی آلودگی زیست محیطی و میزان کربن دی‌اکسید آزاد شده پرداخته‌اند [۶].

با توجه به سه معیار: دسترسی به داده‌های مورد نیاز، تعداد تکرار در تحقیقات پیشین، و امکان فرموله‌سازی هر هدف، در این پژوهش سه هدف: بیشینه‌سازی تناسب اراضی، سازگاری و فشردگی کاربری‌ها به‌عنوان اهداف تخصیص کاربری زمین در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که انتخاب این سه هدف به کلیت فرآیند حل لطمه‌ای وارد نکرده و امکان افزایش، کاهش یا تعویض اهداف با توجه به ویژگی محدوده‌های مورد مطالعه و خواست تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان امکان‌پذیر خواهد بود. این اهداف در جدول ۲ فرموله شده‌اند.

جدول ۲: فرموله‌سازی اهداف انتخابی بهینه‌سازی کاربری زمین

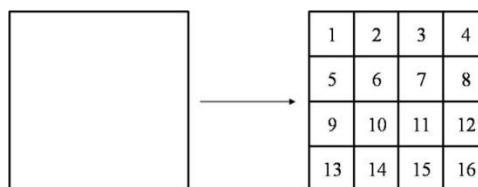
Table2: Formulation of the selected objectives for land use optimization

نماد (Symbol)	هدف (Objective)	فرموله‌سازی (Formulation)	تشریح فرمول (Description)
f_1	بیشینه‌سازی فشردگی کاربری‌ها (Land use compactness maximization)	$f_1 = \max \sum_{i=1}^n C_i$	در این معادله، C_i مقدار فشردگی محاسبه شده برای سلول i ام، و n تعداد کل سلول‌های موجود در محدوده مورد مطالعه است. به این ترتیب مقدار فشردگی هر سلول محاسبه شده، و سپس از مقادیر حاصل مجموع گرفته می‌شود. (C_i is the compactness value for cell i , and n is the number of cells in the study area. In doing so, this function sums up the calculated compactness value of all cells.)
f_2	بیشینه‌سازی سازگاری کاربری‌ها (Land use compatibility maximization)	$f_2 = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r comp_{i,j}$	در این رابطه، $comp_{i,j}$ مقدار سازگاری کاربری سلول i ام و j ام، و n و r به ترتیب شعاع همسایگی و تعداد کل سلول‌های موجود در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. (In this equation, $comp_{i,j}$ is the compatibility value of cell i with cell j , and n and r are the neighborhood radius and the number of cells in the study area, respectively.)
f_3	بیشینه‌سازی تناسب اراضی (Land suitability maximization)	$f_3 = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l suit_{i,j}$	در این رابطه، $suit_{i,j}$ مقدار مطلوبیت کاربری سلول i ام در معیار j ام، است. (In this equation, $suit_{i,j}$ is the suitability value of the allocated type to cell i in the j th criterion.)

$$\varphi_{ij}^{t+1} = (1 - \gamma) \varphi_{ij}^t + \delta \varphi_{ij}^t \quad (5)$$

مدل‌سازی مسأله تخصیص کاربری زمین

زمین متغیری پیوسته و عمل تخصیص نیازمند متغیر گسسته است. برای تبدیل متغیر پیوسته زمین به متغیر گسسته، محدوده مورد مطالعه به مجموعه‌ای از واحدهای مربع شکل (سلول) با اندازه (مساحت) یکسان تقسیم می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: گسسته‌سازی متغیر پیوسته‌ی زمین

Fig. 1: Discretization of the land continuous variable

تعریف متغیر تصمیم

در محدوده‌ای با i سلول و m گونه کاربری زمین، متغیر تصمیم، تخصیص کاربری m ام به سلول i ام می‌باشد. بنابراین، متغیر تصمیم با نماد x_{im} قابل نمایش است که در آن x_{im} یک متغیر باینری (دودویی) بوده که می‌تواند مقادیر ۰ و یک را اختیار نماید. اگر کاربری m به سلول i اختصاص یابد مقدار متغیر تصمیم برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ خواهد بود.

فرموله‌سازی قیود مسئله

قیود در نظر گرفته شده عبارتند از:

$$\min_required_m \leq \beta \times \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M x_{im} \leq \max_required_m \quad (6)$$

$$\min_required_m \leq \beta \times \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^M x_{im} \leq \max_required_m \quad (7)$$

قید اول (رابطه ۶)، نشان‌دهنده قید مساحت هر کاربری بوده و به معنای آن است که مجموع مساحت کاربری m ام در کل فرآیند تخصیص بایستی در بازه $[\min_required_m, \max_required_m]$ قرار بگیرد. در این قید β اندازه سلول تخصیص است. قید دوم (رابطه ۶) نیز تضمین می‌نماید که در هر سلول تخصیص فقط و فقط یک گونه کاربری اختصاص بیابد.

نحوه ترکیب اهداف

به‌منظور ترکیب اهداف با یکدیگر و تبدیل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به یک مسئله تک هدفه روش‌های متنوعی نظیر برنامه‌ریزی اهداف، مجموع وزنی و جز آن وجود دارد. در مقاله حاضر، از روش مجموع وزنی که در رابطه ۷ نشان داده شده است، استفاده می‌شود. در این رابطه f_o مقدار تابع هدف O و W_o وزن تابع O در میان سایر اهداف می‌باشد.

$$f_{total} = \sum_{o=1}^O (w_o \times f_o) \quad (8)$$

توسعه الگوریتم مورچگان برای مسئله تخصیص کاربری زمین

وظیفه هر مورچه در فرآیند بهینه‌سازی، یافتن موقعیت‌های بهتر برای اشغال است. به این ترتیب، الگوریتم مورچگان در ابتدا با استقرار مورچگان در محدوده تخصیص آغاز می‌شود. سپس، مورچگان به‌صورت دو به دو با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. انتخاب مکان بر مبنای فرومون موجود در محیط و ارزش اکتشافی صورت می‌گیرد. پس از مرحله انتخاب و جابه‌جایی، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. در صورتی که این مقدار بهبود یابد، تعویض مورد قبول قرار گرفته و در غیر این صورت، مکانی دیگر انتخاب می‌شود. این فرآیند تا زمان برآورده شدن شرط توقف ادامه می‌یابد.

به منظور انتخاب مورچگان برای جابه‌جایی، از یک رابطه احتمالی استفاده می‌شود. احتمال جابه‌جایی مورچه q با کاربری k واقع در سلول i در زمان t به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{ik}^q(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}(t)]^\beta}{\sum_{x \in q} [\tau_x(t)]^\alpha \cdot [\eta_x(t)]^\beta}, & \text{if } swap \in q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

در این رابطه، $\tau_{ik}(t)$ شدت فرومون مورچه از نوع k ، $\eta_{ik}(t)$ مقدار اکتشافی برای انتخاب سلول، و مقادیر α و β ثابت‌هایی هستند که اهمیت شدت فرومون در برابر مقدار اکتشافی را نشان می‌دهد. ارزش اکتشافی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{ik} = \frac{f_{ik}^n}{\sum_i f_{ik}^n} \quad (10)$$

مقدار شدت فرومون در زمان ۰ و در طول اجرای الگوریتم به‌ترتیب از طریق روابط ۱۰ و ۱۱ تعیین می‌شود که در آن G مجموع سلول‌های موجود در محدوده مورد مطالعه، ρ نرخ تبخیر فرومون، $\Delta \tau_{ik}(t)$ مقدار فرومون باقی مانده در سلول i با توجه به تابع هدف U ، و r عددی ثابت است.

$$\tau_{ik}(t=0) = \frac{1}{G} \quad (11)$$

$$\tau_{ik}(t+1) = \tau_{ik}(t)(1-\rho) + \Delta \tau_{ik}(t); \Delta \tau_{ik}(t) = r.U \quad (12)$$

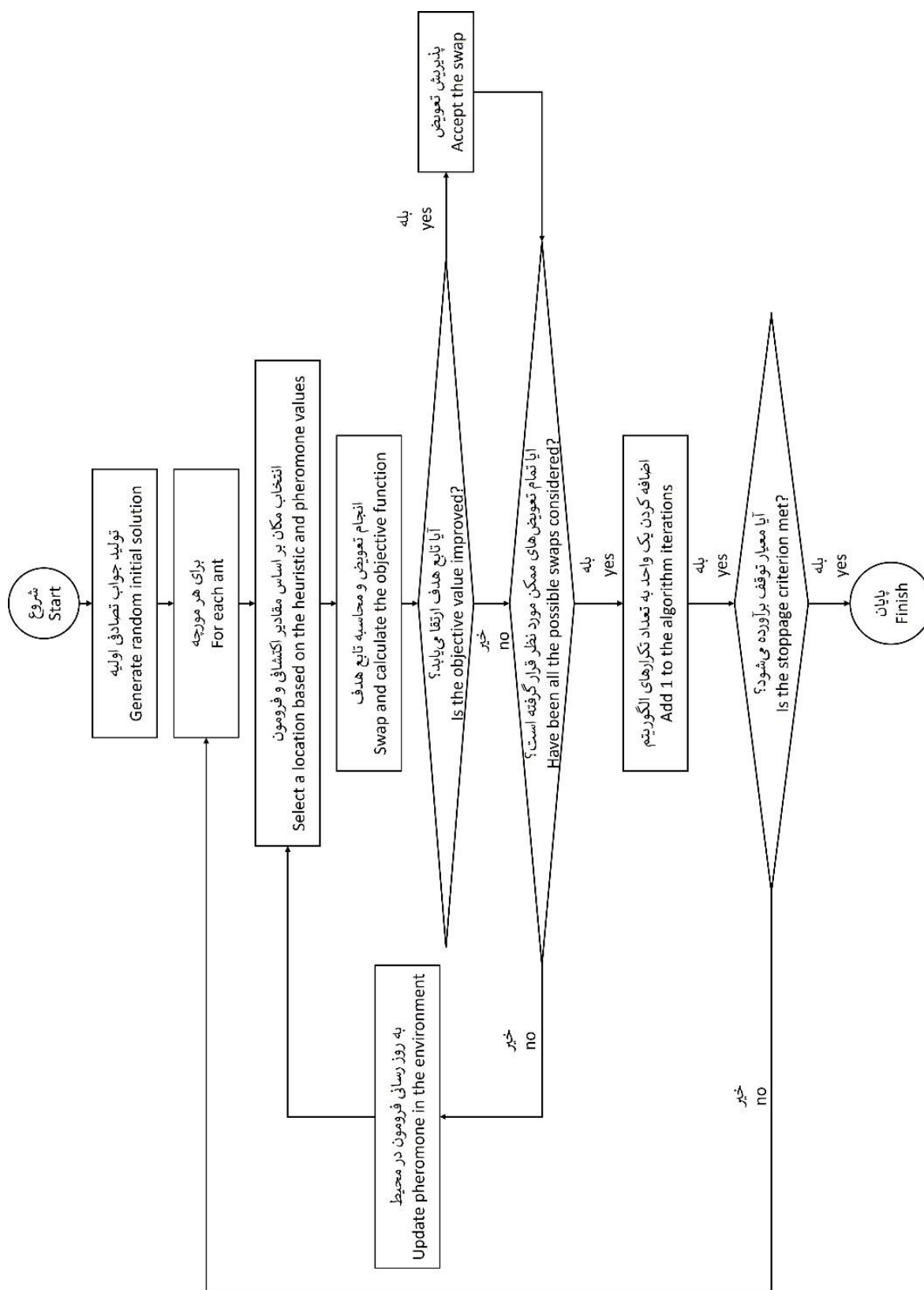
شکل ۲، فرآیند الگوریتم مورچگان برای حل مسئله کاربری زمین را نشان می‌دهد [۲۳].

معرفی محدوده مورد مطالعه

منطقه ۷ شهر اصفهان در اثر افزایش جمعیت و مهاجرت و تخصیص کاربری‌های بدون برنامه، طی سه دهه گذشته به شدت در معرض گسترش قرار گرفته است [۳۲]. این منطقه دارای پتانسیل‌های جذب جمعیت است، به گونه‌ای که حاصل آن گسترش بی‌رویه و توسعه فزاینده کالبدی می‌باشد. بخش وسیعی از این توسعه‌ها، توسعه غیر رسمی، خودرو و بی‌ضابطه است [۳۳]. به‌علاوه، این منطقه از جمله مناطق ناپایدار شهر اصفهان از نظر عوامل اقتصادی، اجتماعی، کالبدی، زیربنایی و بهداشتی-رفاهی به‌شمار می‌رود [۳۴]. منطقه ۷ شهر اصفهان به‌دلیل تعداد منطقی سلول‌های دربرگیرنده و مشکلات موجود در آن در حوزه کاربری زمین به‌عنوان بستر پیاده‌سازی الگوریتم مورچگان انتخاب شده است (شکل ۳).

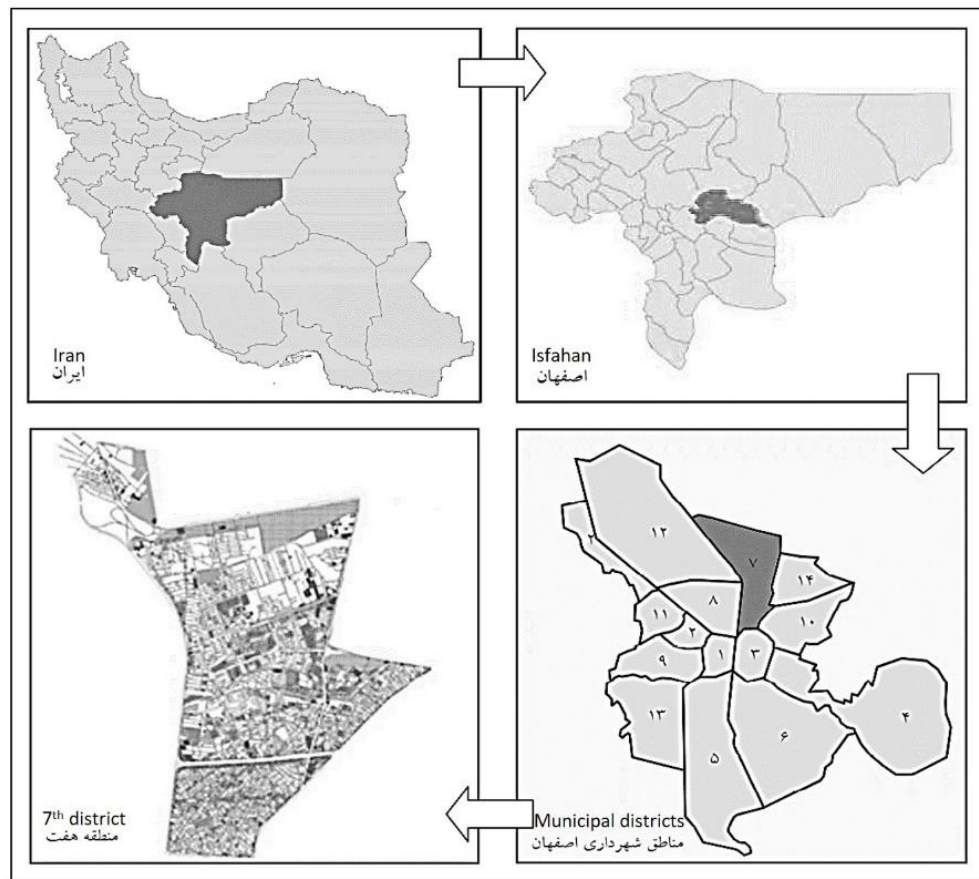
معرفی مفروضات و داده‌های مسئله

- گونه‌های کاربری: کاربری‌های در نظر گرفته شده به‌منظور عمل تخصیص عبارتند از شش گونه: مسکونی، بهداشتی، آموزشی، ورزشی، فضای سبز و فرهنگی.
- تعداد سلول تخصیص پویاننده محدوده مورد مطالعه: تعداد سلول‌های تشکیل‌دهنده شبکه تخصیص برابر با ۳۳۴ در نظر گرفته شده است.
- تعداد سلول‌های مورد نیاز کاربری‌ها: تعداد سلول‌های مورد نیاز برای کاربری‌های مسکونی، آموزشی، فرهنگی، بهداشتی، ورزشی و فضای سبز به ترتیب برابر با ۱۹۵، ۱۵، ۳۴، ۲۰، ۱۷ و ۵۳ تعیین شده است.



شکل ۲: مراحل الگوریتم مورچگان تطبیق یافته با مسئله بهینه سازی کاربری زمین

Fig. 2: Flowchart of the adapted ant colony algorithm with the land use optimization problem



شکل ۳: محدوده مورد مطالعه [۳۳]

Fig. 3: Study area [33]

نرم‌افزار MATLAB مطابق با شکل ۴ توسعه داده شده و به‌منظور اجرای آن از رایانه‌ای با CPU، CoreTM 2 Duo T9550 @ 2.66 GHz، و RAM ۳ گیگابایت استفاده به‌عمل آمده است.

خروجی حاصل از بهینه‌سازی تمامی اهداف به‌طور همزمان نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف نهایی برابر با ۱۰۵۴.۸۷۵ بوده و این مقدار در ۱۳۵۲.۱۸۴۵ ثانیه حاصل شده است. شکل ۵ آرایش بهینه کاربری‌ها در الگوی بهینه را نشان می‌دهد.

در نهایت، مقایسه خروجی الگوریتم توسعه داده شده در این پژوهش با الگوریتم ژنتیک و الگوریتم انجماد تدریجی مقایسه شده است (جدول ۶). لازم به‌ذکر است که مقایسه بر روی بهترین نتایج حاصل از هر یک از الگوریتم‌ها صورت گرفته است.

همان‌گونه که شکل ۶ نشان می‌دهد، مقایسه خروجی‌ها بیانگر آن است که الگوریتم مورچگان خروجی بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک و انجماد تدریجی هم از نظر کیفیت جواب (مقدار تابع هدف) و هم از نظر کارایی الگوریتم (زمان رسیدن به جواب) برای حل مسئله معرفی شده در محدوده مورد مطالعه تولید کرده است. به‌علاوه، کیفیت جواب الگوریتم ژنتیک از الگوریتم انجماد تدریجی بالاتر بوده اما زمان حل الگوریتم ژنتیک بالاتر از الگوریتم انجماد تدریجی است.

وزن اهداف برای محاسبه رابطه ۷: وزن ترکیبی اهداف مختلف برای اهداف اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۰/۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۵۰ در نظر گرفته شده است.

- سازگاری: میزان سازگاری کاربری‌ها با استفاده از روش دلفی و مشارکت ۱۵ متخصص مطابق با جدول ۳ به‌دست آمده است.
- تناسب اراضی: عامل فیزیکی تأثیرگذار بر نحوه استقرار کاربری‌ها، عامل فاصله از شبکه معابر موجود در نظر گرفته شده است. میزان مطلوبیت حاصل برای هر گونه کاربری زمین با استفاده از روش دلفی و مشارکت ۱۵ نفر در این روش به‌شرح جدول ۴ محاسبه شده است.
- پارامترهای الگوریتم مورچگان: مقادیر پارامترهای الگوریتم مطابق با ستون سوم جدول ۵ تنظیم می‌باشد. لازم به‌ذکر است که این مقادیر بهترین پارامترهای حاصل از آزمایش‌های متعدد با حالات مختلف ترکیب مقادیر واقع در ستون دوم این جدول می‌باشد.

نتایج و بحث

پس از تعیین داده‌های ورودی و پارامترهای الگوریتم مورچگان، به‌منظور پیاده‌سازی آن در محدوده مورد مطالعه، یک واسطه گرافیکی کاربر در

جدول ۳: مقدار سازگاری کاربری‌ها

Table 3: Land compatibility values

کاربری‌ها (Types)	مسکونی (Residential)	آموزشی (Educational)	فرهنگی (Cultural)	بهداشتی (Medical)	ورزشی (Sports)	فضای سبز (Green space)
مسکونی (Residential)	1.00	0.50	0.25	0.25	0.50	0.50
آموزشی (Educational)	0.50	1.00	0.50	0.75	0.75	1.00
فرهنگی (Cultural)	0.25	0.50	1.00	0.25	0.25	0.75
بهداشتی (Medical)	0.25	0.75	0.25	1.00	0.75	1.00
ورزشی (Sports)	0.50	0.75	0.25	0.75	1.00	1.00
فضای سبز (Green space)	0.75	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00

جدول ۴: تناسب کاربری‌ها نسبت به معیار فاصله از شبکه معابر

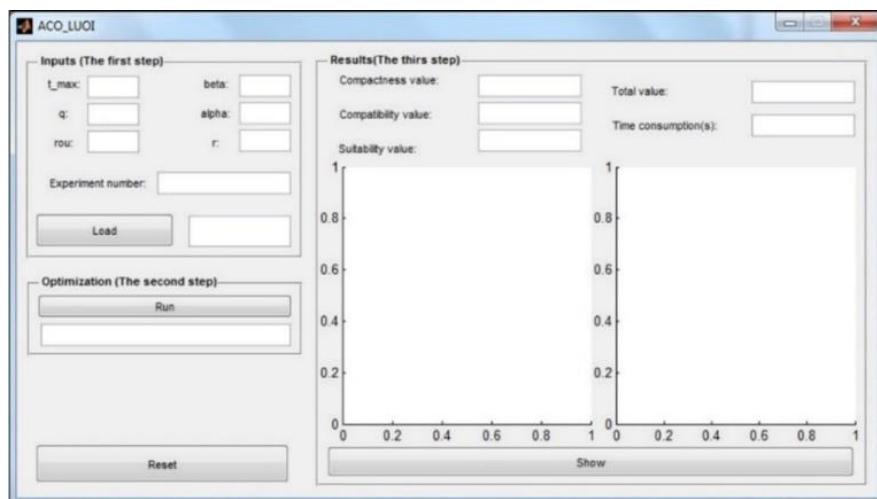
Table 4: Land type suitability corresponding to the criterion of distance from the road network

میزان مطلوبیت برای کاربری (Suitability for each land type)						تناسب اراضی (Land suitability)
فرهنگی (Cultural)	فضای سبز (Green space)	ورزشی (Sports)	آموزشی (Educational)	بهداشتی (Medical)	مسکونی (Residential)	
0.50	0.50	0.75	0.75	0.75	0.25	0.00
0.50	0.50	0.75	0.75	0.75	0.25	0.25
0.50	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.25	0.25	0.50	0.50	0.25	0.75	0.75
0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	1	1

جدول ۵: پارامترهای الگوریتم مورچگان

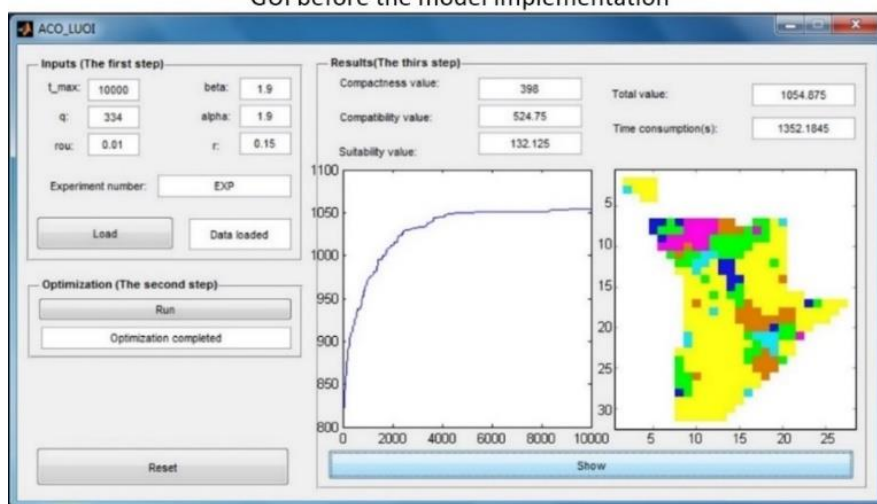
Table 5: Parameters of the ant colony algorithm

پارامترها (Parameters)	مقادیر آزمایشی (Experimental values)	بهترین مقادیر (Best values)
t_max	1000	
q	334	
ρ	0.010, 0.015, 0.020	0.01
α	1.7, 1.8, 1.9, 2.0	1.90
β	1.7, 1.8, 1.9, 2.0	1.90
r	0.10, 0.15, 0.20	0.15



واسط گرافیکی پیش از اجرا

GUI before the model implementation

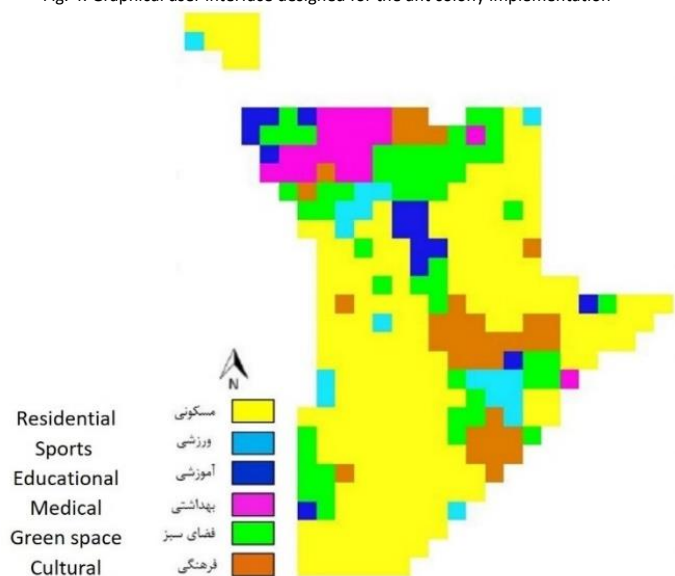


واسط گرافیکی پس از اجرا

GUI after the model implementation

شکل ۴: واسط گرافیکی کاربر طراحی شده برای پیاده‌سازی الگوریتم مورچگان

Fig. 4: Graphical user interface designed for the ant colony implementation



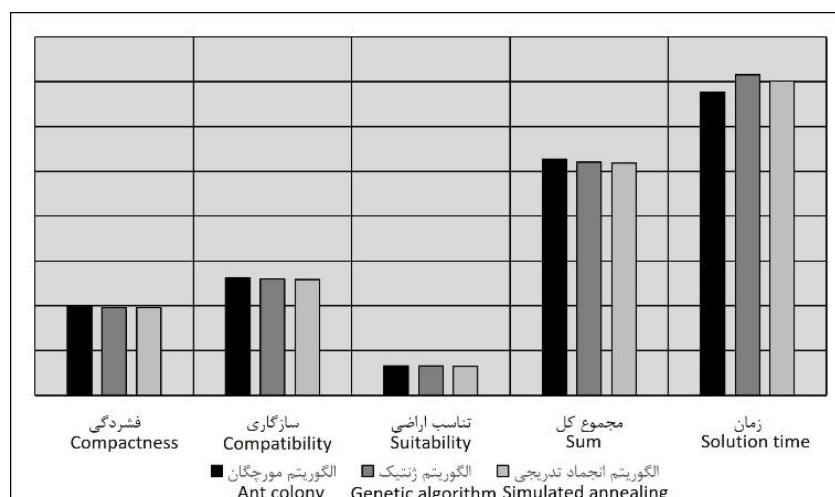
شکل ۵: آرایش بهینه کاربری‌ها در محدوده مورد مطالعه

Fig. 5: Optimal land use arrangement

جدول ۶: مقایسه خروجی الگوریتم مورچگان، انجماد تدریجی، ژنتیک و وضع موجود

Table 6: Comparison of the outputs of the ant colony, simulated annealing, and genetic algorithms with the existing land use arrangement

الگوریتم (Algorithm)	هدف اول (f1)	هدف دوم (f2)	هدف سوم (f3)	مجموع (sum)	زمان حل (ثانیه) (Solution time (s))
مورچگان (Ant colony)	398	524.75	132.135	1054.875	1352.1845
انجماد تدریجی (Simulated annealing)	391	517.25	129.100	1037.350	1402.4157
ژنتیک (Genetic)	391	519.50	131.210	1041.710	1431.3458



شکل ۶: مقایسه نتایج الگوریتم‌ها

Fig. 6: Comparing the algorithms' outputs

نتیجه‌گیری

- خروجی سامانه پشتیبان تصمیم نشان می‌دهد که با توجه به سه هدف: فشردگی، سازگاری و تناسب اراضی، کاربری‌های فرهنگی و ورزشی عمدتاً در قسمت مرکزی محدوده مورد مطالعه قرار گرفته است که در کنار سایر کاربری‌ها، خدمات مورد نیاز در مرکز بافت را تأمین می‌نماید.
- از جمله پیشنهادات برای انجام پژوهش‌های آتی نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- استفاده از توابع هدف با امکان بازنمایی مقیاس مختلف کاربری‌ها (محلی، منطقه‌ای و شهری) در کنار یکدیگر.
- تطابق مدل با داده‌های برداری در سامانه اطلاعات جغرافیایی.
- تلفیق مدل با نظریه گراف و یکپارچه‌سازی آن با شبکه معابر و عامل دسترسی.
- تعریف توابع هدف به‌منظور بازنمایی تأثیرات متقابل اهداف بر یکدیگر.
- تعریف قیود مساحت به‌صورت متغیر در مقیاس سلول و قطعه.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دقت نظر و سرعت عمل اعضای محترم هیأت تحریریه، داوران و مسئولین اجرایی نشریه‌ی پژوهش‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

در راستای پرسش پیش روی این پژوهش، "کاربری‌ها در بافت‌های شهری بایستی با چه آرایشی توزیع شوند تا اهدافی خاص (مانند: فشردگی، سازگاری و جز آن) بیشینه و یا کمینه‌گردند؟" در این مقاله، یک سامانه پشتیبان تصمیم با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری برای تخصیص کاربری‌ها توسعه یافته و به‌کارگیری شده است. در این مطالعه، سه هدف و دو قید جهت تخصیص شش گونه کاربری به منطقه ۷ شهر اصفهان در نظر گرفته شده و الگوریتم، در قالب یک واسطه گرافیکی کاربر پیاده‌سازی شده است. در نهایت، خروجی‌های حاصل از الگوریتم مورچگان با الگوریتم ژنتیک و انجماد تدریجی مورد مقایسه قرار گرفته و اهم نتایج تحقیق به شرح زیر است:

- کارایی و کیفیت سامانه پشتیبان تصمیم مجهز به الگوریتم مورچگان در حل مسأله معرفی شده در محدوده مورد مطالعه از الگوریتم ژنتیک و انجماد تدریجی بالاتر است.
- خروجی سامانه پشتیبان تصمیم نشان می‌دهد که در وضعیت بهینه و با توجه به اهداف در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی، بخش اعظمی از کاربری‌های خدماتی در کنار فضای سبز استقرار یافته‌اند. همچنین، کاربری‌های خدماتی در شمال و مرکز محدوده مستقر شده که دسترسی ساکنین موجود در بافت درونی به خدمات مورد نیاز را امکان‌پذیر می‌سازد.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [14] Ocampo L. Development and usage of multi-criteria decision making/analysis methodologies with fuzzy sets for guiding strategic development decisions. England: University of Portsmouth; 2023.
- [15] Filatova T, Parker DC, van der Veen A. Agent-based urban land markets: agent's pricing behaviour, land prices and urban land use change. *J Artif Soc Soc Simul*. 2009;12(1):3. doi:10.18564/jasss.1370.
- [16] Ligmann-Zielinska A, Jankowski P. Spatially-explicit integrated uncertainty and sensitivity analysis of criteria weights in multicriteria land suitability evaluation. *Environ Model Softw*. 2014;57:235-47. doi:10.1016/j.envsoft.2014.03.007.
- [17] Ahuja RK, Orlin JB, Tiwari A. A greedy genetic algorithm for the quadratic assignment problem. *Comput Oper Res*. 2000;27(10):917-34. doi:10.1016/S0305-0548(99)00141-2.
- [18] Shaygan M, Ali Mohammadi A, Mansourian A. Multi-objective land use allocation optimization through NSGA-II algorithm. *Iran J Remote Sens GIS*. 2012;4(2).
- [19] Khosh Amooz EA, Arashpour M, Golkaran A, Ahmadi A. Genetic algorithms and planning problems. *Amayeshe Mohit*. 2010;3(11):85-97.
- [20] Santé-Riveira I, Crecente R, Miranda D. Algorithm based on simulated annealing for land-use allocation. *Comput Geosci*. 2008;34(3):259-68. doi:10.1016/j.cageo.2007.03.014.
- [21] Duh JD, Brown DG. Knowledge-informed Pareto simulated annealing for multi-objective spatial allocation. *Comput Environ Urban Syst*. 2007;31(3):253-81. doi:10.1016/j.compenvurbysys.2006.09.002.
- [22] Aerts JC, Heuvelink GB. Using simulated annealing for resource allocation. *Int J Geogr Inf Sci*. 2002;16(6):571-87. doi:10.1080/13658810210138742.
- [23] Liu X, Li X, Liu L, He J, Ai B. A multi-type ant colony optimization (MACO) method for optimal land use allocation in large areas. *Int J Geogr Inf Sci*. 2012;26(7):1325-43. doi:10.1080/13658816.2011.633923.
- [24] Lumer ED, Faieta B. Diversity and adaptation in populations of clustering ants. In: Meyer JA, Roitblat HL, Wilson SW, editors. *From animals to animats 3: Proceedings of the Third International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press; 1994. doi: 10.7551/mitpress/3117.003.0071.
- [25] Sim KM, Sun WH. Multiple ant-colony optimization for network routing. In: *First International Symposium on Cyber Worlds*, 2002. Proceedings; 2002. IEEE. doi:10.1109/CW.2002.1180922.
- [26] Coello CC, Lamont GB, Van Veldhuizen DA. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Berlin: Springer; 2007. doi: 10.1007/978-0-387-36797-2.
- [27] Merrikh Bayat F. *Nature-inspired optimization algorithms*. Nas; 2012.
- [1] Peng J, Wang Y, Wu J, Zhang Y, Li W. Ecological effects associated with land-use change in China's southwest agricultural landscape. *Int J Sustain Dev World Ecol*. 2006;13(4):315-25. doi:10.1080/13504500609469681.
- [2] Randolph J. *Environmental land use planning and management*. Washington, DC: Island Press; 2004.
- [3] Verburg PH, Veldkamp A, Fresco LO. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. *Appl Geogr*. 1999;19(3):211-33. doi:10.1016/S0143-6228(99)00003-X.
- [4] Ligmann-Zielinska A, Church RL, Jankowski P. Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation. *Int J Geogr Inf Sci*. 2008;22(6):601-22. doi:10.1080/13658810701587495.
- [5] Cao K, Batty M, Huang B, Liu Y, Yu L, Chen J. Spatial multi-objective land use optimization: extensions to the non-dominated sorting genetic algorithm-II. *Int J Geogr Inf Sci*. 2011;25(12):1949-69. doi:10.1080/13658816.2011.569014.
- [6] Chang Y-C, Ko T-T. An interactive dynamic multi-objective programming model to support better land use planning. *Land Use Policy*. 2014;36:13-22. doi:10.1016/j.landusepol.2013.07.001.
- [7] Zhang H, Zeng Y, Bian L. Simulating multi-objective spatial optimization allocation of land use based on the integration of multi-agent system and genetic algorithm. *Int J Environ Res*. 2010;4(4):765-76. doi: 10.22059/ijer.2010.263.
- [8] Ritten JP, Bastian CT, Gray ST, Hoag D, Paisley SI, Frasier WM. Optimal rangeland stocking decisions under stochastic and climate-impacted weather. *Am J Agric Econ*. 2010;92(4):1242-55. doi:10.1093/ajae/aaq055.
- [9] Xu H-Q, Chen B-Q. Remote sensing of the urban heat island and its changes in Xiamen City of SE China. *J Environ Sci (China)*. 2004;16(2):276-81.
- [10] Geneletti D. Incorporating biodiversity assets in spatial planning: methodological proposal and development of a planning support system. *Landscape Urban Plan*. 2008;84(3-4):252-65. doi:10.1016/j.landurbplan.2007.08.003.
- [11] Moilanen A, Wilson KA, Possingham HP. *Spatial conservation prioritization: quantitative methods and computational tools*. Oxford: Oxford University Press; 2009. doi: 10.1093/oso/9780199547760.001.0001.
- [12] Waddell P. *UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning*. J Am Plan Assoc. 2002;68(3):297-314. doi:10.1080/01944360208976274.
- [13] Malczewski J, Rinner C. *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Berlin: Springer; 2015. doi: 10.1007/978-3-540-74757-4.

[34] Nastaran M, Ghalehnoee M, Sahebgharani A. Ranking sustainability of urban districts through factor and cluster analyses, case study: Municipal Districts of Isfahan. *Arman Shahr Archit Urban Dev.* 2014;12(2):177-89.

[28] Jalali Naini G, Jafari Eskandari M, Nozari H. Engineering optimization with emphasis on metaheuristic methods. The Dibagaran Artistic and Cultural Institute; 2012.

[29] Balling RJ, Taber JD, Brown M. Multiobjective urban planning using genetic algorithm. *J Urban Plan Dev.* 1999;125(2):86-99.
doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(1999)125:2(86).

[30] Wang X, Yu S, Huang G. Land allocation based on integrated GIS-optimization modeling at a watershed level. *Landscape Urban Plan.* 2004;66(2):61-74.
doi:10.1016/S0169-2046(03)00098-9.

[31] Chandramouli M, Huang B, Xue L. Spatial change optimization: integrating GA with visualization for 3D scenario generation. *Photogramm Eng Remote Sens.* 2009;75(8):1015-22. doi:10.14358/PERS.75.8.1015.

[32] Shahrokhaneh S. Review of the Isfahan's 7th and 8th Detailed Plan. 2007.

[33] Mohammadi M, Malekipour E, Sahebgharani A. Modeling urban expansion in peripheral lands through cellular automata (CA) and analytic hierarchical process, case study of Isfahan's 7th Municipal District. *J Urban Reg Stud Res.* 2013;5(18):175-92.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



علیرضا صاحبقرانی در حال حاضر، عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی حمل و نقل دانشگاه صنعتی اصفهان است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان، مدل سازی یکپارچه حمل و نقل و کاربری زمین، بهینه سازی چند سطحی حمل و نقل و فعالیت، تحلیل و مدل سازی دسترسی، مدل سازی و برنامه ریزی حمل و نقل همگانی و توسعه سیستم های پشتیبان تصمیم فضایی در برنامه ریزی حمل و نقل و بهینه سازی کاربری زمین می باشد.

Sahebgharani, A. Assistant Professor at the Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

✉ a_sahebgharani@iut.ac.ir

Citation (Vancouver): Sahebgharani A. [Development of a Decision Support System for Optimizing Land Use Allocation Using the Ant Colony Algorithm (Case Study: 7th Municipal District of Isfahan)]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 219-232

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11006.1070>



COPYRIGHTS



© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Large Scale Crop Type Mapping Using Multi Temporal Sentinel-2 Imagery and a New Attention U-Net-ViT

M. HeidariGholanlo¹, R. Javanmard Alitappeh^{*1}, E. Ghanbari Parmehr²¹ Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran² Dept. of Geomatics Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Received: 03 July 2024

Reviewed: 19 September 2024

Revised: 30 September 2024

Accepted: 01 November 2024

KEYWORDS:

Remote Sensing

Deep Learning

Satellite Image Processing

Agricultural Products Detection

* Corresponding author

✉ RezaJavanmard@mazust.ac.ir

☎ (+98 11) 34150000

Background and Objectives: With the advancement of technology and the emergence of multifunctional satellites, a significant amount of real time information is now transmitted from the Earth's surface. These satellites are equipped with sensors that obtain critical information by sending signals at various frequencies to the Earth's surface. The data received from these satellites are utilized in various scientific and military applications, including aviation, geographical studies, meteorology, agriculture, and other research fields. The agricultural sector and crop monitoring have especially benefited from remote sensing methods compared to traditional methods, becoming a primary tool for collecting environmental information for area monitoring applications, attracting researchers' attention. One such application is regional monitoring to examine agricultural products over cultivated areas. The use of remote sensing tools and satellite images is highly efficient due to their wide regional coverage. To automatically analyze these images, classify, and segment cultivated areas, machine learning methods are currently employed. Among these methods, deep learning offers superior performance and higher speed compared to other learning methods, such as manual or semi-automatic methods.

Methods: This paper utilizes deep learning models suitable for segmenting agricultural areas. Generally, these models produce an output of equivalent dimensions for each input. Therefore, for working with satellite images, an improved U-Net model is proposed in this study. The proposed model is developed using Vision Transformers (ViT) in the model's bottleneck for classifying and segmenting four types of agricultural products: rice, wheat, canola, and corn. Compared to convolutional layers, ViT is more efficient in terms of conceptual and algorithmic implementation and requires less computational power. This model addresses the problems and weaknesses of the base U-Net model that arise with complex datasets, diverse in shape, size, and texture, enabling more accurate and reliable segmentation results. Additionally, the proposed improvements enhance the model's robustness and adaptability to various agricultural scenarios.

Findings: In the numerous experiments conducted, the proposed method achieved an accuracy of 83.84 and Precision of 70.69%, providing a better classification of the five target products compared to other methods. The qualitative outputs also indicate better segmentation of the input images when applying the proposed method. Alongside the accuracy metric, other metrics such as focal loss, recall, precision, and MIoU were examined, with the proposed method reaching acceptable levels in most cases. Notably, as the target area was in Iran, data collection and labeling were also carried out in this research, providing a suitable dataset for training other models.

Conclusion: This research presents an end-to-end model for learning features related to the segmentation of satellite images. The results indicate that the proposed method can be effectively used for segmenting satellite images received from Sentinel-2 for the target products, such as various crops. Therefore, the results obtained can play a crucial role in water consumption management, planting structure adjustment, loss estimation, and agricultural performance evaluation, providing significant insights for stakeholders. By utilizing these methods, it is possible to achieve improved efficiency and accuracy in agricultural management and optimize resource use in this area, contributing to sustainable agricultural practices and better decision-making processes.



NUMBER OF REFERENCES

52



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

3

مقاله پژوهشی

نقشه‌برداری نوع محصول در مقیاس بزرگ با استفاده از تصاویر چندزمانی سنتینل-۲ با مدل Attention U-Net-Vit جدید

مجید حیدری قولانلو^۱، رضا جوانمرد علی تپه^{۱*}، عبادت قنبری پرمهر^۲^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: با پیشرفت تکنولوژی و پیدایش ماهواره‌های چندمنظوره، اطلاعات لحظه‌ای زیادی از سطح زمین مخابره می‌شود. ماهواره‌ها به سنجنده‌هایی مجهز هستند که می‌توانند با ارسال سیگنالهایی در فرکانسهای مختلف به سطح زمین به اطلاعات مهمی دست یابند. داده‌های دریافتی از این ماهواره‌ها در کاربردهای مختلف علمی و نظامی از جمله: هوانوردی، مطالعات جغرافیایی، هواشناسی، کشاورزی و دیگر حوزه‌های تحقیقاتی قابل استفاده است. حوزه‌ی کشاورزی و پایش سطوح کشت نیز یکی از حوزه‌هایی است که با توجه به مزیت‌های روش‌های سنجش‌ازدور در مقایسه با روش‌های سنتی، به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی در جمع‌آوری اطلاعات محیطی برای کاربردهای پایش نواحی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از این موضوعات، پایش منطقه‌ای برای بررسی محصولات کشاورزی در مساحت سطح زیرکشت است که استفاده از ابزارهای سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای به جهت پوشش منطقه‌ای وسیع بسیار کارا است. جهت بررسی خودکار این تصاویر، طبقه‌بندی و بخش‌بندی نواحی سطح زیرکشت، امروزه از روش‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود. در میان این روش‌ها، یادگیری عمیق در مقایسه با دیگر روش‌های یادگیری مانند روش‌های دستی و یا روش‌های نیمه‌خودکار، عملکرد بهتر و سرعت بالاتری دارد.

روش‌ها: در این مقاله مدل‌های یادگیری عمیق که برای بخش‌بندی نواحی مناسب هستند مورد استفاده قرار گرفته است. عموماً این مدل‌ها برای هر ورودی، خروجی معادل آن را با همان ابعاد تولید می‌کنند. لذا جهت کار بر روی تصاویر ماهواره‌ای، در این پژوهش مدل U-Net بهبود یافته‌ای ارائه شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از ViT در گلوگاه مدل برای طبقه‌بندی و بخش‌بندی چهار نوع محصول کشاورزی شامل برنج، گندم، کلزا و ذرت توسعه داده شده است. استفاده از ViT در مقایسه با لایه‌های کانولوشن از لحاظ ایده و پیاده‌سازی الگوریتمی کارا تر است و حجم محاسباتی کمتری دارد. این مدل مشکلات و نقاط ضعف مدل پایه U-Net را که برای مجموعه داده‌های پیچیده، متنوع در شکل، اندازه و بافت به وجود می‌آید، برطرف می‌نماید.

یافته‌ها: در نتایج آزمایشات انجام شده روش پیشنهادی توانسته است با رسیدن به دقت ۸۳.۸۴ و صحت ۷۰.۶۹، بهتر از دیگر روش‌ها دسته‌بندی درستی از ۵ محصول مورد نظر را ارائه دهد. همچنین خروجی‌های کیفی نیز نشان‌دهنده‌ی بخش‌بندی بهتر تصاویر ورودی با اعمال روش پیشنهادی می‌باشد. در کنار معیار دقت، دیگر معیارها مانند افت کانونی، بازیابی و MIOU نیز مورد بررسی قرار گرفت که در اکثر موارد روش پیشنهادی به مقدار قابل قبولی رسیده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه منطقه‌ی مورد نظر در ایران در نظر گرفته شد، جمع‌آوری و برچسب‌گذاری داده‌ها نیز در این پژوهش انجام شده است که می‌تواند بعنوان مجموعه داده‌ی مناسبی برای آموزش دیگر مدل‌ها استفاده شود.

نتیجه‌گیری: این تحقیق یک مدل سرتاسری برای یادگیری ویژگی‌های مرتبط با بخش‌بندی تصاویر ماهواره‌ای ارائه داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش ارائه شده می‌تواند برای بخش‌بندی تصاویر ماهواره‌ای دریافتی از سنتینل-۲ برای محصولات مورد نظر استفاده قرار گیرد. لذا نتایج حاصل می‌تواند در مدیریت مصرف آب، تنظیم ساختار کاشت، تخمین تلفات و ارزیابی عملکردهای زراعی نقش مهمی را ایفا نماید. با بهره‌گیری از این روش‌ها، می‌توان به بهبود کارایی و دقت در مدیریت کشاورزی دست یافت و از منابع این حوزه بهینه‌تر استفاده کرد.

تاریخ دریافت: ۱۳ تیر ۱۴۰۳

تاریخ داوری: ۲۹ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح: ۰۹ مهر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۱ آبان ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

سنجش از دور

یادگیری عمیق

پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تشخیص محصولات کشاورزی

* نویسنده مسئول

Rezajavanmard@mazust.ac.ir

۰۱۱-۳۴۱۵۰۰۰۰

مقدمه

در دنیای امروز حوزه‌ی کشاورزی یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان منابع آبی در سطح جهانی است [۱ و ۲] و بیش از ۷۰ درصد از آب سطحی و زیرزمینی برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود. با توجه به افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی، موضوع کمبود آب به یک معضل جهانی تبدیل شده است. از سوی دیگر رشد بی‌رویه مناطق شهری باعث کاهش زمین‌های زراعی شده است که این موضوع امنیت غذایی دنیا را تهدید می‌کند [۳ و ۴]. در این شرایط، مدیریت کارآمد مصرف آب در بخش کشاورزی به یکی از اولویت‌های اصلی تبدیل شده است. انتخاب روش‌های مناسب آبیاری، استفاده بهینه از منابع آب و مدیریت کاشت و برداشت محصولات، همگی نقش مهمی در کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری آن دارند.

یکی از ابزارهای پیشرفته‌ای که به مدیریت مصرف آب و بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی کمک می‌کند، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است [۵ و ۶]. تصاویر ماهواره‌ای امکان رصد و پایش مداوم و دقیق اراضی کشاورزی را فراهم می‌کنند و اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت خاک، رشد محصولات، نیاز آبی گیاهان، و تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهند [۷ و ۸]. با تحلیل این تصاویر، کشاورزان می‌توانند تصمیمات بهتری درباره زمان و میزان آبیاری، کوددهی و برداشت محصولات بگیرند. همچنین، این داده‌ها به شناسایی مناطق دارای تنش آبی یا آفت که نیاز به مدیریت ویژه دارند کمک می‌کنند. لذا در این مقاله، تحلیل تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص و دسته‌بندی نوع محصولات کشاورزی مطالعه شده است. نتایج حاصل از روش پیشنهادی در بهبود بهره‌وری منابع آبی، کاهش هزینه‌های تولید، و افزایش بازده محصولات کشاورزی و در نهایت به حفظ منابع طبیعی و پایداری کشاورزی منجر می‌شوند.

تحلیل تصاویر ماهواره‌ای دقیق برای تشخیص نوع محصول به مجموعه داده‌های جامع و دقیق نیاز دارد. جمع‌آوری تصاویر از مناطق کشت با استفاده از ماهواره سنتینل-۲ امکان‌پذیر است، که تصاویر با وضوح طیفی، مکانی، و زمانی مناسب را برای شناسایی و تحلیل دقیق‌تر محصولات فراهم می‌کند [۹ و ۱۰]. با این حال، نقشه‌برداری نوع محصول با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل چرخه‌های سریع و متنوع فنولوژی، شیوه‌های مختلف کشاورزی، و تغییرات زمانی و طیفی زیاد با چالش‌هایی مانند عوامل محیطی در مشاهدات ماهواره‌ای، تنوع زمان برداشت محصولات، نیاز به مشاهدات میدانی، داده‌های عظیم ماهواره‌ها همراه است [۱۱].

با توجه به اهمیت موضوع این مقاله روش‌های مختلفی جهت شناسایی نوع محصولات کشاورزی از روی تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های سنتی یادگیری ماشین از جمله: ماشین بردار پشتیبان [۱۶]، جنگل تصادفی [۱۴ و ۱۷] یا به روش‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های حافظه طولانی کوتاه مدت [۱۸] و شبکه‌های عصبی پیچشی اشاره کرد. روش‌های یادگیری

عمیق دقت نگاشت نوع محصول را با استفاده از ویژگی‌های طیفی افزایش می‌دهند [۱۳ و ۱۵ و ۱۹]. با این حال، آموزش مجموعه داده‌هایی با مقیاس بزرگ چالش‌برانگیز است. اکثر مطالعات نقشه‌برداری محصولات کشاورزی بر روی روش‌های رایج یادگیری ماشین سنتی متمرکز شده‌اند. معمولاً روش‌های یادگیری به دلیل عوامل متعددی مانند شرایط آب و هوایی و نوسانات زمان کاشت، دقت بالایی را ارائه نمی‌دهند. برخلاف روش‌های قبلی، بخش‌بندی مبتنی بر پیکسل/بخش روشی است که یک تصویر سنجش‌ازدور را بر اساس بخش‌های تصویر بخش‌بندی می‌کند. بخش‌بندی فرآیند تعریف پیکسل‌های همگن در بخش‌های تصویری مشابه از یک طیف است [۲۰]. در این مقاله برای دسته‌بندی از روش‌های یادگیری عمیق استفاده شده است؛ که بخش‌بندی نقشه‌ها را براساس محصولات کاشت شده نشان می‌دهد. لذا علاوه بر به کار بردن روش‌های معمول که در مدل U-Net برای بخش‌بندی معنایی استفاده شده است؛ با اضافه کردن شبکه ترنسفورمر بینایی [۲۱]، در گلوگاه مدل، و مکانیسم توجه در اتصالات برش باعث بهبود طبقه‌بندی و شناسایی محصولات کشاورزی شده است. مدل پیشنهادی توانسته است چهار محصول اصلی و یا هشت کلاس تعریف شده را دسته‌بندی نموده و نواحی هر دسته را به صورت پیکسلی تفکیک کند.

هدف این پژوهش ارائه یک مدل بهبودیافته از U-Net برای تهیه نقشه دقیق انواع مختلف محصولات کشاورزی از تصاویر در مقیاس بزرگ با استفاده از تصاویر چند زمانی از ماهواره سنتینل-۲ از نه استان کشور است. بهبودها شامل دو جنبه اصلی است. برای جمع‌آوری داده ابتدا تصاویر ماهواره‌ای با مقیاس اصلی از Google Earth Engine (GEE) دریافت شده است. سپس با اعمال پیش پردازش‌هایی مانند حذف ابر و تاثیرمیزان تابش خورشید، از ابزار Q-GIS برای تقسیم بندی تصاویر بزرگ به ابعاد 256×256 استفاده شده است. در ادامه نیز برای حاشیه نویسی (رنگ بندی محصولات و پس زمینه) از ابزار QGIS استفاده شده است. در نهایت نیز تکنیک‌های داده افزایی جهت افزایش تعداد نمونه‌ها اعمال شده‌اند. سپس برای بهره‌برداری از اطلاعات طیفی، زمانی و مکانی داده‌های جمع‌آوری شده، مدل بخش‌بندی معنایی جهت طبقه بندی محصولات کشاورزی معرفی می‌شود. که شامل یک ماژول ViT در گلوگاه مدل اصلی Attention U-Net در جهت بهینه سازی فرایند آموزش و کاهش مشکل گرادیان ناپدید شونده می باشد. در نهایت عملکرد مدل با معیارهای مختلف از جمله Dice coefficient که مبتنی بر پیکسل است، و همچنین دقت، صحت و MIOU ارزیابی می‌شود تا دقت نقشه‌برداری محصولات کشاورزی را بهبود بخشد. با استفاده از روش پیشنهادی، بخش‌بندی معنایی تصاویر ماهواره‌ای تسهیل شده است. لازم به ذکر است که برخلاف روش‌های قبلی که برای یک محدوده خاص طراحی شده و سپس به نواحی دیگر تعمیم داده می‌شدند، در این مقاله توزیع داده‌ها در سطح کشور انجام شده است.

کارهای مرتبط

کاربردهای سنجش از دور در ابتدا با مدل‌های آماری ارائه شده‌اند و با پیشرفت روش‌های یادگیری ماشینی باعث بهبود طبقه‌بندی و شناسایی در کاربردهای مختلف به کمک تصاویر بدست آمده در تصاویر ماهواره‌ای شده‌اند. طبقه‌بندی با استفاده از تصاویر فراطیفی سنجش از دور با روش‌های یادگیری ماشینی سنتی مانند تحلیل مؤلفه اصلی و بردار ماشین پشتیبان به مرور جای خود را به روش‌های یادگیری عمیق داده است. اخیراً تکنیک‌های یادگیری عمیق به عنوان یک روش مفید برای نقشه‌برداری پوشش زمین از طریق طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور نشان داده شده است. یکی از کاربردهای سنجش از دور شناسایی و طبقه‌بندی در محصولات کشاورزی می باشد، که در ادامه در جدول ۱ به جدیدترین روش‌ها اشاره می‌شود خلاصه جدیدترین مدل‌های یادگیری عمیق که به بخش‌بندی و یا طبقه‌بندی محصولات کشاورزی و یا به هر دو پرداخته‌اند و همه آن‌ها از مجموعه دیتاست ماهواره سنتینل-۲ استفاده کرده‌اند؛ آورده شده است.

در میان داده‌های مختلف، روش فضایی، طیفی و زمانی بالاترین نتایج طبقه‌بندی را به دست آورده‌اند؛ و نسبت به سایر روش‌های آزمایش شده مانند مکانی و رادیومتریکی بهتر عمل کرده‌اند [۲۲]. بر این اساس مجموعه داده‌هایی که در این پژوهش به کار می‌روند، ویژگی‌های فضایی، طیفی و زمانی را دارند. در روش‌های یادگیری عمیق از معماری‌هایی مانند شبکه عصبی پیچشی و شبکه‌های عصبی بازگشتی تکامل یافته استفاده شده است؛ که عملکرد بالایی را در کاربردهای گوناگون از جمله بخش‌بندی معنایی اشیاء داشته‌اند [۲۴ و ۲۳]. مطالعات نشان می‌دهند که طبقه‌بندی محصولات کشاورزی با استفاده از بخش‌بندی معنایی به کمک روش‌های یادگیری عمیق و داده‌های سنجش از دور، ابزار مهم برای تصمیم‌گیری در شناسایی محصولات کشاورزی در سراسر جهان است [۲۵]. عاصم و همکاران در تحقیقی روشی را برای تشخیص نوع محصولات کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارائه داده‌اند، که با استفاده از تصاویر چندزمانی به عنوان یک تصویر واحد در نظر گرفته و برای بخش‌بندی محصولات، ترکیبات مناسبی از ۱۰ باند ماهواره سنتینل-۲ را انتخاب کرده‌اند.

معماری [۴۸] TransU-Net بر روی داده‌های شش محصول مختلف ارزیابی شده است و دقت ۸۵٪ را در طبقه‌بندی انواع مختلف محصولات داشته است در این مطالعه ابعاد تصویر ۶۴×۶۴ پیکسل در نظر گرفته شده است [۲۶]. در مطالعه‌ای دیگری که توسط آقای سیدی و همکارانش در چارچوب جدیدی را با ترکیب شبکه عصبی پیچشی و یک مکانیسم توجه دوگانه، برای طبقه‌بندی دقیق محصولات با استفاده از داده‌های سری زمانی سنتینل-۲ پیشنهاد شد [۲۷]. ایده اصلی پشت مکانیسم توجه این است که تمرکز شبکه را بر استخراج ویژگی‌های معنی‌دار به جای ویژگی‌های غیرضروری هدایت می‌کند [۲۸]. در این مطالعه شش نوع مختلف زراعی (یونجه، لوبیا، گندم، جو، کلزا و باغ) و سه کلاس غیر زراعی (توده، بایر و آب) مورد بررسی قرار گرفته است. که بهترین نتیجه مربوط به محصول یونجه با دقت ۹۸.۷٪ بوده است. یکی از دلایل نتایج خوب در این مطالعه داشتن نمونه‌های زیاد و بررسی در مدت زمان طولانی می‌باشد؛ که جمع‌آوری داده برای هر محصول حدوداً از چهار ماه قبل بوده است. محصولات زراعی به دلیل بازه رشد در طول عمرشان ماهیتی پویا دارند؛ بنابراین، استفاده از مجموعه داده‌های سری زمانی یک راه‌حل مؤثر و مناسب برای نقشه‌برداری محصولات است. شبکه ترنسفورمر [۲۹] معماری یادگیری عمیق بر اساس مکانیسم توجه چند سر توسعه یافته است در ابتدا برای پردازش زبان طبیعی مورد استفاده قرار گرفت، سپس ترنسفورمر بینایی (ViT) یک ترنسفورمر است که برای بینایی کامپیوتر طراحی شد و مورد استفاده قرار گرفت. زی انزه و همکاران مدل Segformer [۳۰]، که ترکیبی از معماری ترنسفورمر و شبکه‌های عصبی کانولوشنال ترکیب شده است، ارائه داده‌اند. در مطالعاتی که توسط وی چنگ سونگ و همکاران برای نقشه‌برداری دو هدفه محصولات کشاورزی که هدف ایجاد تعادل بین نقشه برداری دقیق انواع محصولات و کاهش خطاهای طبقه بندی است، با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ بر پایه چندین شبکه یادگیری عمیق نتایج ارزشمندی به دست آورده‌اند [۳۱]، آزمایشات نشان داد که مدل Segformer در مقایسه با سایر روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشینی سنتی رایج، نتایج: نرخ پایین خطا، استخراج ویژگی دقیق در مقیاس کوچک و دقت طبقه‌بندی بهتر را داده است.

جدول ۱: مقایسه جدیدترین روشهای مبتنی بر تکنیکهای یادگیری عمیق در کاربردهای بخش‌بندی و طبقه بندی محصولات کشاورزی

Table 1. A comparison of the recent deep learning based techniques for crop classification and segmentation

منبع - سال	کاربرد	تعداد محصول	باندهای مورد استفاده	تکنیک	نوع داده‌ها
[۲۲] - ۲۰۲۲	بخش‌بندی	۰	B2, B3, B4, B8	Swin U - Net	فضایی - طیفی - زمانی
[۲۷] - ۲۰۲۲	طبقه‌بندی محصولات	۵	B2, B3, B4, B8	CNN-Attention	فضایی - طیفی - زمانی
[۲۶] - ۲۰۲۲	بخش‌بندی و طبقه‌بندی محصولات	۲	B2, B3, B4, B8, B13	Deep learning	فضایی - طیفی - زمانی
[۴۳] - ۲۰۲۲	طبقه‌بندی محصولات برنج	۱	B1 و B13	CNN-Attention	فضایی - طیفی - زمانی
[۳۷] - ۲۰۲۳	بخش‌بندی محصولات برنج	۱	B2 و B8, B11 و B12	ResU-Net	فضایی - طیفی - زمانی
[۴۷] - ۲۰۲۳	بخش‌بندی و طبقه‌بندی محصولات	۳	B2 و B8, B11 و B12	MSSNET	چند مقیاسی
[۳۱] - ۲۰۲۳	بخش‌بندی برنج	۲	B2, B3, B4, B8	Segformer	فضایی - طیفی - زمانی
۲۰۲۴	بخش‌بندی و طبقه‌بندی محصولات	۴	B2, B3, B4	روش پیشنهادی ما	فضایی - طیفی - زمانی

بخش‌بندی معنایی به نام CropNet [۴۱] توسط پریپتال بوت و همکارانش پیشنهاد شده است که از یک چارچوب رمزگذار-رمزگشا با شبکه ResNet به‌عنوان ستون فقرات رمزگذار و ماژول‌های توجه در رمزگشا برای تمرکز بهبود یافته روی ویژگی‌های حیاتی استفاده می‌کند. مناسب برای مزارع کوچک ارائه شده است. همچنین تکنیک دیگری به کار برده شده است که ویژگی‌های عمیق [۴۲] را از تصاویر سری‌های زمانی SAR استخراج می‌کند. ویژگی‌های عمیق، که اغلب به‌عنوان «ویژگی‌های یادگیری عمیق» شناخته می‌شوند، بازنمایی‌های انتزاعی و پیچیده‌ای هستند که یک مدل یادگیری عمیق، به‌ویژه یک شبکه عصبی، به‌طور خودکار از داده‌های خام در طول فرآیند آموزش استخراج می‌کند. این فرایند به این صورت است که تصاویر سری‌های زمانی SAR در سطوح چندگانه ترکیب می‌شوند و با استفاده از ماژول مکانیزم توجه و پیش‌گسترش ویژگی‌ها را از مجموعه داده‌ها استخراج می‌کند [۵۰]. روش‌های دیگری هم از تصاویر پهبادها برای تشخیص نواحی یا محصولات کاشت شده استفاده نمودند [۵۱] که بدلیل متفاوت بودن نوع، مرجع و کیفیت داده‌ها مورد بحث این مقاله نبوده‌اند. در این پژوهش روش طبقه‌بندی چند کلاسه بر اساس ViT و مکانیسم توجه به کار برده شده است. اما دلایلی همچون درک فرایند تصمیم‌گیری مدل و تفسیر نتایج، بخش‌بندی را چالش‌برانگیز می‌کند. دلایل ارائه روش پیشنهادی و نوآوری ما در این پژوهش به شرح زیر است:

- ایجاد مجموعه داده جدید برای محصولاتی که دارای تنوع فصلی و مکانی است.
- یک معماری ترکیبی برای بخش‌بندی و طبقه‌بندی هم‌زمان اراضی و محصولات کشاورزی درون آنها توسعه داده شده است.
- رسیدن به دقت مطلوب و برتری روش پیشنهادی با توجه به مجموعه داده کم نسبت به روش‌های پیشین.
- همچنین مدل پیشنهادی دارای قابلیت تعمیم‌پذیری برای مناطق مختلف است.

مجموعه داده‌ها

داده‌های طبقه‌بندی محصولات معمولاً شامل انواع مختلفی از اطلاعات مانند تصویربرداری ماهواره‌ای، داده‌های اطلاعات میدانی و الگوها و روندهای قبلی کشت می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا معمولاً برای طبقه‌بندی محصولات استفاده می‌شود. نوارهای مختلف تصویر می‌توانند اطلاعاتی در مورد سلامت، تراکم و ویژگی‌های پوشش گیاهی ارائه دهند. دیگر معماری مورد استفاده در بخش‌بندی معنایی که بر پایه U-Net مورد توجه قرار گرفته است Attention U-Net [۴۷] می‌باشد. در پژوهشی توسط وانگ زوجی و همکارانش این معماری بر اساس مکانیسم‌های توجه چند مقیاسی انقباضی در U-Net (DMSAU-Net) برای تشخیص آفات حشرات محصول زراعی استفاده شده است. معماری پیشنهادی در این مقاله، دقت تشخیص آفات در محصولات را بهبود و

رویکردهای تجزیه و تحلیل تصویر مبتنی بر شی‌روشن مؤثری برای پردازش تصاویر چند زمانی سنتینل-۱ و سنتینل-۲ با وضوح فضایی بالا است. تجزیه و تحلیل تصویر مبتنی بر شی شامل پیکسل‌هایی است که اشیا بر اساس شباهت طیفی یا یک متغیر خارجی مانند واحد زمین‌شناسی طبقه‌بندی می‌شوند. نقشه‌برداری دقیق از انواع محصولات در زمین‌های زراعی ناهمگن فضایی برای کاربردهای کشاورزی بسیار اهمیت دارد [۳۳، ۳۴]. با بررسی معماری‌های درخت تصمیم، DeepLabv3+ [۳۸] و Segformer که یک معماری مدل یادگیری عمیق است که مدلی مبتنی بر یک رمزگذار ترنسفورمر و با یک رمزگشای شبکه عصبی پیچشی (CNN) سبک وزن [۴۹] برای انجام طبقه‌بندی پیکسلی ترکیب شده است. CNN سبک وزن به یک مدل شبکه عصبی کانولوشنال اشاره دارد که به گونه‌ای طراحی شده است که از نظر محاسباتی کارآمد، با پارامترهای کمتر و نیازهای محاسباتی کمتر در مقایسه با معماری‌های بزرگتر و پیچیده‌تر CNN باشد. معماری Segformer به مقدار دقت کلی ۹۱.۰۶ درصد دست یافته است [۳۱ و ۳۲]. در پژوهش‌هایی که توسط ای‌جون وولنگ و همکارانش انجام شد، مجموعه داده‌های که از GEE برای بخش‌بندی شبکه‌های عصبی پیچشی مانند معماری U-Net++ [۳۵] به کار برده شده است. که از طریق بلوک‌های پیچشی Dense به هم متصل شده‌اند و مسیرهای اتصال دوباره طراحی شده است؛ که ارتباط بین نقشه‌های ویژگی رمزگذار و رمزگشا را تقویت می‌کند جریان کاری بدین صورت است که تصاویر کوچک با استفاده از تصاویر نوری چندزمانی، سنتینل-۱ و ۲ با نمونه‌گیری جزئی از کلاس‌ها آموزش داده می‌شوند و قابلیت‌های تعمیم یادگیری عمیق را برای طبقه‌بندی با استفاده از برچسب فراهم می‌سازند. معماری U-Net++ در مقایسه با دیگر معماری‌ها مانند R2U-Net [۳۶]، ResU-Net [۳۷] در طبقه‌بندی شی‌گرا (مبتنی بر چند ضلعی) عملکرد قابل توجه داشته است. این معماری توانسته است نقشه ویژگی با وضوح کامل در چند سطح معنایی ایجاد کند که باعث بالا رفتن دقت مدل شده است. Swin U-Net، اولین معماری U شکل مبتنی بر ترنسفورمر خالص با اتصالات رمزگذار، گلوگاه، رمزگشا و Skip Connection، در بخش‌بندی تصاویر پزشکی موفقیت‌آمیز استفاده شده است. برای بهبود بخش‌بندی تصویر و انتخاب طیفی پیشنهاد شده است [۴۰]. جونیوان یائو و شوانگن جین در مطالعات خود برای بخش‌بندی چند کلاسی برای تصاویر سنجش‌از‌دور از مجموعه داده‌ای با وضوح متوسط استفاده کرده‌اند. زیرا تصاویر ماهواره‌ای با وضوح متوسط تعداد زیادی از داده‌های سری زمانی را تشکیل می‌دهند. و پوشش کاملی را برای نظارت بر سطح زمین دارند. اجسام مختلف در تصویر ماهواره‌ای ممکن است دارای مقادیر طیفی مشابه و اجسام مشابه مقادیر طیفی متفاوتی داشته باشند، که باعث تأثیرگذاری در دقت طبقه‌بندی شود. برای حل این مشکل مدل پیشنهادی آن‌ها با استفاده از مدل Swin U-Net در یادگیری شبکه‌های عصبی عمیق بهبود داده شده است. یک معماری

مطالعه مورد بررسی قرار گرفته را نشان می‌دهد، که تمرکز آن بر کشاورزی در مقیاس کوچک و عمده محصولات شامل کلزا، گندم، برنج و ذرت است. در جدول ۲ نوع محصولات کشاورزی به همراه تعداد تصاویر به دست آمده در فصل‌های مختلف از مناطق کشت استان‌های مورد مطالعه آمده است. نقشه برداری و بررسی‌های زمینی از مزارع کشت شده بر اساس مختصات GPS به دست آمده انجام شده است. فیلدهای نقشه برداری شده دارای اندازه‌ها و اشکال مختلفی هستند. مجموعه داده‌ها شامل تصاویر ماهواره‌ای با در نظر گرفتن الگوهای متنوع بارندگی و آب‌وهوا می‌باشد.



شکل - ۱. محدوده‌ی جغرافیایی مورد مطالعه

Fig. 1: Geographical region of interest

جدول ۲. تعداد و موقعیت جغرافیایی محصولات کشاورزی جمع آوری شده

Table 1. Location and number of collected agricultural products data				
مناطق مورد مطالعه	برنج	گندم	کلزا	ذرت
خراسان شمالی	✓	✓		
البرز		✓	✓	
فارس		✓		
اردبیل			✓	
تهران			✓	
کرمانشاه			✓	
خوزستان	✓	✓	✓	
اصفهان	✓	✓	✓	
مازندران	✓	✓	✓	
تعداد تصاویر	۵۵	۵۴	۶۰	۵۵
تعداد مناطق مورد مطالعه	۱۲۵	۲۹۰	۴۱۰	۳۲۵
بازه زمانی	از اردیبهشت تا شهریور	از فروردین تا تیر	از فروردین تا تیر	از مهر تا آذر
تعداد برچسب	۱۰۴۰	۱۱۶۰	۱۶۴۰	۱۳۰۰

در آزمایش‌های انجام شده، داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های برچسب‌گذاری که از داده‌های برداری در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ایجاد شده‌اند، ادغام شده‌اند. پس از حل چالش‌های جمع‌آوری داده‌ها،

با مداخلات به موقع برای محافظت از عملکرد محصول کمک می‌کند [۴۸]. وضوح فضایی تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی دقیق مزارع و انواع مختلف محصولات بسیار مهم است. تصاویر با وضوح بالاتر می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری را ارائه دهند، در حالی که تصاویر با وضوح پایین برای طبقه‌بندی کلی مناسب‌تر می‌باشند. ماهواره‌های سنتینل برای مأموریت‌های رصد زمین هستند که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک توسعه یافته است. این مأموریت‌ها برای ارائه داده‌های با کیفیت بالا برای برنامه‌های مختلف محیطی و امنیتی طراحی شده‌اند. وظیفه ماهواره سنتینل-۲ تصویربرداری نوری برای نظارت بر زمین است که شامل نقشه‌برداری کشاورزی و پوشش زمین می‌شود. ماهواره سنتینل-۲ دارای ۱۳ باند طیفی است. در این مطالعه از باندهای اصلی (باندهای RGB) استفاده شده است که شامل B2 (رنگ آبی)، B3 (رنگ سبز) و B4 (رنگ قرمز) است و دارای وضوح ۱۰ متر می‌باشند.

چالش‌های جمع‌آوری مجموعه داده‌ها

- جمع‌آوری داده‌ها از ماهواره‌هایی مانند سنتینل-۲ می‌تواند چندین چالش را به همراه داشته باشد، از جمله موارد زیر:
 - وضوح فضایی سنتینل-۲ بین ۱۰ تا ۶۰ متر است که ممکن است برای جمع‌آوری اطلاعات دقیق در زمین‌های کشاورزی کوچک یا گیاهان خاص کافی نباشد.
 - دوره تکرار زمانی سنتینل-۲ پنج روز است که ممکن است با مراحل یا فنولوژی کشاورزی همخوانی نداشته باشد.
 - پوشش ابری می‌تواند تصاویر ماهواره‌ای را مبهم کند و بر کیفیت داده‌های جمع‌آوری شده برای نظارت کشاورزی تأثیر منفی بگذارد.
 - پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص محصولات کشاورزی، که شامل تصحیح اثرات جوی، پوشش ابر و سایر عوامل است، برای اطمینان از صحت و قابلیت اطمینان داده‌ها ضروری است اما می‌تواند هزینه‌بر و زمان‌بر باشد.
 - تفسیر تصاویر ماهواره‌ای برای برچسب‌گذاری کشاورزی نیاز به تخصص در زمینه سنجش از دور، فنولوژی محصول و زراعت دارد تا اطلاعات مرتبط مانند سلامت محصول، تخمین عملکرد و تشخیص آفات و بیماری‌ها استخراج شود.
 - یکی از چالش‌های اصلی، مرحله برچسب‌گذاری است. برای انتخاب هر محصول، باید نوع محصولات با شناسایی فنولوژی و استفاده از مختصات به دست آمده و حضور میدانی، به عنوان نمونه‌ای از داده‌ها برچسب‌گذاری شوند.

مناطق جغرافیایی مجموعه داده‌ها

تصاویر ماهواره‌ای مورد مطالعه در این تحقیق از ۹ استان مختلف ایران شامل خراسان شمالی، البرز، فارس، اردبیل، کرمانشاه، تهران، خوزستان، اصفهان و مازندران جمع‌آوری شده است. شکل ۱ محدوده‌ای که در این

یکپارچه‌سازی یا ادغام دو یا چند قسمت تصویر استفاده می‌شود. یکپارچه‌سازی شامل حالت‌های زیر است:

- تصاویر چندزمانی: از سنجنده‌های یکسان یا چندگانه برای تشخیص تغییرات استفاده می‌کند.
- تصاویر چندفضایی: از سنجنده‌های یکسان یا چندگانه برای یک محدوده خاص استفاده می‌شود.
- تصاویر سنجش از دور: هنگامی که با داده‌های جانبی ترکیب شوند، می‌توانند درک جامع‌تری از سطح زمین ارائه دهند.

شکل ۲ نوعی از تصاویر سنجش از دور چندزمانی را نشان می‌دهد که از منطقه‌ای در بهشهر، استان مازندران، در فاصله زمانی ۱۸ خرداد تا ۲۶ مرداد ۱۴۰۲ گرفته شده است.



شکل ۲: نمونه‌های از تصاویر چندزمانی منطقه‌ای از بهشهر استان مازندران توسط سنتینل ۲
Fig. 2: A sample of multi temporal Sentinel-2 images from Behshahr, Mazandaran province

نقاط مختلف جمع‌آوری شده‌اند و هر چند ضلعی در تصویر ممکن است نمایانگر یک محصول متفاوت باشد و اطلاعات کافی در مورد آن وجود نداشته باشد. این مسأله برچسب‌گذاری را مشکل کرده و باعث ایجاد چالش‌هایی در آموزش مدل‌های یادگیری می‌شود.

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های سنتینل-۲ باید قبل از پردازش، برای از بین بردن خطاهای جوی و رادیومتری تصحیح شوند. تصحیح اتمسفری یکی از مهم‌ترین مراحل پیش‌پردازش است؛ زیرا می‌تواند بر نتیجه نهایی تأثیر قابل توجهی بگذارد. هدف اصلی تصحیح جوی، اصلاح اثرات جوی بر تصاویر ماهواره‌ای با تعیین ویژگی‌های نوری است. با این کار، تغییرات در زاویه خورشید، اثرات مه و ابرها به طور مؤثری از بین می‌روند. بنابراین، هنگام پردازش داده‌های سنتینل-۲، توصیه می‌شود از تصاویر بدون ابر استفاده شود. پس از این مرحله، داده‌ها برای استفاده در مدل‌های یادگیری آماده می‌شوند. در تصاویر ماهواره‌ای، پوشش ابری می‌تواند کیفیت تصاویر را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و بر توانایی تشخیص ویژگی‌ها و جزئیات سطح تأثیر بگذارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که پوشش ابری می‌تواند به‌ویژه برای کاربردهایی مانند بخش‌بندی پوشش زمین چالش‌برانگیز باشد.

نیاز به استفاده از تکه‌های همپوشان کاشی‌های ۲۵۶×۲۵۶ برای تجزیه و تحلیل تصاویر ایجاد شد. تقسیم بندی تصاویر اولیه بزرگ در محدوده جغرافیایی مورد نظر با استفاده از ابزار Q-GIS به به ابعاد ۲۵۶×۲۵۶ تبدیل شده است. تصاویر سری زمانی داده‌های بدون ابر، تقریباً در فواصل پانزده روزه از ماهواره سنتینل-۲ برای هر فصل زراعی در بازه زمانی یک اردیبهشت تا ۳۰ آذر ساخته شده‌اند.

داده‌های چند زمانی

داده‌های چندزمانی به مجموعه داده‌هایی اشاره دارد که تغییرات یک منطقه خاص را در طول زمان ثبت می‌کنند. در نقشه‌برداری، در صورتی که سطح پیکسل‌ها دارای اشکال مختلف و متمایز نباشند، از

آماده سازی داده‌ها

یکی از مراحل پیش‌پردازش داده در تصاویر ماهواره‌ای، آماده‌سازی داده‌های ماهواره‌ای با تغییر ماهیت داده‌ها است. داده‌های ماهواره سنتینل-۲ به صورت فایل‌های فشرده با فرمت SAFE ارائه می‌شوند. باندهای طیفی در سنتینل-۲ به صورت فایل‌های JPG در فرمت SAFE ذخیره می‌شوند و دارای سه وضوح هندسی مختلف (۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر) هستند. وضوح ۱۰ متری این فایل‌های JPG را می‌توان در یک فایل GeoTIFF با اندازه پیکسل یکنواخت ۱۰ متر به صورت ساختار داده‌ی رستری ایجاد کرد. با استفاده از این ساختار می‌توان عملیات همپوشانی را به آسانی و به شکل مؤثر انجام داد. برای استفاده بهینه از داده‌ها، پیش‌پردازش‌هایی انجام می‌شود تا حجم داده به حداقل برسد و زمان محاسبات کاهش یابد. پس از انجام مراحل توضیح داده شده در بخش‌های قبلی این مقاله، نقشه مورد نظر از روی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ ایجاد می‌شود.

در این مطالعه از ابزار Q-GIS برای حاشیه نویسی (رنگ بندی هر محصول و پس زمینه) استفاده شده است. مجموعه داده‌های استفاده شده در این مقاله، در شرایط جوی و مکانی مختلف و همچنین در فصل‌های مختلف سال جمع‌آوری شده‌اند که این امر باعث پیچیدگی و زمان‌بر شدن کار می‌شود. یکی دیگر از مشکلات این است که داده‌ها از

شبکه‌های عصبی پیچشی آبشاری چندمرحله‌ای متکی است. این چارچوب‌های آبشاری ویژگی‌های سطح بالا را استخراج کرده و پیش‌بینی‌های متراکمی را در هر مرحله انجام می‌دهند. پیش‌بینی متراکم به معنای پیش‌بینی یک برچسب یا مقدار رگرسیون برای هر پیکسل در یک تصویر ورودی است؛ به جای ارائه یک برچسب واحد برای کل تصویر، به هر پیکسل یک برچسب یا مقدار اختصاص داده می‌شود. این رویکرد می‌تواند منجر به استفاده بیش از حد از منابع محاسباتی شود، زیرا به طور مکرر ویژگی‌های سطح پایین مانند بافت تصویر را استخراج می‌کند.

مدل استاندارد U-Net با هدف بهبود حساسیت مدل به پیکسل‌های پیش‌زمینه، به روشی جدید به نام Attention U-Net ارتقا یافته است. این روش به شبکه اجازه می‌دهد تا ساختارهای بصری عمومی‌تر را بیاموزد و در برابر ورودی‌های نویزدار مقاوم باشد. همان‌طور که در شکل ۵ الف نشان داده شده است، معماری Attention U-Net از عملگر الحاق به جای عملگر جمع بین مسیر رمزگذاری (downsampling) و مسیر رمزگشا (upsampling) استفاده می‌کند. این اتصالات پرش به شبکه امکان می‌دهند تا اطلاعات سراسری را در حین نمونه‌برداری به اطلاعات محلی منتقل کنند. در مسیر نمونه‌برداری، به دلیل تقارن شبکه، تعداد زیادی نقشه ویژگی وجود دارد که امکان انتقال اطلاعات را فراهم می‌کنند.

معماری Attention U-Net دارای دروازه‌های توجه است که به شبکه اجازه می‌دهند بر روی مناطق مهم تمرکز کند و اطلاعات نامربوط را فیلتر کند. به عبارت دیگر، این دروازه‌ها اطلاعات کم‌اهمیت‌تر را سرکوب می‌کنند [۴۵]. مکانیسم توجه با کاهش تفاوت معنایی بین مسیرهای رمزگذاری و رمزگشایی و حفظ جزئیات لبه‌ها، به بهبود دقت بخش‌بندی کمک می‌کند. علاوه بر این، استفاده از دروازه‌های توجه، شبکه را قادر می‌سازد تا به‌طور مؤثر مشکل تداخل نویز را برطرف کرده و منجر به نتایج بخش‌بندی قوی‌تری شود. با گنجاندن مکانیسم‌های توجه در معماری U-Net، مدل می‌تواند به‌صورت پویا اهمیت مکان‌های مختلف فضایی در نقشه‌های ویژگی را در طول مراحل رمزگذاری و رمزگشایی تنظیم کند.

در پردازش تصویر، اطلاعات زمینه به رابطه بین اشیاء، اشکال و بافت‌های درون یک تصویر اشاره دارد. شناخت این روابط به درک صحنه کلی کمک می‌کند. در بحث تشخیص اشیاء، اشیاء اطراف می‌توانند به بهبود دقت شناسایی و طبقه‌بندی اشیاء در یک تصویر کمک کنند.

در مدل پیشنهادی برای بهبود Attention U-Net، از یک ترنسفورمر بنیایی پیکسلی (ViT) در گلوگاه مدل استفاده شده است. ادغام ViT معماری می‌تواند به مدل کمک کند تا وابستگی‌های فضایی دوربرد را کنترل کند [۴۶]. وابستگی‌های فضایی دوربرد به روابط یا همبستگی بین پیکسل‌ها یا مناطق دور دست در یک تصویر یا یک ساختار داده مکانی اشاره دارد. شکل ۵ الف) معماری مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: میزان تاثیر پوشش ابری در بخش‌بندی (مستطیل راست بالا نشان‌دهنده ی ابر است)

Fig. 3: The impact of cloud cover on segmentation (top right rectangle indicates the cloud).

روش پیشنهادی

چارچوب کلی روش پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است که شامل دو بخش آموزش و تست می‌باشد و در پنج مرحله انجام شده است. در مرحله اول، مجموعه داده‌ها جمع‌آوری شدند. در مراحل دوم و سوم، تصاویر ماهواره‌ای بخش‌بندی شده و برچسب‌گذاری محصولات انجام می‌شود. آموزش مدل در مرحله چهارم با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده بر روی معماری بهبودیافته U-NET انجام گردید. در مرحله پنجم، با استفاده از مدل آموزش‌دیده، تصاویر جدید بخش‌بندی و کلاس‌بندی شده‌اند.

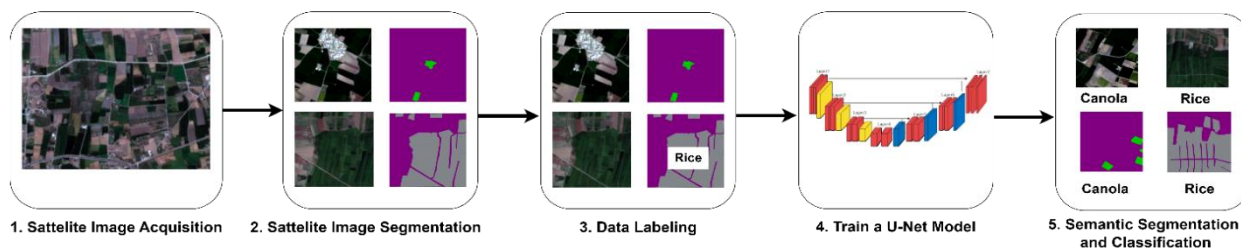
در این تحقیق، تصاویر جمع‌آوری شده یک ماه قبل از برداشت محصول موردنظر تهیه شده‌اند تا وضعیت فیزیولوژیکی پوشش گیاهی هر محصول را به دقت بازتاب دهند. نکته قابل توجه دیگر این است که با تغییرات فیزیولوژیکی رشد محصول و تغییر رنگ‌دانه‌ها، رنگ‌های متفاوتی ایجاد می‌شود. برای حل این موضوع، محدوده‌ی طیف رنگی برای هر محصول شامل دو رنگ در نظر گرفته شده است.

بخش‌بندی معنایی

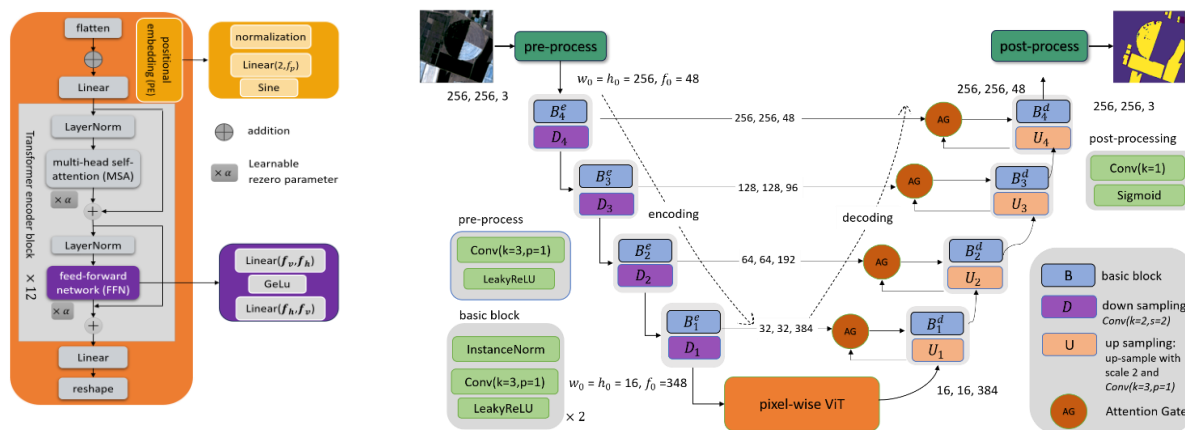
بخش‌بندی معنایی یک روش برای بخش‌بندی پیکسلی تصویر بر اساس ویژگی‌های مشترک پیکسل‌ها، مانند رنگ، است. به عبارت دیگر، هدف تولید یک نقشه بخش‌بندی پیکسلی متراکم از یک تصویر است که در آن هر پیکسل به یک کلاس یا شیء خاص اختصاص داده می‌شود. مدل‌های مختلف U-Net به دلیل عملکرد بالا و استفاده کارآمد از حافظه GPU معمولاً برای کارهای بخش‌بندی تصویر استفاده می‌شوند. هدف این مدل‌ها دستیابی به دقت بالا با استفاده از تعداد کم نمونه‌های آموزشی است.

معماری Attention U-Net-ViT

مدل U-Net یکی از محبوب‌ترین مدل‌ها برای بخش‌بندی تصاویر است. این معماری به طور کلی از دو قسمت رمزگذار و رمزگشا تشکیل شده است. دیتای ورودی ابتدا وارد رمزگذار می‌شود و پس از اعمال عملگرهای مختلف لایه‌های کانولوشن، به مسیر دوم یعنی رمزگشا منتقل می‌شود. مدل U-Net در لایه‌های رمزگذار و رمزگشا به



شکل ۴: مراحل اجرای فرآیند روش پیشنهادی در این تحقیق
Fig. 4: The steps of implementing the proposed method in this paper



شکل ۵: الف) معماری روش پیشنهادی بر روی مدل U-Net.
a) The proposed architecture based on U_Net

ب) بلوک رمزگذار ترنسفورمر
Fig. 5: b) Decoder block transformer

معیارهای ارزیابی

استفاده از معیارهای ارزیابی در یادگیری ماشین برای ارزیابی عملکرد یک مدل یادگیری ماشینی بسیار مهم است. در ادامه به بررسی معیارهای ارزیابی استفاده شده از جمله: FL، MIOU، دقت، فراخوانی، صحت و Dice خواهیم پرداخت.

معیار ارزیابی افت کانونی

افت کانونی (FL) یک نسخه بهبود یافته از اتلاف متقاطع آنتروپی (CE) است که با اختصاص وزن‌های بیشتر به نمونه‌هایی که به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند (مانند پس‌زمینه با بافت پرنویز یا اشیاء جزئی یا موضوعات مورد علاقه ما) و وزن کمتر به نمونه‌های درست طبقه‌بندی شده، عملکرد مدل را بهبود می‌بخشد. فرمول محاسبه افت کانونی به صورت زیر است:

$$\text{Focal Loss} = - \sum_{i=1}^n (1 - p_i)^{\gamma} \log_b p_i \quad (1)$$

معیار ارزیابی صحت

صحت به این معناست که مدل تا چه اندازه خروجی را درست پیش‌بینی می‌کند. برای اندازه‌گیری این معیار از فرمول ۲ بدست می‌آید.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True Positive} + \text{True Negative}}{\text{total Examples}} \quad (2)$$

در شکل ۵ ب) بلوک دیاگرام یک ترنسفورمر بینایی نمایش داده شده است. این مدل بینایی یک نوع معماری شبکه عصبی است که تصاویر را به تکه‌هایی با اندازه ثابت تقسیم می‌کند. برای حفظ موقعیت تکه‌ها از موقعیتیابی توکار (position embedding) استفاده شده است. سپس هر تکه به صورت خطی در موقعیت اصلی خود قرار گرفته و نرمال می‌شود و نهایتاً تکه‌های تصاویر وارد مکانیسم چندسره توجه-خود (multi-head self-attention) می‌شوند. منظور از توجه-خود این است که هر تصویر ورودی به ویژگی‌های خود توجه می‌کند و با تصاویر خروجی یا تصاویر دیگر توجهی ندارد. در فاز خروجی نهایی معماری ViT، پیش‌بینی کلاس با عبور خروجی آخرین بلوک ترنسفورمر از یک سر طبقه‌بندی که معمولاً از یک لایه کاملاً متصل تشکیل شده، به دست می‌آید.

عملکرد یک مدل ترنسفورمر بینایی به عواملی مانند بهینه‌ساز، عمق شبکه و فرآپارامترهای خاص مجموعه داده بستگی دارد. ViT مبتنی بر پیکسل عمدتاً از یک پشته بلوک‌های رمزگذار ترنسفورمر تشکیل شده است و اندازه پشته ثابت است. برای ایجاد یک ورودی به پشته ViT، ابتدا رمزگذاری در امتداد ابعاد فضایی صاف (flat) می‌شود تا دنباله‌ای از تکه‌های ترنسفورمر تشکیل شود.

فرآیند آموزش در مدل‌های یادگیری ماشینی برای تشخیص الگوها و پیش‌بینی یا تصمیم‌گیری براساس داده‌ها صورت می‌گیرد. یکی از چالش‌های اصلی در معماری‌های ترنسفورمر بینایی، کمبود داده برای

معیار ارزیابی دقت

زمانی که ارزش مثبت های کاذب بالا باشد، معیار دقت معیار مناسبی خواهد بود. نتیجه این امر این است که این مدل، نقاط درست بسیاری را به اشتباه تشخیص می دهد.

(۳)

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Positive}}$$

معیار ارزیابی فراخوانی

در نقطه مقابل صحت این معیار، در مواقعی که دقت تشخیص کلاس منفی حائز اهمیت باشد معیار فراخوانی مناسب می باشد.

(۴)

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Negative}}$$

معیار ارزیابی اشتراک بر اجتماع

اشتراک بر اجتماع (IoU) دو نقطه برابر است با نسبت مساحت هم پوشانی به مساحت کل. مقدار این نسبت بین ۰ تا ۱ تغییر می کند، به طوری که اگر مختصات نقطه پیش بینی شده توسط مدل و نقطه حقیقی دقیقاً یکسان باشند، مقدار IoU برابر با ۱ خواهد بود. این معیار را می توان برای هر کلاس به صورت جداگانه محاسبه کرد یا با گرفتن میانگین IoU در تمام کلاس ها، یک IoU متوسط به دست آورد که به آن mIoU گفته می شود.

(۵)

$$\text{IoU} = \frac{\text{Area Of Overlap}}{\text{Area Of Union}}$$

معیار ارزیابی ضریب تشابه تاس

Dice یکی از معیار های اصلی برای ارزیابی نتایج بخش بندی تصاویر است. مقدار Dice نشان می دهد که نتایج مدل بخش بندی، چقدر به ماسک حقیقی بافت، شباهت دارند. برای به دست آوردن مقدار متوسط Dice از Dice میانگین گرفته می شود.

(۶)

$$\text{Dice} = \frac{2 \text{ True Positive}}{2 \text{ True Positive} + \text{False Positive} + \text{False Negative}}$$

نتایج شبیه سازی

جدول ۳: مقایسه معماری ها و نتایج بدست آمده

Table 3: Comparison of different architectures' result

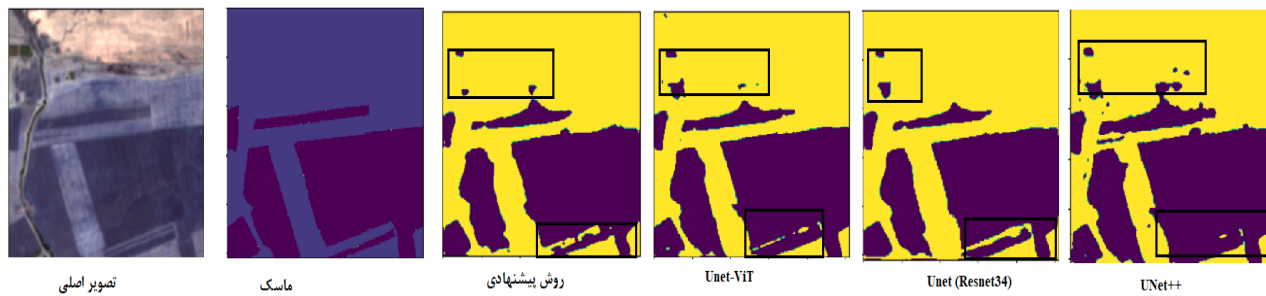
Dicey	m(Iou)	فراخوانی	دقت	صحت	تعداد پارامتر	مدل
۰.۴۵۵	۴۰٪	۵۶.۹۲	۸۰.۷۴	۶۶.۴۰	۳۶۹۴۴۷۷۶	Unet (Resnet34)
۰.۴۳۱	۳۹.۹٪	۵۶.۸۴	۸۲.۰۰	۶۸.۳۵	۳۱۸۶۳۴۹۶	UNet
۰.۴۱۴۱	۴۳.۵۰	۵۹.۷۷	۸۲.۵۶	۶۷.۳۵	۳۱۸۶۳۴۹۶	UNet++
۰.۴۵۶	۳۴.۶٪	۵۷.۷۳	۸۲.۸۳	۶۹.۵۵	۳۴۸۷۹۴۸۳	Attention UNet
۰.۱۶۶	۱۹.۶٪	۳۰.۳۱	۳۲.۵۷	۵۲.۵۰	۱۷۹۱۷۷۴۰	Swin UNet
۰.۲۵۶	۲۵.۳٪	۴۸.۴۲	۴۳.۴۲	۵۶.۴۶	۱۰۱۷۵۶۸۷۶	Unet (backbone ViT)
۰.۴۵۸	۴۳.۹٪	۵۱.۶۳	۸۳.۳۴	۶۹.۹۰	۸۸۴۰۵۵۷۹	Unet-ViT
۰.۴۶۶	۴۶.۸٪	۵۹.۳۸	۸۳.۸۴	۷۰.۶۹	۸۸۷۵۶۸۷۶	روش

پیشنهادی

مجموعه داده آموزشی شامل ۲۴۶ تصویر همراه با برچسب با اندازه ۲۵۶×۲۵۶ از تصاویر سنتینل-۲ استفاده شده است. برای پیاده سازی طبقه بندی کننده یادگیری عمیق، باید مدل را برای دسته های مختلف کلاس ها آموزش داد. جدول ۳ نتایج طبقه بندی را با استفاده از سه باند سنتینل-۲ نشان می دهد مدل U-Net با ستون فقرات Resnet34، که از بیش برآزش جلوگیری کرده و نتایج بهتری نسبت به U-Net ساده به دست آورده است. همچنین، معماری پیشنهادی توانسته است پارامترهای زیاد خود را به خوبی تنظیم کرده و نتایج قابل توجهی به دست آورد، در حالی که مدل های دیگر به دلیل فقدان وزن های اولیه نتایج خوبی نداشته اند. مدل پیشنهادی، با وجود داشتن پارامترهای بیشتر نسبت به معماری Swin-Unet، به نتایج بهتری دست یافته است. در مقالات مشابه، Swin-Unet نتایج خوبی داشته است، اما به دلیل تطبیق بیش از حد داده به نسبت تعداد و توزیع کلاس ها در تصاویر ماهواره ای، دچار عدم یادگیری شده و بیشتر به پس زمینه توجه کرده است [۴۴]. در جدول ۳ مشاهده می شود که معماری Swin-Unet، که در مقالات بخش ۲ به عنوان یکی از بهترین مدل ها معرفی شده بود، به دلیل تطبیق بیش از حد با داده ها و کم بودن تعداد نمونه نسبت به توزیع کلاس ها در تصاویر ماهواره ای، دچار عدم یادگیری شده و بیشتر به پس زمینه توجه کرده است، بنابراین نتوانسته به خوبی آموزش ببیند. مدل پیشنهادی در معیارهایی مانند صحت و Dice بهترین نتایج را به دست آورده است و همچنین از نظر دقت و mIoU نزدیک به معماری U-Net با ستون فقرات Resnet34 که از پیش آموزش دیده است، عمل کرده است. این امر نشان دهنده کارایی بالای معماری پیشنهادی است. نتایج هر مدل از محاسبه ی میانگین ۴ اجرای مختلف آن بدست آمده است. که همواره عدد نهایی میانگین با انحراف معیار ± 0.5 نشان دهنده ی ثبات نتیجه ی تست مدل در این دیتاست بوده است.

در شکل ۶ مشاهده می شود که روش پیشنهادی در مقایسه با سایر معماری ها شباهت بیشتری به ماسک دارد و همچنین نسبت مساحت هم پوشانی به مساحت کل نتایج بهتری ارائه داده است. با این حال، معماری U-Net با ستون فقرات Resnet34 در مقایسه با دیگر معماری ها نقاط ضعفی نیز دارد.

شکل ۷ نشان می دهد که عدم تعادل افت کانونی در مدل های Attention Unet و SwinUnet در طول آموزش و اعتبارسنجی، باعث بیش برآزش می شود. U-Net با استفاده از ستون فقرات Resnet34، در تعداد دورهای کمتر به تعادل رسیده است، در حالی که SwinUnet نتوانسته است به تعادل برسد. به همین دلیل، در آموزش و اعتبارسنجی، مدل پیشنهادی نتایج قابل توجهی از خود نشان می دهد. شکل ۸ نتایج کیفی طبقه بندی تصاویر ماهواره سنتینل-۲ را با برچسب و به همراه خروجی های بدست آمده بر اساس معماری های بررسی شده نشان می دهد. ویژگی های طیفی تولید شده توسط پوشش گیاهی، زاویه تابش و موقعیت ابرها بر دقت طبقه بندی تأثیر گذار است.



شکل ۶: مقایسه نتایج کیفی مدل‌ها
Fig. 6: Qualitive model comparison

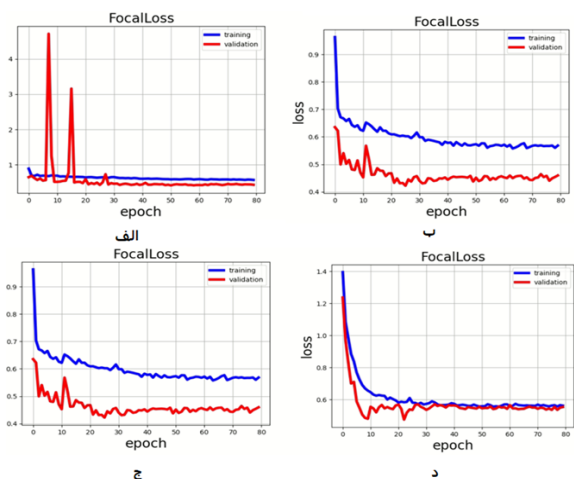
علاوه بر این، به دلیل نداشتن اطلاعات کافی در برچسب‌گذاری، طبقه‌بندی‌های نادرست در میان زمین‌های بدون کشت و مناطق شهری وجود دارد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که تصاویر با وضوح بالا قابلیت استخراج قوی‌تری در جزئیات فضایی مانند: تشخیص مزرعه در قطعات کوچک در بخش‌بندی مزارع را دارند. طبقه‌بندی نادرست در زمین‌هایی که کمبود اطلاعات وجود دارد، باعث کاهش دقت و صحت عملکرد مدل‌ها شده است، این امر در مدل SwinUnet به دلیل کم بودن تعداد داده باعث شده است که بیشتر تصاویر به نادرستی شناسایی شوند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک چارچوب مدل‌سازی برای بخش‌بندی معنایی تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، به منظور نقشه‌برداری کاربری زمین و مدیریت کشاورزی معرفی شده است. این مطالعه به منظور ارزیابی عملکرد مدل و بهبود دقت طبقه‌بندی، از شاخص‌های ویژگی تولید شده توسط سنجش‌ازدور استفاده می‌کند. عملکرد مدل با استفاده از معیارهای ضرر مشترک شامل تابع افت کانونی، بازیابی، Dice، صحت و MIOU ارزیابی شده است. معماری پیشنهادی نسبت به مدل‌های دیگر نشان دهنده بهبود عملکرد در طبقه‌بندی است. همچنین، مدل پیشنهادی به جز در معماری U-Net++ نیز عملکرد بهتری ارائه داده است.

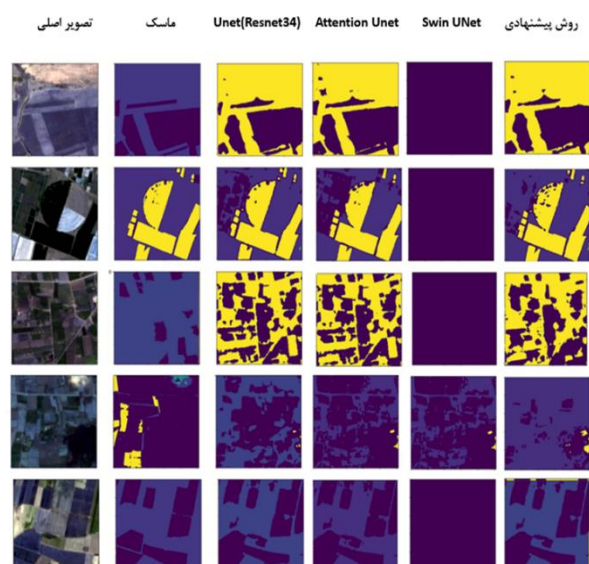
این تحقیق یک مدل سرتاسری برای یادگیری ویژگی‌های مرتبط با بخش بندی تصاویر ماهواره‌ای ارائه داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش ارائه شده می‌تواند برای بخش بندی تصاویر ماهواره‌ای دریافتی از سنسینل-۲ برای محصولات مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد. لذا نتایج حاصل می‌تواند در مدیریت مصرف آب، تنظیم ساختار کاشت، تخمین تلفات و ارزیابی عملکردهای زراعی نقش مهمی را ایفا نماید. با بهره‌گیری از این روش‌ها، می‌توان به بهبود کارایی و دقت در مدیریت کشاورزی دست یافت و از منابع بهینه‌تر استفاده کرد.

در مقایسه با مدل‌های مرسوم فعلی، رویکرد توصیف شده امکان یادگیری خودکار و کارآمد ویژگی‌های طیفی، شاخص‌های پوشش گیاهی و ویژگی‌های بافتی را فراهم می‌کند. این مدل نیز برای طبقه‌بندی محصول و کاربری زمین در فصول مختلف سال مناسب است و قابلیت تعمیم فضایی زیادی را برای تولید نقشه‌های پوشش محصولات



شکل ۷: مقایسه FL برای هر یک از مدل‌های الف) U-Net (backbone Resnet34)، ب) Attention U-Net، ج) Swin U-Net و د) مدل پیشنهادی

Fig. 7: Comparison of FL for each of the models left-up) U-Net(ResNet34 backbone) right-up) Attention U-Net down-left) Swin U-Net down-right) Proposed model



شکل ۸: مقایسه نتایج کیفی مدل پیشنهادی با مدل‌های یادگیری عمیق مختلف در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنسینل-۲

Fig. 8: Comparison of qualitative result comparison between proposed and other deep models in Sentinel-2 satellite image

[2] D. Wisser, S. Frolking, E.M. Douglas, B. M. Fekete, C. J. Vörösmarty, and A. H. Schumann, "Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets," *Geophysical Research Letters*, vol. 35, no. 24, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008GL035296>

[3] M. Flörke, C. Schneider, and R. I. McDonald, "Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth," *Nature Sustainability*, vol. 1, no. 1, pp. 51-58, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>

[4] F. Alimohammadi et al., "Hyperspectral imaging coupled with multivariate analysis and artificial intelligence to the classification of maize kernels," *International Agrophysics*, vol. 36, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.31545/intagr/147227>

[5] H. R. Khan et al., "Early identification of crop type for smallholder farming systems using deep learning on time-series sentinel-2 imagery," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 1779, 2023.

[6] B. Usowicz and J. Lipiec, "Spatial variability of thermal properties in relation to the application of selected soil-improving cropping systems (SICS) on sandy soil," *Int. Agrophys*, vol. 36, pp. 26.2022,9-284. doi: 10.31545/intagr/152122

[7] I. Becker-Reshef et al., "Crop type maps for operational global agricultural monitoring," *Scientific Data*, vol. 10, no. 1, p. 172, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02047-9>

[8] K. Luo, L. Lu, Y. Xie, F. Chen, F. Yin, and Q. Li, "Crop type mapping in the central part of the North China Plain using Sentinel-2 time series and machine learning," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 205, p. 107577, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107577>

[9] J. Bramich, C. J. Bolch, and A. Fischer, "Improved red-edge chlorophyll-a detection for Sentinel 2," *Ecological Indicators*, vol. 120, p. 106876, 2021.

[10] L. Feng, Y. Wang, Z. Zhang, and Q. Du, "Geographically and temporally weighted neural network for winter wheat yield prediction," *Remote Sensing of Environment*, vol. 262, p. 112514, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.106876>

[11] L. Blickensdörfer, M. Schwieder, D. Pflugmacher, C. Nendel, S. Erasmí, and P. Hostert, "Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany," *Remote sensing of environment*, vol. 269, p. 112831, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112831>

[12] Feng Gao, Xiaoyang Zhang. Mapping Crop Phenology in Near Real-Time Using Satellite Remote Sensing: Challenges and Opportunities. *J Remote Sens*. 2021. <https://spj.science.org/doi/full/10.34133/2021/8379391>

[13] K. Zhang, D. Yuan, H. Yang, J. Zhao, and N. Li, "Synergy of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for crop classification based on DC-CNN," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 11, p. 2727, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15112727>

[14] A. Orynbaikyzy, U. Gessner, and C. Conrad, "Spatial transferability of random forest models for crop type classification using Sentinel-1 and Sentinel-2," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 6, p. 1493, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14061493>

[15] M. Huang et al., "Remote sensing image fusion algorithm based on two-stream fusion network and residual channel attention mechanism," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, pp. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8476000>

[16] F. Ahmed, H. A. Al-Mamun, A. H. Bari, E. Hossain, and P. Kwan, "Classification of crops and weeds from digital images: A support vector machine approach," *Crop Protection*, vol. 40, pp. 98-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.04.024>

در مناطق کشاورزی بدون برچسب مرجع زمینی قابل اعتماد در زمان واقعی دارد.

با توجه به دیتاست کوچک استفاده شده در این مقاله، در نگاه اول UNet مستعد overfitting می باشد، اما در ادامه به برخی از راهکارهای جلوگیری از آن اشاره خواهیم نمود:

الف) U-Net از یک مسیر انقباضی برای گرفتن زمینه و یک مسیر متقارن در حال گسترش استفاده می کند که محلی سازی دقیق را امکان پذیر می سازد. این معماری به شبکه اجازه می دهد تا با جمع آوری اطلاعات زمینه در مقیاس های چندگانه، از داده های محدود به طور مؤثرتری یاد بگیرد.

ب) U-Net شامل اتصالات پرش است که نقشه های ویژگی را از مسیر انقباض مستقیماً به مسیر در حال گسترش مربوطه منتقل می کند. این اتصالات جریان اطلاعات گرادیان را در طول آموزش تسهیل می کند و به مدل کمک می کند حتی با داده های محدود به طور مؤثر یاد بگیرد. وبا اضافه کردن Attention در معماری U-Net برای تقویت مناطق اطلاعاتی در نقشه های ویژگی و سرکوب اطلاعات نامربوط استفاده می شود.

ج) راهکار دیگر ما جهت جلوگیری از overfitting در مدل U-Net استفاده از تکنیک های داده افزایی، مانند چرخش، برعکس کردن (Flip) و مقیاس بندی در نمونه های آموزشی اولیه بوده است. لذا مدل نهایی می تواند ویژگی های قوی تری را بیاموزد و بهتر تعمیم دهد. U-Net می تواند از تکنیک های منظم سازی مانند حذف تصادفی یا عادی سازی دسته های بهره مند شود، که برای جلوگیری از تطبیق تعمیم بیش از حد و بهبود تعمیم، به ویژه هنگام کار با داده های محدود کمک کند.

در ادامه ی این تحقیق نویسندگان علاقه مند به افزایش نمونه ها و انواع محصولات کشاورزی، افزایش دقت و همچنین یافتن یک محصول خاص در دوره های زمانی مختلف مثل کاشت دوم برنج، می باشند.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش مقاله برابر می باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمام افرادی که در جمع آوری داده ها ما را در این تحقیق یاری کردند تشکر و تقدیر می نماید.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] D. Torbunov et al., "Uvcgan: Unet vision transformer cycle-consistent gan for unpaired image-to-image translation," in *Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision*, 2023, pp. 702-712. <https://doi.org/10.1109/wacv56688.2023.00077>

- [31] W. Song et al., "Bi-Objective Crop Mapping from Sentinel-2 Images Based on Multiple Deep Learning Networks," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 13, p. 3417, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15133417>
- [32] L. B. da Costa, O. L. F. de Carvalho, A. O. de Albuquerque, R. A. T. Gomes, R. F. Guimarães, and O. A. de Carvalho Júnior, "Deep semantic segmentation for detecting eucalyptus planted forests in the Brazilian territory using sentinel-2 imagery," *Geocarto International*, vol. 37, no. 22, pp. 6538-6550, 2022. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1943009>
- [33] L. Wang, G. Jin, X. Xiong, H. Zhang, and K. Wu, "Object-based automatic mapping of winter wheat based on temporal phenology patterns derived from multitemporal Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 11, no. 8, p. 424, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijgi11080424>
- [34] W. Chen and G. Liu, "A novel method for identifying crops in parcels constrained by environmental factors through the integration of a Gaofen-2 high-resolution remote sensing image and Sentinel-2 time series," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3329987>
- [35] Z. Zhou, M. M. Rahman Siddiquee, N. Tajbakhsh, and J. Liang, "Unet++: A nested u-net architecture for medical image segmentation," in *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, Proceedings 4*, 2018: Springer, pp. 3-11. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00889-5_1
- [36] W. Song et al., "Hierarchical extraction of cropland boundaries using Sentinel-2 time-series data in fragmented agricultural landscapes," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 212, p. 108097, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108097>
- [37] A. O. Onojeghuo, Y. Miao, and G. A. Blackburn, "Deep ResU-Net Convolutional Neural Networks Segmentation for Smallholder Paddy Rice Mapping Using Sentinel 1 SAR and Sentinel 2 Optical Imagery," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 6, p. 1517, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15061517>
- [38] Oktay, Ozan, et al. "Attention u-net: Learning where to look for the pancreas." *arXiv preprint arXiv:1804.03999*(2018). <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1767/fig-2>
- [39] Wang, Xuqi, Shanwen Zhang, and Ting Zhang. "Crop insect pest detection based on dilated multi-scale attention U-Net." *Plant Methods* 20.1 2024. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01163-w>
- [40] Cao, Hu, et al. "Swin-unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation." *European conference on computer vision*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25066-8_9
- [41] P. K. Buttar and M. K. Sachan, "Semantic segmentation of satellite images for crop type identification in smallholder farms," *The Journal of Supercomputing*, vol. 80, no. 2, pp. 1367-1395, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05533-4>
- [42] He, Sheng, et al. "Segmentation ability map: Interpret deep features for medical image segmentation." *Medical image analysis* 84 (2023): 102726. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102726>
- [43] M. Saadat, S. T. Seydi, M. Hasanlou, and S. Homayouni, "A Convolutional Neural Network Method for Rice Mapping Using Time-Series of Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery," *Agriculture*, vol. 12, no. 12, p. 2083, 2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122083>
- [44] A. M. Obeso, J. Benois-Pineau, A. Á. R. Acosta, and M. S. G. Vázquez, "Architectural style classification of Mexican historical buildings using
- [17] R. Saini and S. K. Ghosh, "Crop classification on single date sentinel-2 imagery using random forest and support vector machine," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, pp. 683-688, 2018. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-683-2018>, 2018
- [18] G.-H. Kwak et al., "Combining 2D CNN and bidirectional LSTM to consider spatio-temporal features in crop classification," *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 35, no. 5_1, pp. 681-692, 2019. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2019.35.5.1.5>
- [19] Y. Wang, L. Feng, Z. Zhang, and F. Tian, "An unsupervised domain adaptation deep learning method for spatial and temporal transferable crop type mapping using Sentinel-2 imagery," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 199, pp. 102-117, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.04.002>
- [20] J. Lee and T. Warner, "Segment based image classification," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 16, pp. 3403-3412, 2006. <https://doi.org/10.1080/0143160600606866>
- [21] M. I. H. Shihab, N. Tasnim, H. Zunair, L. K. Rupty, and N. Mohammed, "VISTA: Vision transformer enhanced by U-Net and image colorfulness frame filtration for automatic retail checkout," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, pp. 3183-3191. <https://doi.org/10.1109/cvprw56347.2022.00359>
- [22] J. Yao and S. Jin, "Multi-category segmentation of Sentinel-2 images based on the Swin UNet method," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 14, p. 3382, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14143382>
- [23] B. Niu, Q. Feng, B. Chen, C. Ou, Y. Liu, and J. Yang, "HSI-TransUNet: A transformer based semantic segmentation model for crop mapping from UAV hyperspectral imagery," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 201, p. 107297, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107297>
- [24] M. Gao, T. Lu, and L. Wang, "Crop Mapping Based on Sentinel-2 Images Using Semantic Segmentation Model of Attention Mechanism," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 7008, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23157008>
- [25] A. Joshi, B. Pradhan, S. Gite, and S. Chakraborty, "Remote-sensing data and deep-learning techniques in crop mapping and yield prediction: A systematic review," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 8, p. 2014, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15082014>
- [26] A. H. Khan, Z. Zafar, M. Shahzad, K. Berns, and M. M. Fraz, "Crop Type Classification using Multi-temporal Sentinel-2 Satellite Imagery: A Deep Semantic Segmentation Approach," in *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*, 2023: IEEE, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICRAI57502.2023.10089586>
- [27] S. T. Seydi, M. Amani, and A. Ghorbanian, "A dual attention convolutional neural network for crop classification using time-series Sentinel-2 imagery," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 3, p. 498, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14030498>
- [28] Z. Niu, G. Zhong, and H. Yu, "A review on the attention mechanism of deep learning," *Neurocomputing*, vol. 452, pp. 48-62, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.03.091>
- [29] Vaswani, Ashish, et al. "Attention is all you need." *Advances in neural information processing systems* 30, (2017). <https://doi.org/10.7717/peerjcs.1946/fig-10>
- [30] E. Xie, W. Wang, Z. Yu, A. Anandkumar, J. M. Alvarez, and P. Luo, "SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers," *Advances in neural information processing systems*, vol. 34, pp. 12077-12090, 2021. <https://doi.org/10.1109/cvpr52688.2022.00134>

Heidari Gholanlo M at Department of Electrical and Computer Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran

✉ majid.heidari.gholanlo@gmail.com



رضا جوانمرد علی تپه (دکتری ۲۰۱۶)

استادیار دانشگاه علم و فناوری مازندران ایران است. او از سال ۲۰۱۹ به عنوان محقق همکار با دانشگاه تکنیکو لیسبون در زمینه بیورباتیک همکاری داشته است. در سال ۲۰۱۹ به عنوان پژوهشگر در

آزمایشگاه هوش مصنوعی تصویری دانشگاه آکسفورد بروکس (انگلستان) در زمینه خودروهای خودران فعالیت داشت. او دکترای خود را در زمینه هوش مصنوعی و رباتیک از دانشگاه فدرال میناس گرای (UFMG)، برزیل به اتمام رساند. علاقه‌مندی‌های پژوهشی او شامل رباتیک، یادگیری ماشین و بینایی ماشین می‌باشند.

Javanmard Alitappeh, R. Assistant Professor at Department of Electrical and Computer Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran

✉ Rezajavanmard@mazust.ac.ir



عبادت قنبری پرمهر دارای مدرک دکتری

تخصصی مهندسی نقشه برداری (گرایش فتوگرامتری) از دانشگاه ملیورن استرالیا می‌باشد. پس از اخذ دکتری، ایشان به مدت دو سال به عنوان پژوهشگر پسادکتر در دانشگاه RMIT استرالیا و از سال ۱۳۹۵ تا کنون به

عنوان استادیار در گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مشغول به فعالیت بودند. ایشان تا کنون موفق به چاپ بیش از ۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، پردازش تصاویر، کاربرد یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در کشاورزی و سنجش از دور.

Parmehr, E. G. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

✉ parmehr@nit.ac.ir

deep convolutional neural networks and sparse features," Journal of Electronic Imaging, vol. 26, no. 1, pp. 011016-011016, 2017. <https://doi.org/10.1117/1.jei.26.1.011016>

[45] Mountrakis, Giorgos, Jungho Im, and Caesar Ogole. "Support vector machines in remote sensing: A review." ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing 66.3 (2011): 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>

[46] Torbunov, Dmitrii, et al. "Uvcgan: Unet vision transformer cycle-consistent gan for unpaired image-to-image translation." Proceedings of the IEEE/CVF winter conference on applications of computer vision. 2023. <https://doi.org/10.1109/wacv56688.2023.00077>

[47] T. Lu, M. Gao, and L. Wang, "Crop classification in high-resolution remote sensing images based on multi-scale feature fusion semantic segmentation model," Frontiers in Plant Science, vol. 14, p. 1196634, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1196634>

[48] Chen, Jieneng, et al. "Transunet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation." arXiv preprint arXiv:2102.04306 (2021). <https://doi.org/10.20944/preprints202411.2377.v1>

[49] Nikouei, Seyed Yahya, et al. "Real-time human detection as an edge service enabled by a lightweight cnn." 2018 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE). IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/edge.2018.00025>

[50] Zhang, Anjun, et al. "Region level SAR image classification using deep features and spatial constraints." ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing 163 (2020): 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.03.001>

[51] K. Borooshan, S. Behzadi, "Detection of Rice Seedlings in UAV Image Using DenseNet Network", Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research (JRSGR), 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15010196>

[52] E. Fernandes, P. Wildemberg, J. dos Santos, "Water Tanks and Swimming Pools Detection in Satellite Images: Exploiting Shallow and Deep-Based Strategies", Anais do XVI Workshop de Visão ComputacionalDO, Brasil, 2020. <https://doi.org/10.5753/wvc.2020.13491>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مجید حیدری قولانلو در سال ۱۳۹۶ مدرک

کارشناسی مهندسی برق گرایش کنترل را از دانشگاه پیام نور مشهد اخذ نموده و پس از آن در سال ۱۴۰۳ کارشناسی ارشد هوش مصنوعی را از دانشگاه علم و فناوری مازندران دریافت کرده

است. زمینه تخصصی ایشان بینایی ماشین، تصاویر ماهواره‌ای و پردازش تصویر می‌باشد.

Citation (Vancouver): HeidariGholanlo M, Javanmard Alitappeh R, Ghanbari Parmehr E. [Large Scale Crop Type Mapping Using Multi Temporal Sentinel-2 Imagery and a New Attention U-Net-Vit]. J. RS. GEOINF. RES. 2024; 2(2): 233-246

doi <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11047.1071>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



REVIEW PAPER

Radio Sounding and Tomography of Ionosphere based on GNSS

S. Barzegar^{*1}, M. Khoshima²¹ Department of space science, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran² Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 14 August 2024
 Reviewed: 15 September 2024
 Revised: 06 October 2024
 Accepted: 24 November 2024

KEYWORDS:

Radio Sounding
 Tomography
 GNSS
 Total Electron Content
 Ionosphere
 Ionospheric Plasma Bubble

* Corresponding author

✉ sbarzegar@ut.ac.ir

☎ (+98918) 3638160

Background and Objectives: Radio sounding and tomography techniques play a crucial role in studying the structure and dynamics of the ionosphere. Specifically, tomography is an advanced method for creating three-dimensional models of electron density within the ionospheric layer. By utilizing observational data, such as GPS measurements, tomography generates accurate maps of electron distribution. Ionospheric tomography provides high-precision insights into temporal and spatial variations in electron density. This precision is essential for applications like satellite navigation, radio communications, and meteorological predictions. Researchers focus on the upper layers of Earth's atmosphere, using specialized radars called ionosondes to obtain precise information about electron density and the structure of ionized layers. Tomography, an imaging technique, relies on radio wave propagation through the ionosphere. It produces two- or three-dimensional images of electron distribution within this layer. Widely used in weather forecasting, radio communications, and space studies, tomography significantly advances our understanding of ionospheric phenomena. Technological advancements, including satellite-based measurements, enable even more accurate analyses, ultimately enhancing global communication and aviation safety. In this paper, the existing method for how to obtain the electron density change of the ionosphere layer based on the total electron content (TEC) parameter by using the phase difference analysis created in the communication signal of the global navigation satellite system GNSS when passing through different layers of the ionosphere has been investigated and studied. For this purpose, communication signals from low-orbit and high-orbit satellites were studied, and the method of obtaining TEC from phase difference was explained for each. Then, we studied the existing methods and algorithms for converting TEC (Total Electron Content) data into tomographic images. At the end of this article, as an example, we implemented the radio tomography method to visualize plasma bubbles in the equatorial region and compared the results with images taken from optical instruments. It was shown that radio tomography can be used as an accurate method for visualizing the structure of plasma bubbles. At the end of this article, we compared the method studied here with methods such as all-sky imaging, incoherent scatter radars, etc., and discussed the advantages and disadvantages of these methods relative to each other.

Methods: In current research on ionospheric sounding and tomography, significant progress has been made using the Global Navigation Satellite System (GNSS). Recent studies indicate that GNSS can model the ionospheric structure in three dimensions with high precision. Electron distribution in the ionosphere is analyzed using radio data obtained from satellites at Low Earth Orbit (LO) and High Earth Orbit (HO). Collecting ionospheric information via GNSS is a complex and precise process that relies on advanced technology to measure and analyze various ionospheric parameters. These systems, which include Earth-orbiting satellites, transmit signals to ground-based receiver stations. These signals contain precise temporal and spatial information about the satellites, allowing accurate determination of receiver positions on Earth. The distribution of electron density in the ionospheric layer directly affects the propagation of GNSS radio waves, including their path, shape, and phase. Any disruption in the ionospheric layer significantly impacts satellite communications, precise navigation, and long-range communications. In fact, GNSS utilizes this capability to measure the Total Electron Content (TEC) of the ionosphere, a key indicator for understanding its state. This process occurs through signals transmitted from satellites to ground stations. As these signals pass

through the ionosphere, they are influenced by electron density variations, which can be measured with high accuracy.

Findings: In this comprehensive study, current research on ionospheric radio tomography using Total Electron Content (TEC) measurements from GNSS has been conducted. The concept of TEC and its impact on the phase and shape of signals received from the examined satellites has been explored. The application and methodology of using Low Earth Orbit (LEO) and High Earth Orbit (HEO) satellite data to obtain detailed TEC information are described. The validation and accuracy assessment of satellite data in ionospheric radio tomography, which is crucial for the reliability of the final product and the production process, have been addressed. Finally, a technique for reconstructing tomographic images using TEC measurements via GNSS signals is reviewed. It has been demonstrated that this reconstruction technique works well for imaging plasma bubbles. Horizontal distributions obtained from Vertical TEC (VTEC) depletions are compared with images captured by optical instruments, yielding similar results. Even in regions where GNSS signals are weak, this method can yield good outcomes if the bubble structures are sufficiently large.

Conclusion: In summary, GNSS tomography represents a dynamic and evolving field with significant potential for improving accuracy and efficiency in weather predictions. As we continue our research and development efforts, we anticipate the emergence of new methods and technologies that can address existing challenges and enhance the quality and precision of tomographic models. These advancements hold promise for diverse applications of GNSS tomography, including meteorology, climate change studies, and disaster management.



NUMBER OF REFERENCES

45



NUMBER OF FIGURES

8



NUMBER OF TABLES

3

مقاله مروری

سنجش رادیویی و توموگرافی یون‌سپهر توسط سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS)

سحر برزگر^{۱*}، مسعود خوش‌سیما^۲

^۱ گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: تکنیک‌های سنجش (sounding) رادیویی و توموگرافی، برای مطالعه ساختار و دینامیک یون‌سپهر به کار می‌روند. توموگرافی یکی از روش‌های پیشرفته برای مطالعه و مدل‌سازی سه‌بعدی چگالی الکترونی در لایه یون‌سپهر است. این روش از داده‌های مشاهداتی مانند GNSS برای تولید نقشه‌های دقیق از توزیع الکترون‌ها در این لایه استفاده می‌کند. توموگرافی یون‌سپهر به ما امکان تشخیص تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترونی را با دقت بالا می‌دهد. که این امر برای برنامه‌های کاربردی مانند ناوبری ماهواره‌ای، ارتباطات رادیویی و پیش‌بینی‌های متئورولوژیکی حیاتی است. توسعه اندازه‌گیری و توموگرافی یون‌سپهر، که به مطالعه و تحلیل لایه‌های بالایی جو زمین می‌پردازد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این فرآیند، که از اوایل قرن بیستم آغاز شده، شامل تکنیک‌های مختلفی برای بررسی توزیع الکترون‌ها در یون‌سپهر است. اندازه‌گیری یون‌سپهر، که با استفاده از رادارهای مخصوصی به نام ایونوسوندها انجام می‌شود، به دانشمندان این امکان را می‌دهد تا اطلاعات دقیقی در مورد تراکم الکترونی و ساختار لایه‌های یونیزه شده به دست آورند. توموگرافی یک روش تصویربرداری است، که از انتشار امواج رادیویی در یون‌سپهر برای تولید تصاویر دو یا سه بعدی از توزیع الکترون‌ها در این لایه استفاده می‌کند. این تکنیک، که به طور گسترده‌ای در پیش‌بینی شرایط جوی، مخابرات رادیویی و مطالعات فضایی به کار می‌رود، نقش مهمی در پیشرفت علم جوسپهری داشته‌اند. با پیشرفت تکنولوژی، ابزارهای اندازه‌گیری پیشرفته‌تر و دقیق‌تر شده‌اند، که این امر به درک بهتری از پدیده‌های مختلف یون‌سپهر

تاریخ دریافت: ۲۴ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ داوری: ۲۵ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح: ۱۵ مهر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۰۴ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

صداسنجی رادیویی

سامانه راهبری ماهواره‌ای جهانی

محتوای کلی الکترونی

یون‌سپهر

حباب پلاسما یون‌سپهری

* نویسنده مسئول

sbarzegar@ut.ac.ir

۰۹۱۸-۳۶۳۸۱۶۰

منجر شده است. امروزه، با استفاده از ماهواره‌ها و سایر فناوری‌های پیشرفته، دانشمندان قادر به انجام اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر و تحلیل‌های عمیق‌تری از این لایه هستند، که این امر در نهایت به بهبود ارتباطات جهانی و افزایش ایمنی پروازهای هوایی کمک می‌کند. در این مقاله، روش موجود برای چگونگی بدست آوردن تغییر چگالی الکترونی لایه یونسفر مبتنی بر پارامتر محتوای کلی الکترون (TEC) با استفاده از تحلیل تفاضل فازی ایجاد شده در سیگنال مخابراتی سامانه ماهواره‌ای راهبری جهانی GNSS در هنگام عبور از لایه‌های مختلف یونسفر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به این منظور سیگنال‌ها مخابراتی از ماهواره‌های مدار پایین و مدارهای بالا مطالعه شده‌اند و روش بدست آوردن TEC از تفاضل فازی براهریک توضیح داده شد. سپس به مطالعه روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تبدیل اطلاعات TEC به تصاویر توموگرافیک پرداختیم. در انتهای این مقاله به عنوان یک مثال روش توموگرافی رادیویی را برای مصورسازی حباب‌های پلاسمایی در منطقه استوایی پیاده‌سازی کرده و نتایج آن را با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه کردیم. نشان داده شد که توموگرافی رادیویی می‌تواند به عنوان روشی دقیق برای مصورسازی ساختار حباب‌های پلاسمای به کار گرفته شود. در انتهای این مقاله به مقایسه روش مطالعه شده در اینجا با روش‌هایی نظیر تصویربرداری تمام آسمان، رادارهای پراکندگی غیر همدوس و غیره، پرداخته شد و مزایا و معایب این روش‌ها نسبت به یکدیگر بیان شد.

روش‌ها: در تحقیقات کنونی در زمینه صدادایی و توموگرافی یونسفر با استفاده از GNSS، پیشرفت‌های قابل توجهی صورت گرفته است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که با استفاده از GNSS، می‌توان ساختار یونسفر را به صورت سه‌بعدی و با دقت بالا مدل‌سازی کرد. توزیع الکترونی یونسفر با استفاده از داده‌های رادیویی که از ماهواره‌های در ارتفاع کم (LO) و ارتفاع بالا (HO) به دست می‌آیند، تجزیه و تحلیل می‌شود. جمع‌آوری اطلاعات یونسفر با استفاده از GNSS یک فرآیند پیچیده و دقیق است که از تکنولوژی پیشرفته برای اندازه‌گیری و تحلیل پارامترهای مختلف یونسفر بهره می‌برد. این سیستم‌ها، که شامل ماهواره‌هایی در مدار زمین هستند، سیگنال‌هایی را به ایستگاه‌های گیرنده روی زمین مخابره می‌کنند. این سیگنال‌ها حاوی اطلاعات زمانی و مکانی دقیق ماهواره‌ها هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان موقعیت دقیق گیرنده‌ها را روی زمین تعیین کرد. نحوه توزیع چگالی الکترونی در لایه یونسفر بر روی نحوه انتشار امواج رادیویی GNSS و تغییر مسیر، شکل و فاز این امواج به طور مستقیم تأثیرگذار است. هرگونه اختلال در لایه یونسفر، تأثیر جدی در ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات دقیق ناوبری و ارتباطات دوربرد می‌گذارد. در حقیقت، GNSS از این قابلیت برای اندازه‌گیری محتوای کلی الکترون (TEC) یونسفر استفاده می‌کند، که یک شاخص کلیدی برای درک وضعیت یونسفر است. این فرآیند با استفاده از سیگنال‌هایی که از ماهواره‌ها به ایستگاه‌های زمینی فرستاده می‌شوند، صورت می‌گیرد. این سیگنال‌ها هنگام عبور از یونسفر تحت تأثیر تغییرات الکترونی قرار می‌گیرند و این تغییرات می‌توانند با دقت بالایی اندازه‌گیری شوند.

یافته‌ها: در این پژوهش مطالعه جامعی بر روی تحقیقات کنونی در زمینه توموگرافی رادیویی یونسفر با استفاده از اندازه‌گیری TEC یونسفر توسط GNSS انجام شده است. مفهوم TEC و نحوه تأثیر آن بر روی فاز و شکل سیگنال‌های دریافت شده از ماهواره‌های مدار پایین و مدار بالا مورد بررسی قرار گرفته است. کاربرد و روش استفاده از داده‌های ماهواره‌های LO و HO برای بدست آوردن TEC به تفصیل توضیح داده شده‌اند. به اعتبارسنجی و صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در توموگرافی رادیویی یونسفر که ضامن درستی عملکرد محصول نهایی و فرآیند تولید آن است، پرداخته شده است. در انتها مروری بر یک تکنیک برای بازسازی تصاویر توموگرافی حباب‌های پلاسمایی با اندازه‌گیری TEC از طریق سیگنال‌های GNSS انجام شد. نشان داده شد که این تکنیک بازسازی توموگرافی روی تصویربرداری از حباب‌های پلاسمایی به خوبی عمل می‌کند. توزیع‌های افقی گرفته شده از کاهش پلاسمای VTEC با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه گردید و نشان داده شد که نتایج مشابهی حاصل می‌شود. همچنین نتایج بیان می‌کنند که در صورت بزرگ بودن ساختار حباب حتی در نواحی که سیگنال GNSS در آن‌ها ضعیف است، می‌توان نتیجه درستی از این روش بدست آورد.

نتیجه‌گیری: در مجموع، توموگرافی GNSS یک حوزه پویا و در حال توسعه است که پتانسیل زیادی برای بهبود دقت و کارایی در پیش‌بینی‌های جوی دارد. با تحقیق و توسعه بیشتر، می‌توان انتظار داشت که روش‌ها و فناوری‌های جدیدی در این زمینه معرفی شوند که می‌توانند به حل چالش‌های موجود و بهبود کیفیت و دقت مدل‌های توموگرافی کمک کنند. این پیشرفت‌ها می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر کاربردهای متنوع توموگرافی GNSS، از جمله در زمینه‌های هواشناسی، تغییرات اقلیمی و مدیریت بلایا داشته باشند.

مقدمه

توموگرافی یون‌سپهر روشی برای بازسازی چگالی سه‌بعدی الکترونی این لایه با استفاده از داده‌های سامانه ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) است. تکنیک‌های سنجش رادیویی و توموگرافی، برای مطالعه ساختار و دینامیک یون‌سپهر به کار می‌روند. یون‌سپهر لایه‌ای از جو زمین حاوی یون‌ها و الکترون‌های آزاد است که می‌توانند بر روی انتقال امواج رادیویی تأثیر بگذارند. آشکارسازی سیگنال‌های عبوری از یون‌سپهر با استفاده از GNSS و شبکه‌های گیرنده زمینی انجام می‌شود. این آشکارسازها قادر به اندازه‌گیری یون‌سپهر در جهات مختلف، پردازش داده‌ها با روش‌های توموگرافیکی و بازسازی توزیع فضایی چگالی الکترونی آن هستند. بطور کلی روش‌های توموگرافی رادیویی (RT) بر اساس ماهواره‌های ناوبری در مدار پایین زمین (LEO) و مدار بالای زمین (HEO) و همچنین روش‌های اختفای رادیویی (RO) که از داده‌های تقریباً مماسی استفاده می‌کنند، استوار هستند. این تکنیک‌ها برای ما امکان درک ساختار یون‌سپهر برای به‌کارگیری در سامانه‌های ناوبری، مکان‌یابی و ارتباطی را فراهم می‌آورد. توموگرافی یون‌سپهر، با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته رادیویی و امکانات ماهواره‌ای، امکان بررسی یون‌سپهر را در محدوده وسیعی از موقعیت‌های جغرافیایی سیستم‌های فرستنده-گیرنده فراهم می‌آورد. در سال‌های اخیر توموگرافی یون‌سپهر به حوزه‌ی فعال تحقیقاتی برای دانشمندان سراسر جهان تبدیل شده است [۱-۴].

توموگرافی از داده‌های مشاهداتی مانند سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برای تولید نقشه‌های دقیق از توزیع الکترون‌ها در لایه یون‌سپهر استفاده می‌کند. همچنین این روش امکان مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترونی در یون‌سپهر را فراهم می‌آورد که در آن تغییرات افقی چگالی الکترونی با استفاده از توابع هارمونیک کروی و تغییرات عمودی آن با استفاده از توابع متعامد تجربی مدل‌سازی می‌شوند. این تکنیک به ما اجازه می‌دهند تا ساختار یون‌سپهر را در ابعاد مختلف بررسی کنیم و به درک بهتری از تأثیرات محیطی آن بر روی سیگنال‌های مخابراتی دست یابیم. توموگرافی به ویژه در شرایط تغییرات شدید مانند طوفان‌های مغناطیسی یا امواج جاذبه، اهمیت پیدا می‌کند. این روش به ما در درک چگونگی پاسخ یون‌سپهر به این شرایط و مقابله با چالش‌های ناشی از آن کمک می‌کند. نقشه‌های دقیقی که با این روش از توزیع الکترونی یون‌سپهر تهیه می‌شوند می‌توانند در بهبود دقت سیستم‌های ناوبری و ارتباطی مورد استفاده قرار گیرند. توموگرافی یک ابزار قدرتمند برای مطالعه و پیش‌بینی تأثیرات یون‌سپهر بر روی سیستم‌های مختلف است که می‌تواند به بهبود ایمنی و کارایی آنها کمک کند [۵-۸].

نحوه توزیع چگالی الکترونی در لایه یون‌سپهر بر روی نحوه انتشار امواج رادیویی GNSS و تغییر مسیر، شکل و فاز این امواج به طور مستقیم تأثیرگذار است. هرگونه اختلال در لایه یون‌سپهر، تأثیر جدی در ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات دقیق ناوبری و ارتباطات دوربرد می‌گذارد. بنابراین، شناخت مقادیر میانگین و توزیع نصف النهاری مقادیر

الکترون‌های آزاد در این لایه منجر به شناخت پراشیدگی و اختلال‌های احتمالی ناشی از آن می‌کند. یک روش پذیرفته‌شده در تحقیق ساختار زمانی و فضایی و تغییرپذیری الکترون‌های آزاد یون‌سپهر، برآورد محتوای کلی الکترون (TEC) است. TEC مجموع الکترون‌های موجود در استوانه‌ای با سطح مقطع یک متر مربع است که در مسیر ماهواره تا گیرنده وجود دارد. GNSS امکان اندازه‌گیری دقیق TEC در لایه یون‌سپهر را فراهم می‌آورد. این اطلاعات برای درک بهتر پدیده‌هایی مانند اختلالات یون‌سپهری، شعله‌های خورشیدی، طوفان‌های مغناطیسی و پراکندگی، ضروری هستند. علاوه بر این، دانش دقیق از شرایط لایه یون‌سپهر، به‌ویژه در زمینه درک صحیح توزیع الکترون‌های آزاد، می‌تواند به بهبود تکنیک‌های ژئودزی فضایی در سطوح مختلف مانند اثرات یون‌سپهری درجه بالا، ناوبری دقیق GNSS، جهت‌یابی GNSS با یک آنتن و هواشناسی GNSS به صورت کنونی کمک کند. از طریق مدل‌سازی و نظارت دقیق بر یون‌سپهر با استفاده از داده‌های GNSS، می‌توان به درک عمیق‌تری از پدیده‌ها دست یافت و برای کاربردهای مختلف GNSS، از جمله ناوبری، مکان‌یابی و زمان‌بندی دقیق، یک پایه محکم فراهم آورد. این امر به‌ویژه در شرایط اقلیمی فضایی شدید و اختلالات مرتبط با آن، که می‌تواند بر دقت و قابلیت اطمینان خدمات GNSS تأثیر بگذارد، اهمیت دارد [۹-۱۲]. در نهایت، تحقیقات مداوم توسط محققان اقلیم فضایی برای شناسایی، پیش‌بینی و کاهش تأثیرات بالقوه بر صحت، دقت و قابلیت اطمینان کاربری در حال توسعه GNSS ضروری است. این تحقیقات می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مقابله با خطرات اقلیم فضایی کمک کند و شرایطی نظیر لکه‌های قطبی، چگالی تقویت‌شده طوفان و شفق قطبی را که تأثیر زیادی بر کاربران و عملیات سامانه دارند، دربرگیرد. درک پدیده‌های یون‌سپهری ناشی از رویدادهای اقلیم فضایی پارامتری کلیدی است، چراکه آگاهی از توزیع چگالی الکترون لایه یون‌سپهر به طور مستقیم بر انتشار سیگنال‌های GNSS تأثیر می‌گذارد. این مطالعات می‌تواند به توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق و روش‌های کاهش خطر برای کاربردهای مختلف GNSS کمک کند [۱۳-۱۵].

در این مقاله، روش موجود برای چگونگی بدست آوردن تغییر چگالی الکترونی لایه یون‌سفر مبتنی بر پارامتر TEC با استفاده از تحلیل تفاضل فازی ایجاد شده در سیگنال مخابراتی سامانه ماهواره‌ای راهبری جهانی GNSS در هنگام عبور از لایه‌های مختلف یون‌سفر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. به این منظور سیگنال‌ها مخابراتی از ماهواره‌های مدار پایین و مدارهای بالا مطالعه شده‌اند و روش بدست آوردن TEC از تفاضل فازی براهریک توضیح داده شد. سپس به مطالعه روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تبدیل اطلاعات TEC به تصاویر توموگرافیک پرداختیم و با استفاده از مثالی ساده روش پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها بیان شد. در انتهای این مقاله به عنوان یک مثال روش توموگرافی رادیویی را برای مصورسازی حباب‌های پلاسمایی در منطقه استوایی پیاده‌سازی کرده و نتایج آن را با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه کردیم. نشان

توموگرافی رادیویی به عنوان RT به وسیله ماهواره‌های مدار پایین ($LORT$) و RT به وسیله ماهواره‌های مدار بالا ($HORT$) پرداخته شده است.

توموگرافی رادیویی یون‌سپهر با ماهواره‌های مدار پایین ($LORT$)

توموگرافی رادیویی یون‌سپهر با استفاده از ماهواره‌های مدار پایین ($LORT$) از سیگنال‌های رادیویی ارسال شده از ماهواره‌های مدار پایین برای اندازه‌گیری و نقشه‌برداری تغییرات چگالی الکترون‌ها در یون‌سپهر استفاده می‌کند. این سیگنال‌ها هنگام عبور از لایه‌های مختلف یون‌سپهر تأخیر فاز پیدا می‌کنند که این تأخیر به دلیل تغییرات چگالی الکترون‌ها است. با تحلیل داده‌های تأخیر فاز و استفاده از تکنیک‌های توموگرافی، نقشه‌های سه‌بعدی از چگالی الکترون‌ها ایجاد می‌شود که به دانشمندان کمک می‌کند تغییرات زمانی و مکانی چگالی الکترون‌ها را مدل‌سازی و پیش‌بینی کنند.

سامانه‌های ناوروی امروزی بر پایه ماهواره‌های مدار پایین که در مدارهای تقریباً دایره‌ای شکل و در ارتفاع حدود ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ کیلومتر حرکت می‌کنند، ساخته شده‌اند. این سامانه‌ها از زنجیره‌ای از گیرنده‌های زمینی استفاده می‌کنند که داده‌های RT را در طول پرتوهای مختلف دریافت می‌کنند. در آزمایش‌های RT ، اختلاف فاز بین دو سیگنال همدوس که از ماهواره با فرکانس‌های ۱۵۰ و ۴۰۰ مگاهرتز ارسال می‌شوند، در مجموعه‌ای از ایستگاه‌های گیرنده روی زمین ثبت می‌شود. گیرنده‌ها در زنجیره‌ای موازی با تصویر زمینی مسیر ماهواره قرار گرفته‌اند و فاصله بین گیرنده‌های همسایه معمولاً چند صد کیلومتر است. فازهای کاهش یافته φ که در سایت‌های گیرنده ثبت شده‌اند، داده‌های ورودی برای تصویربرداری RT هستند. انتگرال‌های چگالی الکترون N در طول پرتوهایی که گیرنده‌های زمینی را به فرستنده ماهواره‌ای متصل می‌کنند، متناسب با فاز مطلق (Φ) هستند که شامل فاز اولیه ناشناخته φ_0 می‌شود:

$$\alpha \lambda r_e \int N d\sigma = \Phi = \varphi_0 + \varphi \quad (1)$$

در اینجا λ ، طول موج سیگنال رادیویی ماهواره، $d\sigma$ المان پرتو و r_e شعاع کلاسیک الکترون است. ضریب مقیاس α (از مقیاس واحد) به فرکانس‌های رادیویی استفاده شده بستگی دارد. معادله (۱) می‌تواند به صورت اپراتوری بازنویسی شود [۴] که شامل نویز اندازه‌گیری غیرهمبسته معمولی ξ است:

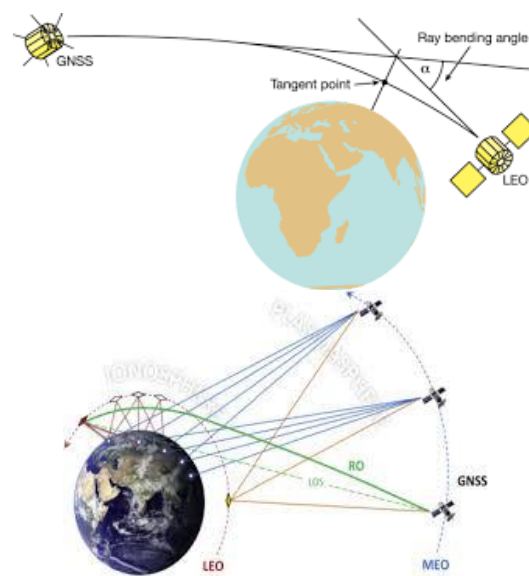
$$PN = \Phi + \xi \quad (2)$$

در اینجا، P اپراتور تصویری است که توزیع دو بعدی ($2D$) را به مجموعه‌ای از تصاویر یک بعدی Φ ($1D$) نگاشت می‌کند. بنابراین، مسئله وارونگی توموگرافی به حل معادلات انتگرالی خطی (۲) برای غلظت الکترون N کاهش می‌یابد. یکی از راه‌های احتمالی برای حل (۲) این است که اپراتور تصویری P را گسسته‌سازی (تقریب) کنیم. این

داده شد که توموگرافی رادیویی می‌تواند به عنوان روشی دقیق برای مصورسازی ساختار حباب‌های پلاسما به کار گرفته شود.

هندسه سنجش رادیویی ماهواره‌ای

شکل ۱ نشان‌دهنده کاوش رادیویی ماهواره‌ای محیط نزدیک زمین است که شامل جو، یون‌سپهر و پروتونوسفر می‌شود. فرستنده‌های موجود در ماهواره‌های LO و HO و گیرنده‌های زمینی مجموعه‌ای از پرتوها را فراهم می‌کنند که فضای نزدیک زمین را قطع می‌کنند و امکان تعیین مسیرهای گروه و فاز (در مورد LO تنها مسیرهای فازی) سیگنال‌های رادیویی در امتداد پرتوهای مربوطه را فراهم می‌سازند. گیرنده‌های موجود در ماهواره‌های LO که امواج رادیویی از ماهواره‌های HO را دریافت می‌کنند نیز برای تعیین مسیرهای گروهی و فازی سیگنال در طول مجموعه‌ای از پرتوها که به صورت شبه‌مماس با سطح زمین می‌باشند، مناسب هستند (شکل ۱ب). به‌طور کلی این اندازه‌گیری‌ها برای سنجش محیط فضای نزدیک در جهات مختلف و محاسبه انتگرال‌ها (یا تفاوت انتگرال‌ها) شاخص ضریب شکست در این محیط مناسب هستند. این مجموعه از انتگرال‌ها می‌تواند توسط روش RT برای پارامترهای محیط معکوس شود. در مورد یون‌سپهر، انتگرال‌های ضریب شکست به انتگرال‌های چگالی الکترون یون‌سپهر کاهش می‌یابند [۲۴].



شکل ۱: هندسه سنجش رادیویی ماهواره‌ای [۲۳].

Fig. 1: The geometry of the satellite radio sounding the near-Earth environment [23].

روش‌های توموگرافی رادیویی با GNSS

روش‌های توموگرافی رادیویی ماهواره‌ای یون‌سپهر در حال حاضر با موفقیت در حال توسعه هستند. از اوایل دهه ۱۹۹۰، روش‌های RT مبتنی بر سیستم‌های ناوروی LO عملیاتی شده‌اند. در سال‌های اخیر، مطالعات RT مبتنی بر اندازه‌گیری‌های استفاده از سامانه‌های ناوروی HO به‌طور گسترده‌ای انجام شده است [۶-۸]. در ادامه، به انواع مختلف

یونسفر و حل مسئله پراکندگی معکوس در سنجش رادیویی را فراهم می‌کند [۶-۸]. در آینده نزدیک، برنامه‌هایی برای راه‌اندازی سامانه‌های ماهواره‌ای گالیله اروپایی و بیدو چینی وجود دارد. سیگنال‌های GPS/GLONASS امروزی به طور مداوم در شبکه‌های دریافت منطقه‌ای و جهانی مانند شبکه‌ای که توسط سرویس بین‌المللی GNSS، IGS، که شامل حدود دو هزار گیرنده است ثبت می‌شوند. این داده‌ها برای بازسازی چگالی الکترون یون‌سپهر و TEC مناسب هستند.

مسائل پراکندگی معکوس در سنجش رادیویی بر اساس داده‌های GPS/GLONASS که به مسائل توموگرافی با داده‌های ناقص مربوط می‌شوند، ذاتاً دارای ابعاد بالا هستند. به دلیل سرعت زاویه‌ای نسبتاً پایین ماهواره‌های مداری بالا (LO)، در نظر گرفتن تغییرات زمانی یون‌سپهر ضروری می‌شود. این موضوع مسئله RT را چهار بعدی می‌کند (سه مختصه فضایی و یک مختصه زمان) که این موضوع ناقص بودن داده‌ها را تشدید می‌کند: لزوماً پرتوهایی که ماهواره‌ها و گیرنده‌ها را به هم متصل می‌کنند، از همه نقاط فضا عبور نمی‌کنند، بنابراین شکاف‌های داده در مناطقی که فقط تعداد کمی گیرنده موجود است، ایجاد می‌شود. بنابراین حل این مسئله نیاز به رویکردهای ویژه‌ای دارد [۱۳].

روش‌های سنجش یون‌سپهر معمولاً فازهای سیگنال‌های رادیویی را که از ماهواره به گیرنده زمینی در دو فرکانس به‌طور هم‌زمان و چندگانه منتشر می‌شوند، تحلیل می‌کنند. به عنوان مثال، در سنجش‌های مبتنی بر GPS، این فرکانس‌ها $f_1 = 1575.42 \text{ MHz}$ و $f_2 = 1227.60 \text{ MHz}$ هستند. L_1 و L_2 مسیرهای فاز سیگنال‌های رادیویی هستند که در واحدهای طول موج سیگنال سنجش اندازه‌گیری می‌شوند. پارامتر دیگری که می‌تواند در تحلیل استفاده شود، شبه‌فاصله‌ها (مسیرهای گروهی سیگنال‌ها) است که زمان لازم برای انتشار قطارهای موج در فرکانس‌های f_1 و f_2 از منبع به گیرنده است. تأخیرهای فاز L_1 و L_2 متناسب با TEC هستند که خود TEC برابر است با انتگرال چگالی الکترون در طول پرتو بین ماهواره و گیرنده.

$$TEC = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + const \quad (۶)$$

که در آن $K = 40.308 \text{ m}^3 \text{s}^{-2}$ و $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ سرعت نور در خلاء است. توجه داشته باشید که با استفاده از داده‌های تأخیر فاز، تنها می‌توان مقدار TEC را تا یک ثابت مشخص که به عنوان جمله افزایشی در فرمول (۶) نشان داده شده است، محاسبه کرد. رابطه (۶) مشابه فرمول (۱) است البته با ثابتی ناشناخته در سمت راست معادله.

مقادیر TEC همچنین می‌توانند از شبه‌بردهای P_1 و P_2 استخراج شوند [۱۷]:

$$TEC = \frac{P_2 - P_1}{K \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)} \quad (۷)$$

با این حال، در مقایسه با داده‌های فاز، داده‌های شبه‌برد به شدت تحریف شده و با نویز آلوده هستند. سطح نویز در P_1 و P_2 معمولاً ۲۰-

منجر به سیستم معادلات خطی (SLE) مربوطه با اپراتور گسسته L می‌شود:

$$LN = \Phi + \xi + E, E = LN - PN \quad (۳)$$

در اینجا، E خطای تقریب است که به خود راه حل N بستگی دارد. توجه داشته باشید که معادلات (۲) و (۳) معادل هستند اگر خطای تقریب E شناخته شده باشد. با این حال، در مورد بازسازی داده‌های یک آزمایش واقعی RT، E ناشناخته است و در واقع، یک SLE کاملاً متفاوت حل می‌شود:

$$LN = \Phi + \xi \quad (۴)$$

سیستم (۴) معادل SLE (۳) نیست. به عبارت دیگر، تفاوت بین راه‌حل‌های (۳) و (۴) ناشی از تفاوت در هر دو جزء شبه‌نویز و خطای تقریب همبسته (در زمان و پرتوها) E است. برای حل SLE (۴)، فاز مطلق Φ همراه با φ_0 باید شناخته شوند. خطاهای φ_0 که توسط گیرنده‌های مختلف تخمین زده می‌شوند، می‌توانند منجر به داده‌های متناقض و ناسازگار شوند که منجر به بازسازی‌های RT با کیفیت پایین می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل، روش توموگرافی رادیویی اختلاف فاز RT بر اساس تفاوت انتگرال‌های خطی در طول پرتوهای همسایه توسعه داده شد [۱۶] که نیازی به تعیین فاز اولیه φ_0 ندارد. SLE اختلاف فاز RT توسط اختلاف زیر تعیین می‌شود:

$$AN = LN - L'N = F - F' = D + \xi \quad (۵)$$

در اینجا، $LN = \Phi$ ؛ SLE اولیه است و $L'N = \Phi'$ سیستم معادلات خطی در طول مجموعه‌ای از پرتوهای همسایه می‌باشد.

الگوریتم‌های متعددی، هم مستقیم و هم تکراری، وجود دارند که SLE‌های (۴) و (۵) را حل می‌کنند. در حال حاضر، در مسائل توموگرافی رادیویی پرتوهای یون‌سپهر، الگوریتم‌های تکراری محبوب‌تر هستند، اگرچه الگوریتم‌های غیر تکراری نیز استفاده می‌شوند. این الگوریتم‌ها از تجزیه مقدار منفرد با اصلاحات آن، منظم‌سازی انحراف ریشه میانگین مربعات (RMS)، تجزیه متعامد، حداکثر آنتروپی، برنامه‌ریزی درجه دوم، رویکرد بیزی و غیره استفاده می‌کنند [۴-۳].

مدل‌سازی عددی گسترده و تصویربرداری LORT از داده‌های تجربی متعدد، ترکیب‌های کارآمد روش‌های مختلف و الگوریتم‌هایی که بهترین بازسازی‌ها را ارائه می‌دهند، را نشان دادند.

روش LORT با تفاوت فاز نتایج بسیار بهتری و حساسیت بالاتری نسبت به روش‌های فازی تنها ارائه می‌دهد. این موضوع توسط بازسازی داده‌های تجربی نیز تأیید شده است [۴، ۷]. وضوح افقی و عمودی LORT در فرمول‌بندی خطی آن به ترتیب ۲۰-۳۰ کیلومتر و ۳۰-۴۰ کیلومتر است. اگر انکسار پرتوها در نظر گرفته شود، وضوح مکانی LORT می‌تواند به ۱۰-۲۰ کیلومتر بهبود یابد [۷].

توموگرافی رادیویی یون‌سپهر با ماهواره‌های مدار بالا (HORT)

استقرار سامانه‌های ناوبری جهانی (GPS و GLONASS) در ایالات متحده و روسیه امکان اندازه‌گیری مداوم سیگنال‌های رادیویی عبور کرده از

بسیار کمتری نسبت به LORT دارد. به طور معمول، وضوح عمودی و افقی HORT در بهترین حالت ۱۰۰ کیلومتر است و گام زمانی (فاصله بین دو بازسازی متوالی) معمولاً ۲۰ تا ۶۰ دقیقه است. در مناطقی که توسط شبکه‌های دریافت متراکم پوشش داده شده‌اند (اروپا، ایالات متحده و آلاسکا)، وضوح می‌تواند به ۳۰-۵۰ کیلومتر با فاصله ۱۰ تا ۳۰ دقیقه بین بازسازی‌های متوالی بهبود یابد. وضوح ۱۰-۳۰ کیلومتر با گام زمانی ۲ دقیقه فقط در مناطقی با شبکه‌های دریافت بسیار متراکم (کالیفرنیا و ژاپن) قابل دستیابی است.

چگونگی تبدیل داده‌های TEC به نقشه‌های توموگرافی

در این قسمت از مقاله تکنیک‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه‌های توموگرافی از داده‌های TEC منتج شده از سیگنال‌های GNSS مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. دریافت کننده‌های GNSS سیگنال‌ها را از چندین ماهواره دریافت می‌کنند. همانطور که تا کنون توضیح داده شد این سیگنال‌ها شامل اطلاعات TEC در امتداد خط عبور سیگنال از ماهواره تا دریافت کننده هستند که می‌توان با استفاده از روش‌هایی بیان شده برای ماهواره‌های LORT و HORT که مبتنی بر تفاضل فاز بین دو فرکانس است TEC را بدست آورد [۴۵-۴۲].

تبدیل محتوای کل الکترون (TEC) به محتوای کل الکترون عمودی (VTEC) با استفاده از توابع نگاشت که هندسه مسیر سیگنال را در نظر می‌گیرند، ممکن می‌شود. رابطه اساسی بین TEC و VTEC با رابطه زیر تعریف می‌شود

$$VTEC = \frac{TEC}{M(z)} \quad (9)$$

که در آن $M(z)$ تابع نگاشت است که به زاویه زنیت (z) مسیر سیگنال بستگی دارد.

چندین تابع نگاشت معمولاً برای تبدیل TEC به VTEC استفاده می‌شوند. مدل تک لایه (SLM) فرض می‌کند که یون‌سپهر یک پوسته نازک در ارتفاع ثابت، معمولاً حدود ۳۵۰-۴۵۰ کیلومتر، است و از تابع نگاشت $(M(z) = 1/\cos(E))$ استفاده می‌کند، که در آن (E) زاویه نسبت به افق ماهواره است. مدل تک لایه اصلاح شده (MLSM) مدلی مشابه است اما شامل تنظیماتی برای ارتفاعات متغیر یون‌سپهر و وابستگی‌های دقیق‌تر زاویه ماهواره نسبت به افق است. برای ماهواره‌های LEO، تابع نگاشت هندسی Foelsche and Kirchengast، اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، زیرا ارتفاعات متغیر یون‌سپهر را در نظر می‌گیرد و برای مشاهدات فضایی مناسب‌تر است. علاوه بر این، تابع نگاشت پارامتر آزیموت (APMF) پارامترهای آزیموت را برای کاهش خطاهای پیش‌بینی، به ویژه در زوایای کم ماهواره نسبت به افق، در نظر می‌گیرد.

یک جنبه مهم از این توابع نگاشت، در نظر گرفتن ارتفاع مؤثر یون‌سپهر است که اغلب به عنوان ارتفاع پوسته یون‌سپهر شناخته می‌شود. این ارتفاع می‌تواند به صورت مکانی و زمانی متغیر باشد و روش‌های مختلفی مانند روش مرکز جرم و روش انتگرال برای تخمین

۳۰٪ و حتی بیشتر است، در حالی که در داده‌های فاز کمتر از ۱٪ است و به ندرت به چند درصد می‌رسد. بنابراین، برای HORT، داده‌های فاز ترجیح داده می‌شوند.

به‌طور کلی مسئله HORT را با استفاده از مجموعه‌ای از انتگرال‌های خطی حل می‌شود [۶]. در این روش، فرض می‌شود که داده‌های TEC به اندازه کافی دقیق از داده‌های تأخیر فاز و گروه تعیین شده‌اند (۷) و (۶). با این حال، TEC مطلق (۷) در مقابل تفاوت‌های TEC که با دقت بالایی محاسبه می‌شوند، با عدم قطعیت زیادی تعیین می‌شود. بنابراین، روش تفاوت فاز در این مورد نیز اعمال می‌شود [۱۲، ۱۰]. به عبارت دیگر، به جای TEC مطلق، مشتقات زمانی $d(TEC)/dt$ به عنوان داده‌های ورودی برای مسئله RT استفاده شدند.

مسئله توموگرافی رادیویی مبتنی بر GNSS چهار بعدی را می‌توان با روشی که در LORT دو بعدی توسعه یافته است، حل کرد. در این روش، توزیع چگالی الکترون به صورت یک سری گسترش از توابع پایه محلی خاص نمایش داده می‌شود. در این مورد، مجموعه‌ای از انتگرال‌های خطی یا تفاوت‌های آن‌ها به SLE تبدیل می‌شود. با این حال، برخلاف LORT دو بعدی، در اینجا لازم است یک روش اضافی برای درونیابی راه‌حل‌ها در مناطق فاقد داده معرفی شود. اجرای این روش در مناطقی که توسط شبکه‌های دریافت متراکم پوشش داده شده‌اند (مانند آمریکای شمالی و اروپا) با شبکه محاسباتی نسبتاً درشت و اسپیلاین‌های مناسب با همواری‌های مختلف [۱۳، ۱۸] بسیار کارآمد بوده است.

رویکرد دیگر به دنبال راه حل‌های به اندازه کافی هموار برای مسئله است تا الگوریتم‌ها درونیابی خوبی را در منطقه با داده‌های گمشده ارائه دهند. عنوان مثال، یک سوبولف (Sobolev) را هنجار کنید و به دنبال راه حلی باشید که این هنجار را در مجموعه بی‌نهایت راه حل‌های مسئله توموگرافی اولیه (نامشخص) به حداقل برساند:

$$AN = D, \min ||f - f_0||_{W_n^2} \quad (8)$$

در اینجا تابع f تابع راه‌حل با وزن داده شده است.

پیاده‌سازی عملی این روش با مشکلاتی در ارتباط با حل مسئله بهینه‌سازی محدود مواجه است. روش مستقیم با استفاده از روش ضرایب نامعین لاگرانژ، SLE با ماتریس‌های با ابعاد بالا (به دلیل تعداد زیاد پرتوها) را ارائه می‌دهد که هیچ ساختار خاصی ندارند تا حل مسئله را ساده کند. بنابراین، ما این مسئله بهینه‌سازی را با یک روش تکراری [۱۳] که نسخه‌ای از تکنیک SIRT است، با هموارسازی اضافی (با فیلتر کردن) افزوده‌های تکراری بر روی متغیرهای فضایی حل می‌کنیم. این روش اجازه می‌دهد تا از اطلاعات پیشین استفاده شود که می‌تواند هم از طریق تقریب اولیه برای تکرارها و هم از طریق ضرایب وزنی که شدت نسبی تغییرات چگالی الکترون در ارتفاعات مختلف را تعیین می‌کنند، معرفی شود.

مدل‌سازی با کمک رایانه نشان می‌دهد که ساختارهای شبه‌ثابت یون‌سپهر می‌توانند با دقت معقول بازسازی شوند، اگرچه HORT وضوح

مورد نظر یک مکعب با طول ضلع ۱۰۰۰ کیلومتر است که به $10 \times 10 \times 10$ وکسل تقسیم شده است و طول هر وکسل ۱۰۰ کیلومتر است. در ابتدا، یک چگالی الکترون یکنواخت به هر وکسل اختصاص می‌دهیم. به عنوان مثال، چگالی الکترون $(1,1,1)$ الکترون در هر سانتی‌متر مکعب. هر مسیر سیگنال GNSS چندین وکسل را قطع می‌کند. به عنوان مثال، یک سیگنال از یک ماهواره به یک گیرنده ممکن است از وکسل‌های $(1,1,1)$ ، $(2,2,2)$ و $(3,3,3)$ عبور کند. مقدار TEC اندازه‌گیری شده بر اساس طول مسیر در هر وکسل توزیع می‌شود. یک دستگاه معادلات خطی جفت شده ایجاد می‌شود که مقادیر TEC اندازه‌گیری شده را به چگالی‌های الکترون ناشناخته در وکسل‌ها مرتبط می‌کند. به عنوان مثال، اگر مقدار TEC برای یک مسیر خاص ۳۰۰ واحد TEC باشد و مسیر به طور مساوی سه وکسل را قطع کند، می‌توانیم معادله‌ای مانند این داشته باشیم:

$$300 = 100N(1,1,1) + 100N(2,2,2) + 100N(3,3,3)$$

که $N(i,j,k)$ چگالی الکترون در وکسل i,j,k است. با استفاده از یک الگوریتم وارون‌سازی، مانند تکنیک بازسازی جبری (ART)، ما به صورت تکراری چگالی‌های الکترون در وکسل‌ها را بدست می‌آوریم تا تفاوت بین مقادیر TEC اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به حداقل برسد. برای اطمینان از یک راه‌حل پایدار، تکنیک‌های تنظیم و محدودیت‌های اضافی اعمال می‌شود. به عنوان مثال، ممکن است یک شرط پیوستگی چگالی اعمال کنیم که تفاوت‌های بزرگ در چگالی الکترون بین وکسل‌های مجاور را از بین ببرد. در نهایت، چگالی‌های الکترون در وکسل‌ها را مصورسازی می‌کنیم تا یک نقشه سه‌بعدی از یون‌سپهر ایجاد کنیم.

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی توموگرافی رادیویی

یون‌سپهر

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی دو مفهوم کلیدی در توموگرافی رادیویی یون‌سپهر هستند که به ترتیب به بررسی درستی عملکرد محصول نهایی و فرآیند تولید آن می‌پردازند. اعتبارسنجی به معنای اطمینان از این است که توموگرافی انجام شده، نیازهای مورد نظر را برآورده می‌کند و در شرایط واقعی قابل استفاده است. از سوی دیگر، صحت‌سنجی به بررسی این موضوع می‌پردازد که آیا فرآیندهای انجام شده در توموگرافی به درستی و بر اساس استانداردهای تعیین شده صورت گرفته‌اند یا خیر. در توموگرافی رادیویی یون‌سپهر، که برای مدل‌سازی سه‌بعدی این لایه از جو زمین استفاده می‌شود، این دو مفهوم اهمیت ویژه‌ای دارند. مدل‌سازی دقیق یون‌سپهر، به دلیل تغییرات پیچیده زمانی و مکانی که در این لایه از جو رخ می‌دهد، چالش‌برانگیز است. توموگرافی رادیویی با استفاده از داده‌های GPS به ما امکان می‌دهد تا ساختار چگالی الکترونی یون‌سپهر را با دقت بالا بازسازی کنیم و از این طریق، تأثیرات این لایه بر روی سیگنال‌های

آن استفاده می‌شود. با اعمال این توابع نگاشت، دانشمندان می‌توانند به دقت TEC را به VTEC تبدیل کنند و بینش‌های ارزشمندی در مورد توزیع چگالی الکترون یون‌سپهر ارائه دهند.

بعد از تبدیل TEC به VTEC، مرحله ایجاد شبکه وکسل (Voxel) در فرآیند تصویربرداری توموگرافی و ایجاد نقشه‌های یون‌سپهر از داده‌های GNSS است که مراحل آن در ادامه ارائه شده است:

۱. تعریف منطقه مورد نظر: اولین مرحله تعریف منطقه‌ای از یون‌سپهر است که قصد نقشه‌برداری از آن را داریم. این منطقه معمولاً یک فضای سه‌بعدی است که از سطح زمین تا لایه یون‌سپهر بالایی امتداد دارد.

۲. تقسیم به وکسل‌ها: منطقه تعریف شده به یک شبکه از پیکسل‌های حجمی کوچک سه‌بعدی به نام وکسل‌ها (مخفف "پیکسل‌های حجمی") تقسیم می‌شود. هر وکسل نمایانگر یک بخش کوچک از یون‌سپهر است. اندازه وکسل‌ها می‌تواند بسته به وضوح مورد نظر و منابع محاسباتی موجود متفاوت باشد.

۳. اختصاص مقادیر اولیه: مقادیر اولیه برای چگالی الکترون یا سایر پارامترهای مرتبط به هر وکسل اختصاص داده می‌شود. این مقادیر اولیه می‌تواند بر اساس دانش قبلی، مدل‌های تجربی یا به سادگی در صورتیکه مقادیر اولیه مشخصی وجود نداشته باشد، به یک مقدار یکنواخت تنظیم شود.

۴. ادغام داده‌ها: داده‌های GNSS، مانند اندازه‌گیری‌های TEC، در شبکه وکسل ادغام می‌شوند. هر مسیر سیگنال GNSS چندین وکسل را قطع می‌کند و مقدار TEC بر اساس طول مسیر در هر وکسل توزیع می‌شود. ۵. وارون‌سازی توموگرافی: یک الگوریتم وارون‌سازی برای حل چگالی الکترون در هر وکسل اعمال می‌شود. این مرحله شامل تنظیم و حل یک همزمان سیستم معادلات خطی جفت شده است که مقادیر TEC اندازه‌گیری شده را به چگالی‌های الکترون ناشناخته در وکسل‌ها مرتبط می‌کند. تکنیک‌های وارون‌سازی معمول شامل تکنیک‌های بازسازی جبری (ART) و روش‌های کمترین مربعات است.

۶. بالابردن دقت: شروطی مانند همواری یا پیوستگی توزیع چگالی الکترون در وکسل‌ها، می‌تواند برای بهبود دقت راه‌حل اعمال شود. داده‌های منابع دیگر، مانند یونوسوندها یا رادارهای پراکندگی غیرهمدوس، نیز می‌توانند برای بالا بردن دقت نتایج مدل ادغام شوند. ۷. مصورسازی: هنگامی که چگالی‌های الکترون برای همه وکسل‌ها تعیین شد، داده‌ها می‌توانند برای ایجاد یک نقشه سه‌بعدی از یون‌سپهر مصورسازی شوند.

در ادامه یک مثال ساده از تولید نقشه‌های توموگرافی یون‌سپهر با استفاده از داده‌های GNSS را مرور کنیم. فرض کنید یک شبکه از گیرنده‌های GNSS در یک منطقه در دسترس داریم. هر مسیر سیگنال از طریق یون‌سپهر اطلاعاتی درباره TEC فراهم می‌کند. منطقه مورد نظر در یون‌سپهر را تعریف کرده و آن را به یک شبکه سه‌بعدی تشکیل شده از وکسل‌ها تقسیم می‌کنیم. برای سادگی، فرض شده که منطقه

نامنظمی‌ها باید به لحاظ فضایی و اندازه ساختار مشابهی را نشان دهند.

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی: مدل‌های پیش‌بینی یون‌سپهر می‌توانند به عنوان مرجع برای اعتبارسنجی نتایج توموگرافی استفاده شوند. این مدل‌ها معمولاً بر اساس داده‌های تاریخی و فیزیکی یون‌سپهر ساخته می‌شوند و می‌توانند به عنوان یک معیار برای ارزیابی دقت نتایج توموگرافی به کار روند. با مقایسه نتایج توموگرافی با پیش‌بینی‌های مدل، می‌توان دقت و صحت نتایج را ارزیابی کرد. برای مثال می‌توان داده‌های GNSS را به زیرمجموعه‌های آموزش و اعتبارسنجی تقسیم کرد. در این روش یون‌سپهر با استفاده از داده‌های آموزش بازسازی می‌شود و سپس با داده‌های اعتبارسنجی مقایسه می‌گردد [۴۰].

روش‌های آماری برای پیدا کردن مقدار خطا: استفاده از روش‌های آماری مانند تحلیل خطا و محاسبه معیارهای آماری مختلف (مانند میانگین مربعات خطا) می‌تواند به ارزیابی دقت و صحت نتایج توموگرافی کمک کند. این روش‌ها می‌توانند نشان دهند که نتایج توموگرافی چقدر با داده‌های واقعی همخوانی دارند و میزان خطاهای موجود در نتایج چقدر است. این تحلیل‌ها می‌توانند به شناسایی نقاط ضعف و قوت روش‌های توموگرافی کمک کنند [۴۱].

توموگرافی حباب‌های پلاسمایی یون‌سپهری با استفاده از GNSS

حباب‌های پلازما ساختارهای در مقیاس بزرگ با کاهش چگالی در یون‌سپهر زمین هستند. حباب‌های پلازما توسط مکانیسم‌های ناپایداری پلازما در ناحیه پایین لایه F ایجاد می‌شوند و در راستای میدان مغناطیسی تا ۱۵۰۰ کیلومتر در منطقه استوایی رشد می‌کنند [۲۵]. مشاهدات یونوسندی، چگالی نامنظم پلاسمایی حباب‌ها را به عنوان عامل اصلی [۲۶] نوسان شدید در فاز و دامنه سیگنال‌های عبور کننده از یون‌سپهر معرفی کردند [۲۸، ۲۷]. ساختار حباب می‌تواند باعث تداخل، محو شدن ارتباطات در فرکانس رادیویی و اختلال در بسیاری از برنامه‌ها شود. بنابراین، توصیف گسترش حباب پلازما و تحولات زمانی موضوع تحقیقات بسیاری از دانشمندان برای دهه‌ها بوده است [۳۳، ۲۹].

در این قسمت از این مقاله به مطالعه یکی از روش‌های نوآورانه پیشنهادی برای توموگرافی حباب پلازما و چگونگی انجام آن می‌پردازیم [۳۵]. یکی از روش‌های مرسوم حال حاضر جهان در مصورسازی ساختارهای حباب پلازما یون‌سپهری، تکنیک‌های اپتیکی هستند. اما اخیراً استفاده از داده‌های TEC برای شناسایی مشخصات این حباب‌ها نیز به عنوان راه‌حلی هوشمندانه در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری‌های TEC ارائه شده توسط GNSS نتایج موفقیت‌آمیزی را برای ثبت مشخصات حباب‌های پلازما در استوا ارائه کرده‌اند. در حقیقت، بازتولید صحیح چگونگی کاهش پلازما و سطح چگالی الکترون هنوز یک چالش مرتبط برای تصویربرداری توموگرافی یون‌سپهر است. در این مقاله، اولین نتایج تکنیکی جدید برای بازسازی

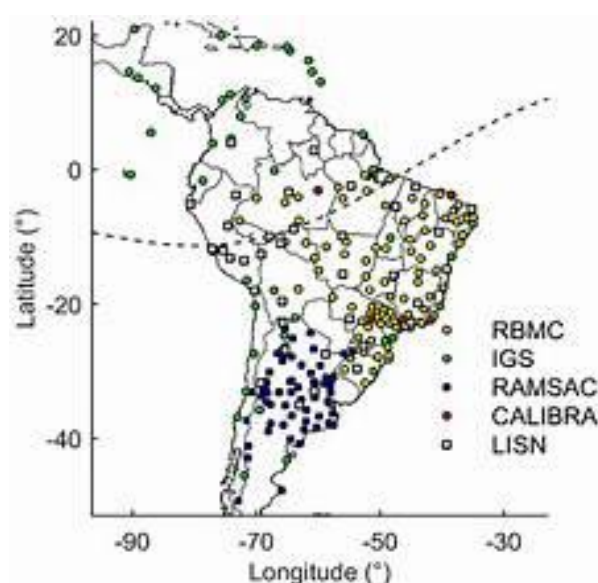
الکترومغناطیسی را مطالعه نماییم. این روش، که به تکنیک بازسازی جبری نیز شناخته می‌شود، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. نتایج حاصل از این روش نشان‌دهنده موفقیت آن در مقایسه با روش‌های مستقیم اندازه‌گیری ساختار یون‌سپهر است و می‌تواند در مطالعه واکنش این لایه به طوفان‌های مغناطیسی و امواج جاذبه نیز مورد استفاده قرار گیرد. اعتبارسنجی و صحت‌سنجی در توموگرافی رادیویی یون‌سپهر به ما کمک می‌کند تا از صحت و دقت مدل‌های ساخته شده اطمینان حاصل کنیم و بتوانیم از این مدل‌ها در کاربردهای عملی مانند ناوبری و پیش‌بینی شرایط جوی استفاده نماییم [۲۰، ۱۹].

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی توموگرافی رادیویی یون‌سپهر شامل چندین مرحله و روش مختلف است که به منظور اطمینان از دقت و صحت نتایج به کار می‌روند. یکی از روش‌های اصلی اعتبارسنجی، مقایسه نتایج توموگرافی با داده‌های مستقل از منابع دیگر مانند داده‌های ماهواره‌ای، رادارهای زمینی، و ایستگاه‌های یونوسوند است که می‌توانند نشان دهند که آیا نتایج توموگرافی با داده‌های واقعی همخوانی دارند یا خیر. همچنین، مدل‌های پیش‌بینی یون‌سپهر می‌توانند به عنوان مرجع برای اعتبارسنجی نتایج توموگرافی استفاده شوند و به عنوان یک معیار برای ارزیابی دقت نتایج به کار روند. استفاده از روش‌های آماری مانند تحلیل خطا و محاسبه معیارهای آماری مختلف نیز می‌تواند به ارزیابی دقت و صحت نتایج توموگرافی کمک کند و نشان دهد که نتایج چقدر با داده‌های واقعی همخوانی دارند و میزان خطاهای موجود چقدر است. علاوه بر این، استفاده از روش‌های تکراری و هموارسازی می‌تواند به بهبود دقت نتایج توموگرافی کمک کند و شامل تکرار محاسبات با استفاده از داده‌های جدید و به‌روزرسانی نتایج با استفاده از فیلترهای مختلف برای کاهش نویز و خطاهای موجود در داده‌ها است. این روش‌ها و تکنیک‌ها می‌توانند به اطمینان از دقت و صحت نتایج توموگرافی رادیویی یون‌سپهر کمک کنند و به بهبود کیفیت داده‌های به دست آمده منجر شوند [۲۲، ۲۱]. در ادامه برای هر یک از روش‌های بیان شده، توضیحاتی به اختصار گفته می‌شود.

مقایسه با داده‌های مستقل: این روش شامل مقایسه نتایج توموگرافی با داده‌های مستقل از منابع دیگر مانند داده‌های ماهواره‌ای، رادارهای زمینی، و ایستگاه‌های یونوسوند است. این مقایسه‌ها می‌توانند نشان دهند که آیا نتایج توموگرافی با داده‌های واقعی همخوانی دارند یا خیر. اگر نتایج توموگرافی با داده‌های ماهواره‌ای همخوانی داشته باشند، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج به دست آمده دقیق و معتبر هستند [۳۵]. برای مثال یونوسوند می‌تواند پروفایل عمودی چگالی الکترونی را در مکان‌های مشخص تعیین کنند. برای انجام مقایسه رایج است که یک نمودار پراکنده از مقادیر چگالی الکترون برگرفته از توموگرافی برحسب اندازه‌گیری‌های یونوسوند رسم می‌شود. این داده‌ها باید با یکدیگر مرتبط باشند. برای مثال حباب‌های پلازما و سایر

کرد. بنابراین، امکان درون‌یابی $B_0, B_1, \frac{\partial H}{\partial h}, H_0, N_m, h_m$ برای یک شبکه منظم خاص در UT ایجاد شد و چگالی الکترون در هر ارتفاعی برای محاسبه چگالی پس زمینه برای توموگرافی در شبکه وکسل‌های منطقه برزیل بدست آمد.

پس از محاسبه چگالی پس‌زمینه یون‌سپهر، توموگرافی منطقه‌ای با استفاده از گیرنده‌های فرکانس دوگانه زمینی از ایستگاه‌های GNSS به طور مداوم در سراسر آمریکای جنوبی کار می‌کنند، انجام می‌شود. در این مقاله از داده‌های GNSS ایستگاه‌های RBMC، CALIBRA، IGS، LAMSAK و LISN برای بدست آوردن تصاویر توموگرافیک استفاده شده است. شکل ۱ مکان ایستگاه‌های GNSS را در روز ۳ از سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد.



شکل ۲: ایستگاه‌های سیستم ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS) در سراسر آمریکای جنوبی در روز سال ۳ (DOY) از ۲۰۱۴. علائم رنگی مکان ایستگاه‌ها را برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد، جایی که خط چین استوای مغناطیسی را نشان می‌دهد [۳۵].

Fig. 2: Global navigation satellite system (GNSS) stations operating throughout South America in Day of Year (DOY) 3 of 2014. The colored marks indicate the location of the stations for the different networks, where the dashed line shows the magnetic equator [35].

در این مقاله توموگرافی یون‌سپهر با استفاده از وضوح زمانی ۶ دقیقه و تفکیک افقی ۱ درجه در طول جغرافیایی و ۱ درجه در عرض جغرافیایی به منظور پوشش طول‌های جغرافیایی از ۹۱.۵ W تا ۱۸ W و عرض‌های جغرافیایی از ۵۱.۵ جنوبی تا ۲۲ شمالی انجام شده است. وضوح عمودی شبکه سه‌بعدی با اندازه‌های گام متمایز، از ۵۰ کیلومتر تا ۵۰۰ کیلومتر، به منظور کاهش تعداد سلول‌ها و بهبود فرآیند زمانی ساخته شده است. هر سلول از شبکه سه‌بعدی با چگالی الکترونی اولیه داده شده توسط پروفایل چگالی پس‌زمینه پر شده است. سپس، یک روش کمی متفاوت از الگوریتم MART معمولی به منظور به‌روزرسانی مکرر چگالی الکترون اولیه هر سلول با استفاده از اندازه‌گیری‌های TEC استفاده گردیده است. سیستم توموگرافی عمومی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۳۶]:

توموگرافی حباب پلاسما، بر اساس داده‌های GNSS و اختفای رادیویی بیان شده است. این تکنیک برای نقشه‌برداری از توزیع حباب‌های پلاسما یون‌سپهر در یکی از چالش‌برانگیزترین شرایط منطقه استوایی یعنی برزیل انجام شده است.

روش توموگرافی یونسفری

فرمول ریاضی روش بازسازی توموگرافی در دو مرحله توسعه می‌یابد. روش اول از مدل اقلیمی ارائه شده توسط ProI و همکاران برای ساختن شکل پروفایل‌های پس‌زمینه یون‌سپهر بر اساس مشاهدات اختفای رادیویی جهانی (RO) استفاده می‌کند [۳۴]. در روش دوم اصلاح جزئی تکنیک بازسازی جبری ضریبی (MART) برای به روز رسانی تکراری میدان چگالی الکترون پس‌زمینه با استفاده از مشاهدات منطقه‌ای TEC انجام می‌شود.

پروفایل چگالی پس‌زمینه یون‌سپهر بر اساس یک مدل اقلیمی، با استفاده از پروفایل‌های چگالی منتج شده از RO، که از سامانه رصد صور فلکی برای هواشناسی، یون‌سپهر و اقلیم (COSMIC)/ماموریت ماهواره‌ای Formosa 3 (COSMIC/FORMOSAT-3) استخراج شده، توسعه داده شده است. در این مقاله شش پارامتر برای توصیف الگوهای اقلیمی پروفایل‌های چگالی یون‌سپهر برآورد شده است: چگالی الکترون در اوج (N_m)، ارتفاع قله (h_m)، ارتفاع مقیاس سمت بالا نسبت به ارتفاع قله (H_0)، مقیاس گرادیان ارتفاع در سمت بالا ($\partial H / \partial h$) ضخامت قسمت پایین (B_0) و مقیاس فاکتور قسمت پایین (B_1). پارامترهای اوج h_m و N_m به طور مستقیم از پروفایل‌های یون‌سپهر پردازش شده توسط شرکت دانشگاه برای تحقیقات جوی (UCAR) بازیابی شده‌اند. از سوی دیگر، برازش حداقل مربعات برای تخمین سمت بالا و پایین انجام شده است. معادله زیر برای قسمت بالا:

$$n_e^t = N_m e^{-0.5(1-z_t-e^{-z_t})} \quad (10)$$

که $z_t = (h - h_m) / (\frac{\partial H}{\partial h} (h - h_m) + H_0)$ و معادله بعد برای قسمت پایین:

$$n_e^b = \frac{N_m e^{-(z_b)B_1}}{\cosh(z_b)} \quad (11)$$

که $z_b = (h_m - h) / B_0$ بدست می‌آید. N_e نشان دهنده چگالی الکترون مشاهده شده در ارتفاع h برای سمت بالا (n_e^t) و سمت پایین (n_e^b) است.

در این مقاله جهت بدست آوردن مقادیر اولیه چگالی الکترونی در مربوط به هر وکسل برای انجام توموگرافی، یک پنجره سی روزه با استفاده از اندازه‌گیری‌های RO تعریف گردید. درون‌یابی دوخطی فضایی برای پارامترهای $(h_m, N_m, H_0, \frac{\partial H}{\partial h}, B_0, B_1)$ بر اساس زمان محلی (LT) و عرض جغرافیایی مغناطیسی انجام شد. نقشه‌های جهانی حاصل به چارچوب مرجع ثابت زمین آورده شدند و نقشه‌های LT همراه با خطوط ژئومغناطیسی نیز پیش‌بینی شدند. در نتیجه این کار، می‌توان شبکه‌های دو بعدی با وضوح فضایی ۲ درجه در عرض جغرافیایی و ۴ درجه در طول جغرافیایی و وضوح زمانی ۶ دقیقه در زمان جهانی تولید

استفاده از هر دو اندازه‌گیری TEC در امتداد سیگنال و VTEC، امکان بازسازی نقشه توموگرافی با تعداد بیشتری از وکسل‌ها را ایجاد می‌کند، که این موضوع یک مزیت مهم برای نقشه‌برداری از ساختارهای حباب پلاسما است.

در ادامه به تأیید روش توموگرافی به عنوان یک ابزار برای نقشه‌برداری توزیع چگالی افقی حباب‌های پلاسما می‌پردازیم. این امکان به‌وسیله مقایسه نقشه‌های توموگرافی VTEC بازسازی‌شده با تصاویر گرفته‌شده از دستگاه‌های اپتیکی انجام می‌شود. در ابتدا امکان تهیه نقشه‌های توزیع افقی حباب‌های پلاسمایی به وسیله چندین مثال مقایسه‌ای بین نقشه حباب‌های پلاسمای بازسازی‌شده با VTEC و تصاویر ایرگلو (Airglow) نشان می‌دهیم. سپس در قسمت بعد اعتبار روش پیشنهاد شده را به وسیله تحلیل‌های سیستماتیک در طی چندین روز مشخص خواهیم کرد. برای هر دو آزمایش، سه دستگاه اپتیکی با پوشش کل آسمان با لنز ۱۸۰ درجه بازوی گرد استفاده شده است تا خط قرمز اکسیژن اتمی در ۶۳۰ نانومتر در آشکارسازی کند. دو تا از این دستگاه‌ها در منطقه استوایی، در São João do Cariri (۷.۴ درجه جنوبی، ۳۶.۵ درجه غربی، عرض جغرافیایی ۱۱.۱۱ درجه جنوبی) و Boa Vista (۲.۸ درجه شمالی، ۶۰.۷ درجه غربی، عرض جغرافیایی ۱۵.۱۴ درجه شمالی) قرار دارند و دیگری در قله جنوبی ناهمگنی یونیزاسیون استوایی (EIA) در Cachoeira Paulista (۲۲.۷ درجه جنوبی، ۴۵.۰ درجه غربی، عرض جغرافیایی ۱۹.۷ درجه جنوبی) قرار دارد. تصاویر ۶۳۰OI نانومتر به صورت رایگان توسط INPE ارائه شده‌اند و دامنه عرضی و طولی به اندازه 1280×1280 کیلومتر را با وضوح پیکسلی ۲.۵ کیلومتر برای ارتفاع ۲۵۰ کیلومتر را پوشش می‌دهند. تصاویر ایرگلو با وضوح زمانی ۶ دقیقه ضبط شده‌اند، که همانند نقشه‌های VTEC است.

امکان/ایجاد نقشه‌های حباب پلاسما با روش توموگرافی
در ادامه تصاویر رنگی نشان دهنده نقشه‌های توموگرافی VTEC و نقشه‌های سیاه و سفید تصویر گرفته‌شده از ایرگلو ۶۳۰OI نانومتر است. شکل ۳ نمونه‌ای از نقشه VTEC بازایی‌شده از الگوریتم توموگرافی (پنل چپ) و تصاویر مرتبط ۶۳۰OI نانومتر (پنل راست) در روز از سال ۲۰۱۴ از ۳ ساعت ۱.۹ UT (زمان جهانی) نشان می‌دهد. دو کاهش در VTEC در امتداد خطوط میدان مغناطیسی در اطراف ساعت‌های ۲۱ و ۲۴ به وقت محلی مشاهده می‌شود که با اثرات حباب پلاسما در تصاویر ایرگلو هم‌زمان هستند. در چنین لحظاتی، پلاسما که به ارتفاع‌های بالاتر انتقال یافته است (نتیجه غروب آفتاب و دریافت $E \times B$)، نرخ رشد ناپایداری‌های پلاسمای انتشاری را افزایش داده است. بنابراین، ناهمگنی‌های حباب پلاسمای بزرگ مقیاس که به ارتفاع‌های بالاتر گسترش می‌یابند، کاهش‌های مشاهده‌شده در سطح VTEC را ایجاد می‌کنند. همانطور که انتظار می‌رود، ما کاهش‌های VTEC را هم‌زمان با کاهش شدت تصاویر OI

$$y = Ax + \varepsilon \quad (12)$$

که در آن y از اندازه‌گیری‌های TEC تشکیل شده است، x توسط بردار ناشناخته چگالی الکترون تشکیل شده است، A ماتریس طراحی است که توسط عناصر طول مسیر سیگنال‌های GNSS در داخل مرزهای وکسل تشکیل شده است، و ε مخفف نویزهای اندازه‌گیری و خطای گسسته سازی است.

این مسئله به طور کلی به دلیل ابعاد یون‌سپهر شامل پارامترهای زیادی می‌شود. علاوه بر این، تعداد محدود زوایای دید GNSS باعث می‌شود که وارون‌سازی توموگرافی یک مسئله با شرایط مرزی و اولیه مناسب نباشد. بنابراین، با جمع‌بندی ابعاد بزرگ ماتریس‌ها و نویز اندازه‌گیری که بر این سیستم تأثیر می‌گذارد، معمولاً از یک روش حل تکراری برای انجام بدست آوردن جواب‌های صحیح استفاده می‌شود. در این راستا، الگوریتم MART با استفاده از معادلات زیر به کار گرفته می‌شود [۳۷]:

$$x_j^{k+1} = x_j^k \left(\frac{y_i}{A_{ij} x_j^k} \right)^{w_{A_{ij}^{max}}} \quad (13)$$

$$x_j^{k+2} = x_j^{k+1} \left(\frac{y_i^v}{A_{ij}^v x_j^{k+1}} \right)^{w_{A_{ij}^{vmax}}} \quad (14)$$

در این معادله x_j^{k+1} عضو j از بردار چگالی الکترون x در تکرار $k+1$ است A_{ij} ، طول مسیر سیگنال i در داخل مرزهایی که سلول‌ها را قطع می‌کند نشان می‌دهد، A_{max} بزرگترین طول مسیر سیگنال مربوطه i است، حاصل ضرب داخلی A_i و x_k TEC پس‌زمینه را تولید می‌کند، w یک پارامتر وزنی است که همگرایی الگوریتم را کنترل می‌کند، و y_i و y_{vi} به ترتیب TEC و VTEC مبتنی بر GNSS مشاهده شده هستند، که در آن k با گام ۲ به دلیل به‌روزرسانی VTEC تغییر می‌کند. فرآیند تکرار از طریق تمام مسیرهای پرتو ۷۰ بار با پارامتر وزنی $w = 0.2$ انجام می‌شود، هر دو پارامتر به صورت تجربی به دست آمده‌اند. تفاوت جزئی با MART متعارف در این روش با گنجاندن مشاهدات TEC عمودی علاوه بر TEC در راستای عبور سیگنال تعریف شده است. در این جهت، به‌روزرسانی‌ها با استفاده از A_{ij}^v و A_{max}^v به عنوان فاصله عمودی طول مسیرهای A_{ij} و A_{max} به ترتیب انجام می‌شود.

مقادیر از TEC معادله (۱۲) با استفاده از فرآیند کالیبراسیون دقیق توسعه یافته توسط Prol و همکاران [۳۴] به دست می‌آید، و VTEC از معادله (۱۳) با استفاده از رابطه $VTEC = \frac{TEC}{M(z)}$ که در قسمت قبل در مورد آن صحبت شد، استخراج می‌شود. در حالی که به‌روزرسانی‌های TEC مربوط به مجموعه‌ای از سلول‌ها در جهت مایل سیگنال GNSS است، برآوردهای VTEC مربوط به ستون عمودی وکسل‌ها در بالا و پایین نقطه نفوذ یون‌سپهر مربوط به ارتفاع پوستر ۴۵۰ کیلومتری است. این استراتژی توصیف ویژگی‌های افقی یون‌سپهر را در مناطقی که فاقد TEC مایل هستند، بهبود می‌بخشد، بدون اینکه به طور قابل توجهی بر برآورد TEC در مناطقی با تعداد زیادی مشاهدات مایل تأثیر بگذارد. بنابراین،

کاهش‌های VTEC نه تنها با موقعیت و ابعاد مشابه به مشاهدات ایرگلو مشاهده می‌شوند، بلکه همچنین جهت حباب پلاسما را دنبال می‌کنند. به عنوان مثال، شکل ۵ نشان می‌دهد که زاویه کاهش VTEC در CHPI در روز ۳ از ۲۰۱۴ نقشه‌برداری شده است، با زاویه شدت‌های تاریک ایرگلو تغییر می‌کند، که همچنین برای سایر ابزارها و روزها نیز اتفاق افتاده است. در تمام موارد با تشخیص حباب‌های پلاسما، یک ناهمگنی طولی نیز می‌تواند بین کاهش VTEC و نشانه‌های تاریک هواگلو مشاهده شود. ناهمگنی مشابهی در [۳۸] مشاهده شده است که ممکن است نشان‌دهنده این باشد که حباب به سمت غرب با افزایش ارتفاع کج شده است [۳۹].

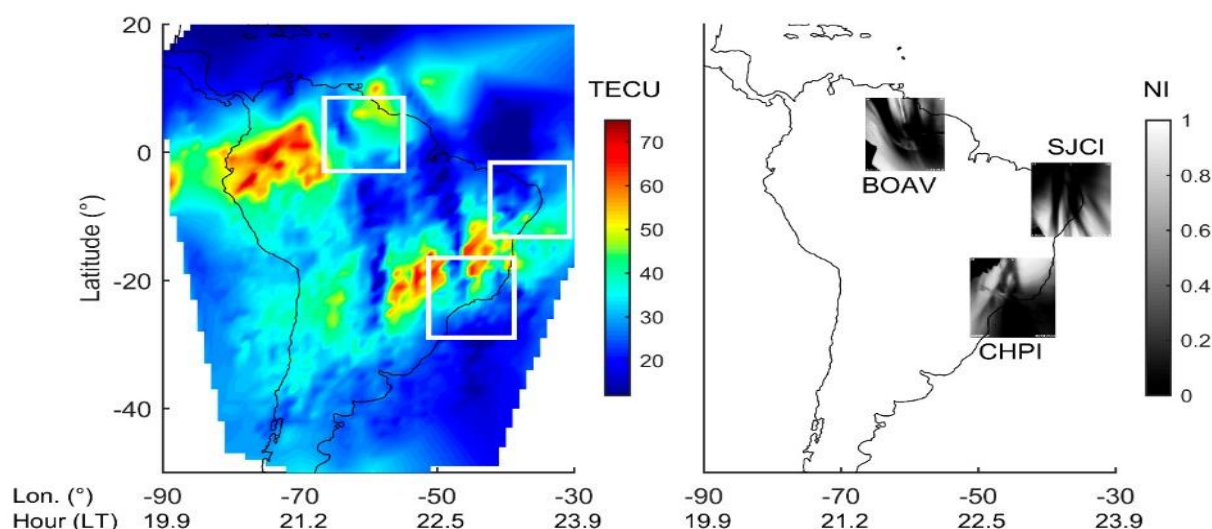
ارزشیابی سیستماتیک

در این مقاله برای ارائه یک نمای کلی از کارایی بازسازی توموگرافی برای نقشه‌برداری از حباب‌های پلاسما، مقایسه‌های تجربی شکل‌های ۳-۵ در یک تحلیل سیستماتیک بر روی چندین رویداد دیگر انجام شده است. بیست و سه روز در طول خورشید تابستانی دوره حداکثر خورشیدی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ انتخاب شدند، زمانهایی که با استفاده از ابزارهای نوری شواهد واضحی از وجود حباب‌های پلاسما در منطقه برزیل اثبات شده بود، مشخص گردید. روزهای انتخاب شده شامل روزهای ۳۵۸-۳۶۳ سال ۲۰۱۳ و همچنین روزهای ۳-۶، ۸، ۹، ۱۱ و ۲۱-۳۰ سال ۲۰۱۴ بودند. نتایج نشان دادند، امکان تحلیل تکامل زمانی کاهش‌های VTEC همسو با اثرات حباب‌های پلاسما در تصاویر ایرگلو برای بسیاری از رویدادها وجود دارد.

۶۳۰ نانومتر که توسط علائم تاریک در پنل سمت راست شکل ۳ ایجاد شده‌اند را مشاهده کرده‌ایم. کاهش‌های پلاسمایی در نقشه‌های VTEC در Cachoeira Paulista (CHPI) و Boa Vista (BOAV) نسبت به São João do Cariri (SJCI) واضح‌تر بودند.

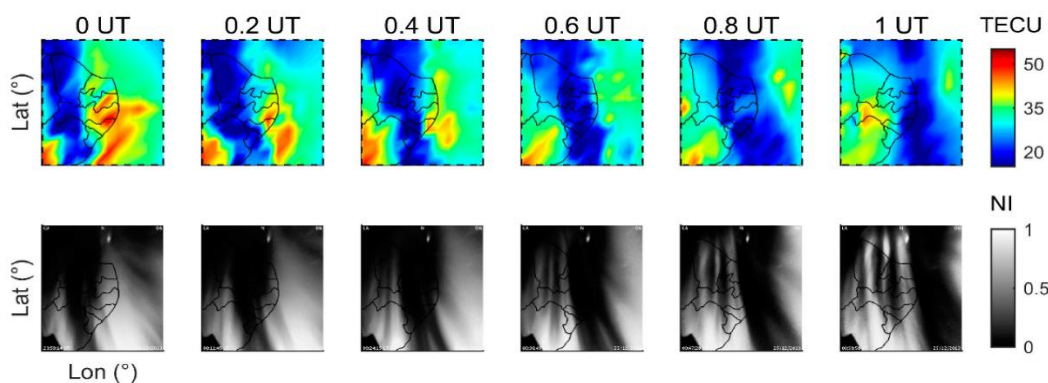
در واقع، SJCI در لبه منطقه بازسازی قرار دارد، جایی که پوشش هندسی سیگنال GNSS برای انجام توموگرافی جوی بسیار ضعیف است. همچنین مهم است به این نکته اشاره کنیم که تعداد کمی مشاهدات در منطقه شمال شرقی، بالاتر از ۱۰ درجه شمالی، و در سمت شرقی ۵۰ درجه غربی استفاده شده‌اند. در واقع، تعدادی از سیگنال‌های GNSS از یون‌سپهر بالا عبور می‌کنند، اما تعداد کمی مشاهدات در نزدیکی ارتفاع قله وجود دارد. نمایش VTEC این بخش به طور اصولی به مدل پس‌زمینه مرتبط است و همانطور که انتظار می‌رود، برخی از آثار در تصاویر بازسازی شده به دلیل تغییرات بالای TEC در انتقال بین پس‌زمینه و بازسازی منطقه‌ای مشاهده می‌شوند.

اگرچه حباب پلاسما در SJCI در روز ۳ از سال ۲۰۱۴ به اندازه‌ای کافی واضح نبود، اما کاهش مقدار پلاسما به وضوح در نقشه‌های VTEC مرتبط با روز ۳۵۹ از ۲۰۱۳ در شکل ۴ مشاهده شوند. می‌توانید کاهش VTEC را با نشانه‌های تاریک تصاویر ایرگلو به دلیل ابعاد طولی بزرگ‌تر حباب پلاسمای روز ۳۵۹ از ۲۰۱۳ در مقایسه با حباب پلاسمای روز ۳ از ۲۰۱۴ مشاهده کنید. بنابراین، حتی با مشکلات پوشش در بازسازی توموگرافی در SJCI، امکان تشخیص حباب‌های پلاسما وجود دارد در صورتی که ابعاد ساختار یون‌سپهری به اندازه کافی بزرگ باشند تا قابل ثبت شدن باشند.

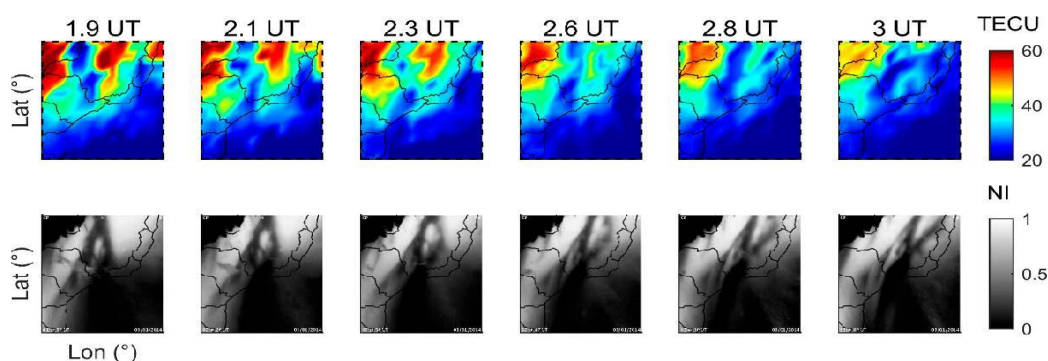


شکل ۳: مثال مقایسه‌ای بین VTEC (چپ) و مشاهدات ایرگلو (راست). مربع‌های سفید رنگ در نقشه VTEC مکان دقیق تصاویر OI ۶۳۰ نانومتر را نشان می‌دهد و مقیاس خاکستری در واحد شدت نرمالیزه است [۳۵].

Fig. 3: Comparative example between the Vertical Total Electron Content (VTEC) depletions and the dark bands of the airglow observations. The white square shows the exact location of the Geo-referenced OI 630 nm images and the grayscale is in units of normalized intensity (NI) [35].

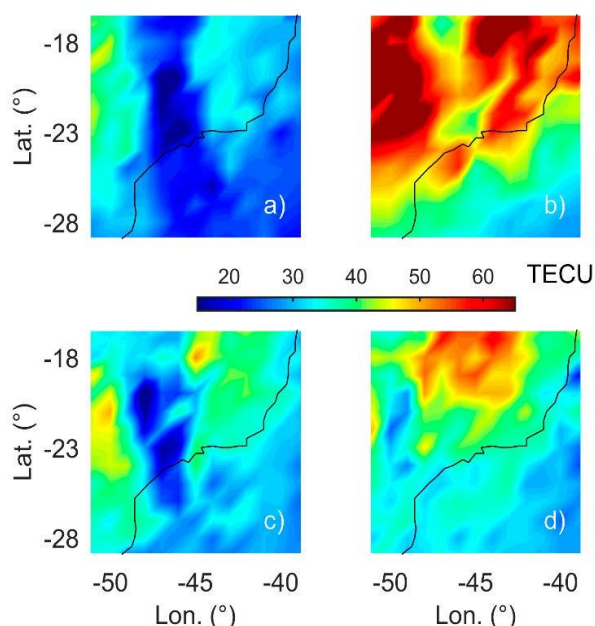


شکل ۴: مثالی از انتشار حباب پلاسما که در SJCI منتشر می‌شود که توسط بازسازی های VTEC (ردیف بالا) و مشاهدات ابزار اپتیکی ایرگلو (ردیف پایین) [۳۵].
Fig. 3: Example of a plasma bubble propagating through São João do Cariri (SJCI) in DOY 359 of 2013, detected by the VTEC reconstructions and the optical instruments [35].



شکل ۵: مثالی از انتشار حباب پلاسما در CHPI در روز ۳ از سال ۲۰۱۴ گرفته شده به وسیله VTEC (ردیف بالا) و ابزار اپتیکی ایرگلو (ردیف پایین) [۳۵].
Fig. 4: Example of a plasma bubble propagating through Cachoeira Paulista (CHPI) in DOY 3 of 2014 detected by the VTEC reconstructions and the optical instruments [35].

عنوان یک حباب پلاسما تفسیر شود. بنابراین، با نگاه به کل منطقه آمریکای جنوبی، می‌توان عدم وجود حباب‌های پلاسما را تأیید می‌کنیم.



شکل ۶: تصاویر ۴ مورد a, b, c, و d با استفاده از روش توموگرافی بازسازی VTEC در CHPL [۳۵].

Fig. 6: Four cases a, b, c, and using the VTEC reconstruction in CHPL [35].

طبقه‌بندی تصاویر ۶ تا ۸ در ادامه آمده است. (a) تصاویر با حباب‌های پلاسما که به طور متقابل توسط روش توموگرافی و ابزارهای نوری شناسایی شده‌اند، در روز سال ۲۰۱۴ از ۲۲ UT در ۱.۵؛ (b) حباب‌های پلاسما که توسط تصاویر ایرگلو شناسایی شده‌اند، اما در بازسازی‌های VTEC شناسایی نشده‌اند؛ در روز سال ۲۰۱۴ از ۲۴ UT در ۰.۸ (c) تصاویر حباب‌های پلاسمایی که در VTEC شناسایی شده‌اند اما در تصاویر ایرگلو شناسایی نشده‌اند؛ در روز سال ۳۸۵ از ۲۰۱۳ UT در ۰.۵ و (d) حباب‌های پلاسما که توسط هیچ کدام از ابزارها شناسایی نشده‌اند، در روز سال ۳۶۰ از ۲۰۱۳ UT در ۰.۰. شکل‌های ۶-۸ مثال‌هایی از این طبقه‌بندی را نشان می‌دهد.

یک مطالعه دقیق از تصاویر VTEC و ایرگلو انجام شد. به عنوان مثال با گرفتن مورد (a)، می‌توانیم به وضوح یک کاهش پلاسما در سطح VTEC در شکل a ۶ و یک نوار تاریک همزمان در شکل a ۷ را ببینیم. هنگامی که به کل سناریوی آمریکای جنوبی در شکل ۸ نگاه می‌کنیم، تأیید می‌کنیم که کاهش VTEC مربوطه به یک بی‌نظمی بزرگ مقیاس همسو با خط میدان ژئومغناطیسی اشاره دارد. در واقع، شکل ۸ برای تحلیل دقیق‌تر و تصمیم‌گیری درست ترسیم شده است، زیرا معمولاً بی‌نظمی‌های کوچک مقیاس هم می‌توانند کاهش‌های VTEC را نشان دهند که اگر در مقیاس بزرگتر مشاهده شوند، مشخص خواهد شد که ساختار حباب پلاسما ندارند. به عنوان مثال، مورد (b) یک کاهش کوچک VTEC را در شکل ۶ نشان می‌دهد که می‌تواند به اشتباه به

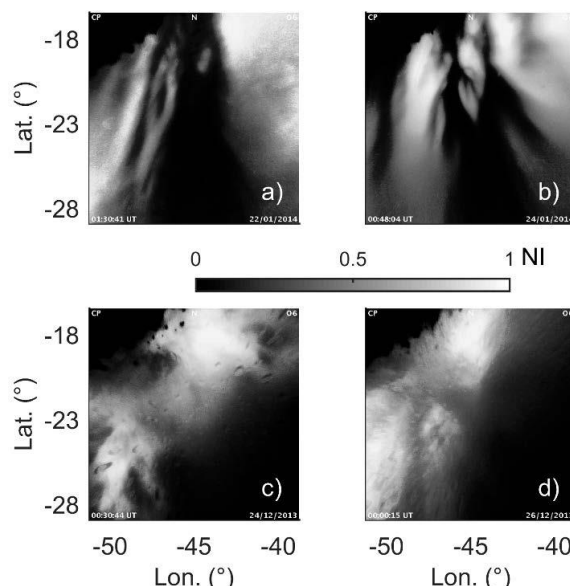
۱۱۷ تصویر ایرگلو حباب‌های پلاسما را شناسایی کرده‌اند که در نقشه‌های VTEC دیده نشده‌اند. این یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها است، زیرا مستقیماً خطاهای به‌دست‌آمده با روش توموگرافی را در مقایسه با تصاویر شب‌تاب نشان می‌دهد. از سوی دیگر، خط سوم و ستون اول نشان می‌دهد که ۲۱ حباب پلاسما توسط روش توموگرافی شناسایی شده‌اند، اما توسط ابزارهای نوری ثبت نشده‌اند. این نیز یک نکته مهم است، زیرا نشان می‌دهد که روش توموگرافی در برخی موارد دقیق‌تر است که احتمالاً به دلیل محدودیت‌های هواشناسی تابش‌های ایرگلو درست است.

تحلیل کلی نتایج ارائه‌شده در جداول ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد حباب‌های پلاسما که توسط ابزارهای نوری شناسایی شده‌اند، در CHPI به‌دست‌آمده است، زیرا داده‌های ایرگلو بیشتری برای این ایستگاه وجود دارد. نرخ موفقیت روش توموگرافی با گرفتن نسبت حباب‌های پلاسما که به‌طور مشترک شناسایی شده‌اند (خط اول و ستون اول) از مجموع تعداد حباب‌های پلاسما که فقط توسط تصاویر اپتیکی شناسایی شده‌اند (تمام ستون‌های خط اول) تعریف شده است. در این زمینه، نرخ موفقیت روش توموگرافی برای شناسایی حباب‌های پلاسما به ترتیب ۵۴.۲٪، ۳۱.۵٪ و ۲۵.۷٪ برای BOAV، SJCI و CHPI بود. در واقع، پایین‌ترین نرخ موفقیت در CHPI نشان می‌دهد که روش توموگرافی در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر بهتر عمل می‌کند، که البته همین انتظار هم می‌رود زیرا ابعاد حباب‌های پلاسما در چنین مناطقی بزرگ‌تر است. منطقه CHPI ۵۱ تصویر با حباب‌های پلاسما در نقشه‌های VTEC ارائه می‌دهد که توسط تصاویر ایرگلو شناسایی نشده بودند. این موضوع عمدتاً به دلیل شرایط هواشناسی در CHPI است، چراکه در این موقعیت ابرهای بارشی تصویربرداری از حباب‌های پلاسما را مشکل می‌کند و حتی آلودگی ناشی از روشنایی نور ماه نیز می‌تواند در این مورد موثر باشد.

مقایسه تکنیک توموگرافی به‌وسیله GNSS با به سایر روش‌ها

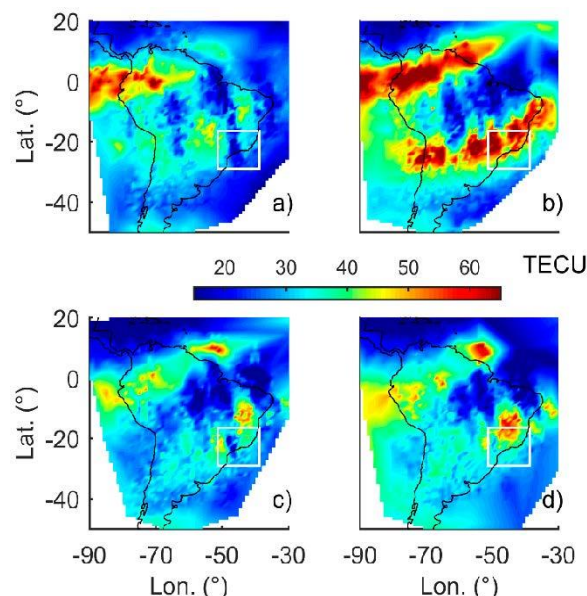
علاوه بر تکنیک بررسی شده در این مقاله بر توموگرافی یونسفر، روش‌های دیگری نظیر استفاده از روش‌ها تصویربرداری تمام آسمان، رادارهای پراکندگی غیرهمدوس، توموگرافی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای نظیر اختفای رادیویی (RO) نیز وجود دارند که منجر به تهیه نقشه‌های توموگرافی از لایه یون‌سفر می‌شوند.

توموگرافی سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS) از سیگنال‌های چندین ماهواره GNSS برای بازسازی توزیع چگالی الکترون در یون‌سفر استفاده می‌کند. روش توموگرافی به وسیله سیگنال‌های GNSS که در این مقاله به آن پرداخته شده است به دلیل ارائه وضوح مکانی و زمانی بالا، امکان تصویربرداری سه‌بعدی دقیق از حباب‌های پلاسما را فراهم می‌کند. این روش بسیار کم هزینه است و همچنین پوشش جغرافیایی وسیعی را دارد، که البته این موضوع به دلیل وجود زیرساخت‌های



شکل ۷: تصاویر ۴ مورد، a، b، c و d با استفاده از مشاهدات ایرگلو در CHPL [۳۵].

Fig. 6: Four cases a, b, c, and d using the airglow observations in CHPL [35].



شکل ۸: چهار مورد، a، b، c، و d با استفاده از بازسازی‌های VTEC در کل منطقه آمریکای جنوبی. مربع سفید پوشش تصاویر CHPI را نشان می‌دهد [۳۵].

Fig. 8: Four cases a, b, c, and d using the VTEC reconstructions over all the South America region. The white square shows the coverage of the CHPI images [35].

جدول ۱ اعداد به‌دست‌آمده در Boa Vista را در طول ۲۳ رو مشاهده نشان می‌دهد، جایی که خط اول و ستون اول جدول به تعداد تصاویری اشاره دارد که حباب‌های پلاسما به‌طور مشترک توسط مشاهدات VTEC و ایرگلو شناسایی شده‌اند. به عنوان مثال، عدد ۱۸۱ نشان می‌دهد که ۱۸۱ حباب پلاسما به‌طور مشترک توسط ابزارها دیده شده‌اند که ۲۹٪ از تصاویر استفاده‌شده در تحلیل در Boa Vista را نشان می‌دهد. آخرین موقعیت جدول واقع در خط سوم و ستون سوم تعداد تصاویری را نشان می‌دهد که در هیچ کدام از روش‌ها حباب پلاسما را شناسایی نمی‌کنند. همچنین اطلاعات مربوط به خط اول و ستون سوم نشان می‌دهد که

یون‌سپهر را فراهم می‌کند. با این حال، وابسته به شرایط آب و هوایی است و فقط در مناطقی با آسمان صاف مؤثر است. پوشش ابری و سایر شرایط نامساعد جوی می‌تواند به طور قابل توجهی کیفیت مشاهدات را تحت تأثیر قرار دهد.

رادار پراکندگی غیرهمدوس (ISR) پراکندگی برگشتی از الکترون‌های یون‌سپهری را برای تعیین پروفایل‌های چگالی الکترون اندازه‌گیری می‌کند. این روش اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از چگالی الکترون و سایر پارامترهای یون‌سپهری ارائه می‌دهد و برای مطالعات دقیق فرآیندها و دینامیک‌های یون‌سپهری ایده‌آل است. ISR پروفایل‌های عمودی دقیقی ارائه می‌دهد، اما ساخت و نگهداری آن هزینه‌بر است و پوشش آن به مکان‌های تأسیسات ISR محدود می‌شود.

ترکیب چندین روش، مانند توموگرافی GNSS با RO یا تصویربرداری تمام آسمان، می‌تواند دقت و وضوح تشخیص حباب‌های پلاسما را افزایش دهد. این رویکرد از نقاط قوت هر روش برای ارائه درک جامع‌تری از یون‌سپهر بهره می‌برد. در حالی که ترکیب داده‌ها از منابع مختلف می‌تواند دقت کلی و قابلیت اطمینان را بهبود بخشد، نیاز به الگوریتم‌های پیچیده برای یکپارچه‌سازی داده‌ها دارد و می‌تواند منابع زیادی را مصرف کند. ادغام منابع داده مختلف نمای جامع‌تری از پدیده‌های یون‌سپهری ارائه می‌دهد و آن را به یک رویکرد قدرتمند برای مطالعات جامع یون‌سپهر تبدیل می‌کند.

موجود GNSS است. با این حال، دقت توموگرافی مبتنی بر GNSS می‌تواند تحت تأثیر تلاطم‌های یون‌سپهری و هندسه شبکه گیرنده‌های GNSS قرار گیرد. در صورت متراکم بودن شبکه گیرنده‌ها این روش نتایج بهتری ارائه می‌دهد، اما اثربخشی این روش در مناطقی با پوشش کم گیرنده‌ها محدود است.

از سوی دیگر تکنیک اختفای رادیویی که نیز مبتنی بر تکنولوژی GNSS است، شامل اندازه‌گیری تغییرات در سیگنال‌های GNSS هنگام عبور از یون‌سپهر است و پروفایل‌های چگالی الکترونی این لایه را با وضوح عمودی بالا فراهم می‌کند. این تکنیک برای پروفایل‌سازی ساختار عمودی یون‌سپهر عالی است و پوشش جهانی ایجاد می‌کند که حتی امکان سنجش لایه یونسفر در مناطق دورافتاده و اقیانوسی که در آنجا وسایل اندازه‌گیری‌های زمینی در دسترس نیست، ایجاد می‌شود. با این حال، RO دارای وضوح افقی محدود است و اثربخشی آن به مدارهای ماهواره‌های RO بستگی دارد که می‌تواند کاربرد آن را برای نقشه‌برداری افقی حباب‌های پلاسما محدود کند.

تصویربرداری تمام آسمان از دوربین‌های زمینی مجهز به فیلترها برای ثبت تابش‌های ایرگلو از یون‌سپهر استفاده می‌کند و نمای بصری مستقیم از حباب‌های پلاسما و سایر پدیده‌های یون‌سپهری را فراهم می‌کند. در قسمت پایانی این مقاله این روش با روش توموگرافی رادیویی برای نقشه‌برداری از حباب‌های پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. این روش وضوح زمانی بالایی دارد و امکان مشاهده تغییرات سریع در

جدول ۱: تعداد حباب‌های پلاسمایی که به وسیله بازسازی توموگرافی و ابزارهای اپتیکی گرفته شده در ناحیه Boa Vista.

Table 1: The number of plasma bubbles captured by tomography reconstruction and optical instruments in the Boa Vista region.

		Tomoraphy		
		With Bubbles	Uncertain	Without Bubbles
Airglow	With Bubbles	181 (29%)	36 (5.9%)	117 (19%)
	Uncertain	6 (0.9%)	34 (5.6%)	80 (13%)
	Without Bubbles	21 (3.4%)	0 (0%)	135(22%)

جدول ۲: تعداد حباب‌های پلاسمایی که به وسیله بازسازی توموگرافی و ابزارهای اپتیکی گرفته شده در ناحیه São João do Cariri.

Table 2: The number of plasma bubbles captured by tomography reconstruction and optical instruments in the São João do Cariri region.

		Tomoraphy		
		With Bubbles	Uncertain	Without Bubbles
Airglow	With Bubbles	133 (18%)	102 (14%)	187 (26%)
	Uncertain	5 (0.7%)	28 (3.9%)	29 (4.1%)
	Without Bubbles	21 (2.9%)	0 (0%)	204 (29%)

جدول ۳: تعداد حباب‌های پلاسمایی که به وسیله بازسازی توموگرافی و ابزارهای اپتیکی گرفته شده در ناحیه Cachoeira Paulista.

Table 3: The number of plasma bubbles captured by tomography reconstruction and optical instruments in the Cachoeira Paulista region.

		Tomoraphy		
		With Bubbles	Uncertain	Without Bubbles
Airglow	With Bubbles	108 (15%)	71 (9.6%)	242 (33%)
	Uncertain	0 (0%)	23 (3.1%)	33 (4.5%)
	Without Bubbles	51 (6.9%)	32 (4.3%)	179 (24%)

خلاصه و نتیجه‌گیری

این مقاله به طور خلاصه تکنیک‌های مبتنی بر GNSS را برای سنجش و توموگرافی یون‌سپهر بیان می‌کند. چگونگی اندازه‌گیری محتوای کل الکترونی (TEC) در یون‌سپهر از طریق سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی (GNSS) به تفصیل توضیح داده شده است. نحوه تأثیرپذیری سیگنال‌های GNSS نسبت به تغییرات TEC هنگام عبور از یون‌سپهر مطالعه گردید. روش موجود برای چگونگی بدست آوردن تغییر چگالی الکترونی لایه یونسفر مبتنی بر پارامتر TEC با استفاده از تحلیل تفاضل فازی ایجاد شده در سیگنال مخابراتی سامانه ماهواره‌ای راهبری جهانی GNSS در هنگام عبور از لایه‌های مختلف یونسفر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. به این منظور سیگنال‌ها مخابراتی از ماهواره‌های مدار پایین و مدارهای بالا مطالعه شده‌اند و روش بدست آوردن TEC از تفاضل فازی برا هر یک توضیح داده شد. سپس به مطالعه روش‌ها و الگوریتم‌های موجود برای تبدیل اطلاعات TEC به تصاویر توموگرافیک پرداختیم و با استفاده از مثالی ساده روش پیاده‌سازی این الگوریتم‌ها بیان شد. نشان داده شد که روش تفاضل فازی در LORT نتایج دقیق‌تر با حساسیت بالاتری را نسبت به روش تک فازی ارائه می‌دهد. مدل‌سازی به کمک رایانه نشان می‌دهد که ساختارهای یون‌سپهری شبه ثابت را می‌توان با دقت معقولی بازسازی کرد، اگرچه HORT وضوح کمتری نسبت به LORT دارد.

در انتهای این مقاله، مروری بر یک تکنیک برای بازسازی تصاویر توموگرافی حباب‌های پلاسمایی با اندازه‌گیری TEC از طریق سیگنال‌های GNSS انجام گرفت. نشان داده شد که این تکنیک بازسازی توموگرافی روی تصویربرداری از حباب‌های پلاسمایی به خوبی عمل می‌کند. توزیع‌های افقی گرفته شده از تخلیه‌های پلاسمای VTEC با تصاویر گرفته شده از ادوات اپتیکی مقایسه گردید و نتایج مشابهی حاصل شد. نشان داده شد در صورت بزرگ بودن ساختار حباب حتی در نواحی که سیگنال GNSS در آن‌ها ضعیف است، می‌توان نتیجه خوبی از این روش بدست آورد. در انتهای این مقاله به مقایسه روش مطالعه شده در اینجا با روش‌هایی نظیر تصویربرداری تمام آسمان، رادارهای پراکندگی غیر همدوس و غیره، پرداخته شد و مزایا و معایب این روش‌ها نسبت به یکدیگر بیان شد.

مطالعات یون‌سپهری مبتنی بر GNSS کاربردهای عملی فراوانی در زمینه‌های مختلف دارند. از جمله این کاربردها می‌توان به ناوبری، ارتباطات و نظارت بر اقلیمی فضایی اشاره کرد. در ناوبری، دقت و قابلیت اطمینان سیستم‌های موقعیت‌یابی به شدت به اطلاعات دقیق یون‌سپهری وابسته است. GNSS از طریق اندازه‌گیری TEC، امکان پایش تغییرات یون‌سپهری را فراهم می‌آورد که برای بهبود دقت ناوبری حیاتی است. در زمینه ارتباطات، تأثیرات لایه یون‌سپهر می‌تواند بر کیفیت انتقال سیگنال‌های رادیویی و ماهواره‌ای تأثیر بگذارد، بنابراین مطالعات GNSS می‌تواند به کاهش اختلالات و بهبود ارتباطات کمک کند. در نظارت بر اقلیم فضایی، داده‌های GNSS به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی و تحلیل پدیده‌های فضایی مانند طوفان‌های مغناطیسی و تأثیرات آن‌ها

بر زمین استفاده می‌شوند. این اطلاعات می‌توانند به محافظت از سیستم‌های فناوری حیاتی و پیشگیری از اختلالات ناشی از شرایط فضایی کمک کنند. در مجموع، مطالعات یون‌سپهری مبتنی بر GNSS نقش مهمی در پیشرفت فناوری‌های رادیویی و افزایش امنیت و کارایی آن‌ها دارند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمام افرادی که در جمع‌آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها ما را در این تحقیق یاری رساندند، تشکر و تقدیر می‌نمایند.

تعارض و منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مأخذ

- [1] Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Tomography of the Ionosphere. Moscow: Nauka; (1991). (In Russian).
- [2] Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Radiotomography of the Ionosphere. IEEE Antennas and Propagation Magazine (1992). 34, 22-32.
- [3] Leiting, R. Ionospheric tomography. In: Stone R. (ed.) Review of Radio Science 1996-1999. Oxford: Science Publications; (1999). p.581-623.
- [4] Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Ionospheric Tomography. Berlin, NY: Springer; (2003).
- [5] Kunitsyn, V. E, Andreeva, E. S, Kozharin, M. A, & Nesterov, I. A. Ionosphere Radio Tomography using high-orbit navigation system. Moscow University Physics Bulletin (2005). 60(1), 94-108.
- [6] Bust, G. S, & Mitchell, C. N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging. Reviews of Geophysics (2008). 46, RG1003, doi: 10.1029/2006RG000212
- [7] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, & Andreeva, E. S. Radio Tomography of the Ionosphere. Moscow: Nauka; (2007). (In Russian).
- [8] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, Andreeva, E. S, & Nesterov, I. A. Satellite radio probing and radio tomography of the ionosphere. Uspekhi Fizicheskikh Nauk (2010). 180(5), 548-553.
- [9] Mitchell, C, Alfonsi, L, De Franceschi, G, Lester, M, Romano, V, & Wernik, A. GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm. Geophysical Research Letters (2005). 32, L12S03,

- [23] <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2023/data-assimilation-and-climate-specialist-jean-noel-thepaut-bows-out>
- [24] Kunitsyn VE, Andreeva ES, Nesterov IA, Padokhin AM. Ionospheric Sounding and Tomography by GNSS. In book: Geodetic Sciences-Observations, Modeling and Applications, S. Jin.
- [25] Abdu, M.A. Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. *Adv. Space Res.* 2005, 35, 771–787.
- [26] Lee, C.-C.; Su, S.-Y.; Reinisch, B.W. Concurrent study of bottomside spread F and plasma bubble events in the equatorial ionosphere during solar maximum using digisonde and ROCSAT-1. *Ann. Geophys.* 2005, 23, 3473–3480.
- [27] Haase, J.S.; Dautermann, T.; Taylor, M.J.; Chapagain, N.; Calais, E.; Pautet, D. Propagation of plasma bubbles observed in Brazil from GPS and airglow data. *Adv. Space Res.* 2011, 47, 1758–1776.
- [28] Paznukhov, V.V.; Carrano, C.S.; Doherty, P.H.; Groves, K.M.; Caton, R.G.; Valladares, C.E.; Seemala, G.K.; Bridgwood, C.T.; Adeniyi, J.; Amaeshi, L.L.N.; et al. Equatorial plasma bubbles and L-band scintillations in Africa during solar minimum. *Ann. Geophys.* 2012, 30, 675–682.
- [29] Singh, S.; Bamgboye, D.K.; McClure, J.P.; Johnson, F.S. Morphology of equatorial plasma bubbles. *J. Geophys. Res.* 1997, 102, 20019–20029. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97J A01724>
- [30] Burke, W.J.; Gentile, L.C.; Huang, C.Y.; Valladares, C.E.; Su, S.Y. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2004, 109, A12301. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JA010583>
- [31] Nishioka, M.; Saito, A.; Tsugawa, T. Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, A05301. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JA012605>
- [32] Patel, K.; Singh, A.K. Characteristic of plasma bubbles observed by DMSP in the topside ionosphere during the year 2005. *J. Earth Syst. Sci.* 2010, 119, 211–220.
- [33] Xiong, C.; Lüher, H.; Ma, S.Y.; Stolle, C.; Fejer, B.G. Features of highly structured equatorial plasma irregularities deduced from CHAMP observations. *Ann. Geophys.* 2012, 30, 1259–1269.
- [34] Prol, F.S.; Hernández-Pajares, M.; Camargo, P.O.; Muella, M.T.A.H. Spatial and temporal features of the topside ionospheric electron density by a new model based on GPS radio occultation data. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018, 123, 2104–2115.
- <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004GL021644>
- [10] Kunitsyn, V, Nesterov, I, & Shalimov, S. Japan Earthquake on March 11, 2011: GPSTEC Evidence for Ionospheric Disturbances. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* (2011). 94(8), 616-620.
- [11] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, & Andreeva, E. S. Radio Tomography of the Ionosphere. Moscow: Nauka; (2007). (In Russian).
- [12] Kunitsyn, V. E, Tereshchenko, E. D, Andreeva, E. S, & Nesterov, I. A. Satellite radio probing and radio tomography of the ionosphere. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (2010). 180(5), 548-553.
- [13] Kunitsyn, V. E, Andreeva, E. S, Kozharin, M. A, & Nesterov, I. A. Ionosphere Radio Tomography using high-orbit navigation system. *Moscow University Physics Bulletin* (2005). 60(1), 94-108.
- [14] Hofmann-Wellenhof, B, Lichtenegger, H, & Collins, J. Global Positioning System: theory and practice. Berlin, NY: Springer; (1992).
- [15] Franke, S. J, Yeh, K. C, Andreeva, E. S, & Kunitsyn, V. E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images. *Radio Science* (2003). 38(1), doi:10.1029/2002RS002657.
- [16] Andreeva, E. S, Kunitsyn, V. E, & Tereshchenko, E. D. Phase difference radiotomography of the ionosphere. *Annales Geophysicae* (1992). 10, 849-855.
- [17] Hofmann-Wellenhof, B, Lichtenegger, H, & Collins, J. Global Positioning System: theory and practice. Berlin, NY: Springer; (1992).
- [18] Kunitsyn, V. E, Kozharin, M. A, Nesterov, I. A, & Kozlova, M. O. Manifestations of helio-geophysical disturbances in October, 2003 in the ionosphere over West Europe from GNSS data and ionosonde measurements. *Moscow University Physics Bulletin* (2004). 59(6), 68-71.
- [19] Lu W, Ma G, Wan Q, Li J, Wang X, Fu W, Maruyama T. Virtual reference station-based computerized ionospheric tomography. *GPS Solutions.* 2021 Jan;25:1-2.
- [20] Lu W, Ma G, Wan Q. A review of voxel-based computerized ionospheric tomography with GNSS ground receivers. *Remote Sensing.* 2021 Aug 29;13(17):3432.
- [21] Zheng D, Yuan P, He C, Yao Y, Nie W, Lin D, Liao M, Xiong Z. Virtual reference station technology for voxels without signal ray in ionospheric tomography based on machine learning. *GPS Solutions.* 2023 Oct;27(4):166.
- [22] Chen B, Wu L, Dai W, Luo X, Xu Y. A new parameterized approach for ionospheric tomography. *GPs solutions.* 2019 Oct; 23:1-5.

[44] Zhong J, Lei J, Dou X, Yue X. Assessment of vertical TEC mapping functions for space-based GNSS observations. GPS solutions. 2016 Jul;20:353-62.

[45] Huo X, Long Y, Liu H, Yuan Y, Liu Q, Li Y, Liu M, Liu Y, Sun W. A novel ionospheric TEC mapping function with azimuth parameters and its application to the Chinese region. Journal of Geodesy. 2024 Feb;98(2):13.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JA024936>

[35] Prol FS, Hernández-Pajares M, Muella MT, Camargo P. Tomographic imaging of ionospheric plasma bubbles based on GNSS and radio occultation measurements. Remote Sens 10 (10): 1529.

[36] Moraes, A.O.; Vani, B.C.; Costa, E.; Abdu, M.A.; de Paula, E.R.; Sousasantos, J.; Monico, J.F.G.; Forte, B.; Negreti, P.M.S.; Shimabukuro, M.H. GPS availability and positioning issues when the signal paths are aligned with ionospheric plasma bubbles. GPS Solut. 2018, 22, 95.

[37] Tsai LC, Liu CH, Tsai WH, Liu CT. Tomographic imaging of the ionosphere using the GPS/MET and NNSS data. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics. 2002 Dec 1;64(18):2003-11.

[38] Takahashi, H.; Wrasse, C.M.; Otsuka, Y.; Ivo, A.; Gomes, V.; Paulino, I.; Medeiros, A.F.; Denardini, C.M.; Sant'anna, N.; Shiokawa, K. Plasma bubble monitoring by TEC map and 630 nm airglow image. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2015, 130, 151–158.

[39] Makela, J.J.; Kelley, M.C. Field-aligned 777.4-nm composite airglow images of equatorial plasma depletions. Geophys. Res. Lett. 2003, 30, 1442.

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL017106>

[40] Wen D, Tang Y, Chen X, Zou Y. A Double-Adaptive Adjustment Algorithm for Ionospheric Tomography. Remote Sensing. 2023 Apr 27;15(9):2307.

[41] Lin J, Shen X, Hu L, Wang L, Zhu F. CSES GNSS ionospheric inversion technique, validation and error analysis. Science China Technological Sciences. 2018 May; 61:669-77.

[42] Rao KD, Dutt VS. An assessment of mapping functions for VTEC estimation using measurements of low latitude dual frequency GPS receiver. Int. J. Appl. Eng. Res. 2017;12(4):422-7.

[43] Xiang Y, Gao Y. An enhanced mapping function with ionospheric varying height. Remote Sensing. 2019 Jun 25;11(12):1497.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



سحر برزگر دارای مدرک دکتری مهندسی پلاسما از دانشگاه شهید بهشتی می‌باشد. بعد اخذ مدرک دکتری، ایشان به مدت ۲ سال به‌عنوان پژوهشگر پسادکتری در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی تحقیق نموده و از سال ۱۴۰۲ تا کنون به‌عنوان استادیار در گروه

فیزیک فضا مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مشغول به فعالیت هستند. حوزه فعالیت ایشان در زمینه علوم فضایی، سنجش از دور، شبیه‌سازی و مدلسازی پلاسماهای فضایی و یادگیری ماشین است.

Barzegar, S. Assistant Professor at the Department of Space Physics, University of Tehran, Tehran, Iran.

sbarzegar@ut.ac.ir



مسعود خوش‌سیما به‌عنوان استادیار پژوهشگاه فضایی ایران در حوزه علوم و فناوری فضایی و سنجش از دور فعالیت می‌نماید. در حال حاضر ایشان بیش از ۳۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری بیش از ۲۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند.

Khoshsima, M. Assistant Professor at Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

m.khoshsima@isrc.ac.ir

Citation (Vancouver): Barzegar S, Khoshsima M. [Radio Sounding and Tomography of Ionosphere based on GNSS]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 247-264

<https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11166.1081>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Building Detection with Special Roofing in Urban Areas using Hyperspectral Remote Sensing Technology

D. Akbari^{*1}, M. Akbari²¹ Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

ABSTRACT

Received: 30 August 2024
 Reviewed: 11 October 2024
 Revised: 31 October 2024
 Accepted: 24 November 2024

KEYWORDS:

Building detection
 Urban area
 Remote sensing
 Hyperspectral imagery

* Corresponding author

✉ davoodakbari@uoz.ac.ir

☎ (+98915) 9380515

Background and Objectives: One of the analyses performed on the hyperspectral images is target detection. The most common method for target detection in satellite images is pixel-based detection, in which each pixel is assigned to a specific class with only its spectral information and without considering neighboring pixels. With recent advances and the creation of images with high spatial resolution, it is necessary to use both spectral and spatial information to detect hyperspectral images. This research deals with the detection of roofs with special coverage as a target, in an urban environment, through a series of hyperspectral images. Since an urban environment has complex characteristics in terms of physics, geometry and elements used in buildings, hyperspectral data effectively helps to identify, extract and produce a map of the elements that make up an urban environment. Identifying the type of roof of buildings in urban environments is very important in various applications, such as mobile phone communications, virtual reality, architecture and urban modeling, planning, and city management.

Methods: In this research, the spatial information strategy is investigated along with the spectral information to improve target detection in the analysis of hyperspectral images. For this purpose, the spectral-spatial algorithm of marker-based minimum spanning forest, which is used in the image classification process, is used to detect the roofs of buildings with special coverage. The markers were selected from the support vector machine classification map in the proposed method. For this purpose, the analysis of the labeling of the connected components was done based on 8 neighboring pixels. The minimum spanning forest is obtained after creating the minimum spanning tree and removing the ridges related to the added vertex in the last step. In the minimum spanning forest algorithm, each tree grows on one of the vertices of the image, and by assigning the class of each marker to all the pixels grown from it, a spectral-spatial detection map is obtained.

Findings: The above techniques were applied on a series of CASI sensor image data taken from the urban area of Toulouse located in the south of France. The results of quantitative and qualitative evaluations show that the proposed method has improved the value of the Kappa coefficient by 38% in comparison with the spectral angle measurement detection algorithm. This shows the importance of using spatial information in the detection process, while the spectral angle measurement algorithm only needs the spectral information of the desired target for detection.

Conclusion: Simultaneously with the growth of urbanization and the development of urban areas, the need of managers and planners for very accurate maps of urban areas has increased significantly. The use of spatial information, especially in the case of images taken from urban areas where several adjacent pixels belong to the same class or complex, can improve detection accuracy. It is intended to reduce the amount of error in the spectral-spatial detection of the target in the future research. The conditions of creating mixed pixels, such as the overlap of terrestrial phenomena and the heterogeneity of most phenomena, and as a result, the increase of the internal variance of the target, increase the detection error in hyperspectral images. Therefore, it is tried to reduce the above errors by using different methods.



NUMBER OF REFERENCES

46



NUMBER OF FIGURES

7



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

آشکارسازی ساختمان‌های با پوشش خاص در محیط شهری با استفاده از فناوری سنجش از دور فراطیفی

داود اکبری^{۱*}، محمد اکبری^۲^۱ گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: یکی از آنالیزهایی که بر روی تصاویر فراطیفی انجام می‌شود، آشکارسازی هدف است. معمولترین روش جهت آشکارسازی هدف در تصاویر ماهواره‌ای، آشکارسازی مبتنی بر پیکسل بوده که در آن هر پیکسل فقط با اطلاعات طیفی خود و بدون در نظر گرفتن پیکسل‌های همسایگی به کلاس مشخص اختصاص می‌یابد. با پیشرفت‌های اخیر و ایجاد تصاویری با قدرت تفکیک مکانی بالا، لزوم استفاده توأم از اطلاعات طیفی و مکانی را در آشکارسازی تصاویر فراطیفی ایجاب می‌کند. در این پژوهش به آشکارسازی بام‌های دارای پوشش خاص به‌عنوان هدف، در یک محیط شهری از طریق یک سری تصویر فراطیفی پرداخته می‌شود. از آنجائی که یک محیط شهری دارای ویژگی‌های پیچیده‌ای از نظر فیزیکی، هندسی و عناصر به کار گرفته شده در ساختمان‌هاست، داده‌های فراطیفی کمک مؤثری به شناسایی، استخراج و تولید نقشه از عناصر سازنده یک محیط شهری می‌کنند. شناسایی جنس بام ساختمان‌ها در محیط‌های شهری، اهمیت زیادی در کاربردهای گوناگون، چون ارتباطات تلفن‌های همراه، واقعیت مجازی، معماری و مدلسازی شهری، برنامه‌ریزی و مدیریت شهرها دارد.

روش‌ها: در این تحقیق استراتژی اطلاعات مکانی در کنار اطلاعات طیفی جهت بهبود آشکارسازی هدف در آنالیز تصاویر فراطیفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از الگوریتم طیفی-مکانی جنگل پوشای مینیمم مبتنی بر نشانه که در فرآیند طبقه‌بندی تصاویر استفاده شده است، جهت آشکارسازی بام ساختمان‌های با پوشش خاص استفاده می‌گردد. در روش پیشنهادی نشانه‌ها از روی نقشه طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان انتخاب شدند. برای این منظور آنالیز برچسب‌گذاری مولفه‌های متصل بر اساس ۸ پیکسل همسایگی انجام گرفت. بعد از ایجاد درخت پوشای مینیمم و حذف یال‌های مربوط به رأس اضافه شده در مرحله آخر، جنگل پوشای مینیمم حاصل می‌شود. در الگوریتم جنگل پوشای مینیمم هر درخت روی یکی از رئوس تصویر رشد می‌نماید و با اختصاص دادن کلاس هر نشانه به همه پیکسل‌های رشد یافته از آن، نقشه آشکارسازی طیفی-مکانی حاصل می‌گردد.

یافته‌ها: تکنیک‌های فوق بر روی یک سری از داده‌های تصویری سنجنده CASI که از منطقه شهری تولوز واقع در جنوب فرانسه برداشت شده است، اعمال شدند. نتایج ارزیابی‌های کمی و کیفی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی مقدار ضریب کاپا را به میزان ۳۸ درصد در مقایسه با الگوریتم آشکارسازی اندازه‌گیری زاویه طیفی بهبود داده است. این موضوع اهمیت به کارگیری اطلاعات مکانی در فرآیند آشکارسازی را نشان می‌دهد، درحالی‌که الگوریتم اندازه‌گیری زاویه طیفی جهت آشکارسازی فقط نیاز به اطلاعات طیفی هدف موردنظر دارد.

نتیجه‌گیری: همزمان با رشد شهرنشینی و توسعه مناطق شهری نیاز مدیران و برنامه‌ریزان به نقشه‌های بسیار دقیق از مناطق شهری به طور چشمگیری افزایش یافته است. استفاده از اطلاعات مکانی به خصوص در مورد تصاویر اخذ شده از مناطق شهری که در آن‌ها چندین پیکسل مجاور به یک کلاس یا عارضه یکسان تعلق دارند، می‌تواند باعث بهبود دقت در آشکارسازی شود. در نظر است در تحقیقات آتی از میزان خطای موجود در آشکارسازی طیفی-مکانی هدف کاسته شود. شرایط ایجاد پیکسل‌های مختلط مانند هم‌پوشانی پدیده‌های زمینی و ناهمگن بودن اکثر پدیده‌ها، و در نتیجه افزایش واریانس داخلی هدف موجب افزایش خطای آشکارسازی در تصاویر فراطیفی می‌شود. از این‌رو سعی بر این است که بتوان با استفاده از روش‌های مختلف خطاهای فوق را کم نمود.

تاریخ دریافت: ۰۹ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۰ مهر ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۰ آبان ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۰۴ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

آشکارسازی ساختمان
محیط شهری
سنجش از دور
تصویر فراطیفی

* نویسنده مسئول

davoodakbari@uoz.ac.ir

۰۹۱۵-۹۳۸۰۵۱۵ ①

مقدمه

آشکارسازی هدف یکی از روش‌های پردازش در تصاویر فراطیفی است. روش‌هایی که در پردازش داده‌های فراطیفی استفاده می‌شوند، همگی جزء گروه‌های مختلف روش‌های شناسایی الگو قرار می‌گیرند. بر این اساس و با توجه به سطح دانش به‌کاررفته، به روش‌هایی چون کشف، طبقه‌بندی، شناسایی و تفکیک اشیاء می‌توان اشاره کرد [۱-۴].

فضاهای بازنمایی این داده‌ها برای محاسبات عبارت‌اند از فضای تصویر، فضای طیفی و فضای ویژگی. در این رابطه بسته به اینکه از کدام فضای محاسباتی استفاده شود، الگوریتم‌های مختلف محاسباتی جهت استخراج اطلاعات از این داده‌ها به کار گرفته می‌شود [۵-۸]. در این پژوهش به آشکارسازی بام‌های دارای پوشش خاص به‌عنوان هدف، در یک محیط شهری از طریق یک سری تصویر فراطیفی پرداخته شده است. از آنجائی که یک محیط شهری دارای ویژگی‌های پیچیده‌ای از نظر فیزیکی، هندسی و عناصر به کار گرفته شده در ساختمان‌هاست، داده‌های فراطیفی کمک مؤثری به شناسایی، استخراج و تولید نقشه از عناصر سازنده یک محیط شهری می‌کنند [۹-۱۱]. شناسایی مواد ساختمان‌ها در محیط‌های شهری، اهمیت زیادی در کاربردهای گوناگون از جمله مخابرات دارد [۱۲-۱۶]. شرکت‌های مخابراتی جهت مدل‌سازی انتشار امواج صوتی مربوط به تلفن‌های همراه بر مدل رقومی ارتفاع منطقه نیاز به دانستن جنس بام ساختمان‌ها دارند. یکی از عوامل مهم در مدل‌سازی یک منطقه شهری یا طبیعی، داده‌های موردنیاز مدل‌سازی است. در هر مدل‌سازی، داده‌های هندسی و داده‌های توصیفی همچون اطلاعات مربوط به پوشش زمین و نوع مواد از ضروریات هستند. داده‌های هندسی در محیط‌های شهری معمولاً از به کارگیری روشهایی چون فتوگرامتری، اینترفرومتری رادار و یا سیستم‌های لیدار برای تولید مدل‌های رقومی ارتفاع حاصل می‌شوند. داده‌های توصیفی نیز معمولاً با توجه به مزایا و هزینه‌های اقتصادی روشهای سنجش از دور از این طریق تولید می‌گردند. برخلاف مخابرات باسیم که هر جفت فرستنده و گیرنده به وسیله رابط‌های مجزا و ایزوله از هم به هم متصل شده‌اند، در مخابرات بی‌سیم کاربران در هوا مخابره کرده و تداخل زیادی بین آن‌ها وجود دارد. امواج رادیویی فرکانس پایین هنگام حرکت معمولاً سطح زمین را دنبال می‌کنند، فرکانس کاری مخابرات بی‌سیم در فضای باز فرکانس‌های زیر ۳۰ گیگاهرتز است. تفاوت‌های عمده مخابرات بی‌سیم با مخابرات باسیم وجود محو شدگی و تداخل است. این دو موضوع پژوهشگران را با چالش‌هایی روبرو کرده که در مخابرات باسیم وجود ندارد. محو شدگی به دلیل از دست رفتن یک مسیر بین فرستنده و گیرنده به دلیل ضعیف شدن آن مسیر یا قرار گرفتن یک مانع در مسیر (سایه کردن موانع) است. از این رو لازم است مدل‌سازی از اهداف موجود در منطقه صورت گیرد.

تنوع اطلاعات قابل کسب توسط سنجنده‌های فراطیفی، بخصوص در مناطق پیچیده از نقطه نظر ساختاری و طیف رادیومتریکی، سبب کاهش بازدهی روش‌های معمول آشکارسازی تصویر شده و لزوم استفاده از

تمامی ویژگی‌های یک هدف اعم از خصوصیات طیفی، مکانی، ساختاری، بافت و غیره را بیش از پیش روشن می‌سازد [۳]. آشکارسازی در تصاویر فراطیفی به دو شکل آشکارسازی طیفی و آشکارسازی طیفی-مکانی انجام می‌گیرد. تاکنون اکثر الگوریتم‌های مورد استفاده جهت آشکارسازی تصاویر فراطیفی جزء الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی بوده است. در الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی-مکانی از داده‌های طیفی و مکانی به طور همزمان استفاده شده و همبستگی مکانی بین پیکسل‌ها در تصویر لحاظ گردیده و در محاسبات مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در یک تصویر از آنجایی که برای یک پیکسل هم سنجنده‌های تصویربرداری مقدار معنی‌داری از انرژی را از پیکسل‌های همسایگی دریافت نموده و هم ساختارهای یکنواخت عموماً فضای بیشتری را در مقایسه با اندازه یک پیکسل اشغال می‌کنند، پیکسل‌های همسایگی به هم وابسته می‌باشند. بر این اساس در این روش‌ها مجموعه‌ای از پیکسل‌های همگن کنار هم گروه‌بندی شده و به عنوان کوچکترین واحد آنالیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. با استفاده از گروهی از پیکسل‌ها به جای یک پیکسل در آنالیز و البته در نظر گرفتن روابط مکانی آن‌ها با یکدیگر، تأثیراتی مانند اثر نمک فلفلی که عمدتاً در آشکارسازی طیفی نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد، کاهش می‌یابد [۱۸، ۱۹]. در حقیقت، حرکت از پیکسل به شی به طور مؤثری واحدهای آنالیز را از اطلاعات طیفی صرف به مجموعه‌ای بی‌شمار از معیارها انتقال می‌دهد. این انتقال چندین مزیت دارد ۱- روش آشکارسازی طیفی-مکانی قادر است واریانس طیفی صحنه را با تقسیم آن به اشیاء همگن کاهش دهد [۲۰، ۲۱]. در واقع با تبدیل پیکسل به شیء تعداد عناصر صحنه کاهش یافته و با کاهش تعداد عناصر شاهد کاهش واریانس طیفی هستیم. ۲- این انتقال امکان بهره‌وری از ابزارهای غیرطیفی مانند شکل، بافت و محتوا را در اختیار کاربر می‌دهد [۲۲، ۲۳]. ۳- ممکن است وابستگی نزدیک بین مرز اشیاء تشکیل شده درون تصویر و واقعیت خارجی آن‌ها وجود داشته باشد که به لحاظ محتوایی در امر آشکارسازی مؤثر خواهد بود [۲۱]. ۴- به لحاظ ویژگی‌های ظاهری، به دلیل تشکیل اشیا به صورت منسجم‌تر، کلاس‌های موجود در نقشه‌های حاصل به لحاظ بصری بیشتر قابل درک هستند [۲۱]. به طور کلی اطلاعات مکانی به سه روش نزدیکترین همسایگی ثابت، فیلترهای همسایگی و قطعه‌بندی استخراج می‌گردند [۲۴-۲۶]. فیلترهای همسایگی بر اساس ریاضیات همسایگی بوده و به جای تعریف همسایگی ثابت برای هر پیکسل، قادر به آنالیز همسایگی هر پیکسل بر اساس ساختارهای متعلق به آنها می‌باشند. قطعه‌بندی به صورت بخش‌بندی تصویر به مناطق غیرمشتک تعریف می‌شود، به طوری که هر بخش با توجه به معیار یکنواخت خاصی مانند شدت یا بافت به صورت همگن در نظر گرفته شده است [۲۷]. در واقع در روش‌های قطعه‌بندی هر شیء به صورت همسایگی مکانی برای همه پیکسل‌های داخل آن شیء تعریف می‌شود. این راه‌حل برای مناطق یکنواخت بزرگ، همسایگی‌های بزرگی را ایجاد کرده و از طرف دیگر مناطق با یک یا چند پیکسل را از دست نمی‌دهد. بنابراین اگر نقشه

نظر گرفتن معیارهای مختلف از جمله سکو و زاویه تابش، داده‌های چندطیفی و فراطیفی را شبیه‌سازی نموده و سپس با کمک الگوریتم‌های آماری اهداف مختلفی را از روی تصاویر شبیه‌سازی شده آشکارسازی نمودند [۳۴].

همزمان با رشد شهرنشینی و توسعه مناطق شهری نیاز مدیران و برنامه‌ریزان به نقشه‌های بسیار دقیق از مناطق شهری به طور چشمگیری افزایش یافته است، همچنین با توجه به اهمیت مدیریت بحران حین بروز بلایای طبیعی مانند سیل و زمین لرزه و لزوم تخمین خسارات وارده، افزایش سرعت روند تولید و به هنگام رسانی نقشه‌ها از اهمیت شایان توجهی برخوردار می‌باشد. در این راستا، استفاده از تصاویر و داده‌های سنجش از دور به منظور سرعت دهی به روند تشخیص عوارض شهری و تولید نقشه‌های به هنگام مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر شهرها مکان‌هایی با پیچیدگی‌های زیاد و پدیده‌های فراوانی هستند که انجام پردازش در آن‌ها نیازمند تصاویری با قدرت‌های تفکیک بالاست. بر اساس متون سنجش از دوری مرتبط، سه نکته در آنالیز داده‌های شهری برجسته است: ۱- شباهت خصوصیات طیفی پوشش‌های مختلف ۲- تغییرات طیفی پیکسل‌های متعلق به یک پوشش خاص ۳- روی هم قرار گرفتن برخی کلاس‌ها در محیط شهری. همان طور که اشاره شد داده‌های فراطیفی به دلیل این که اطلاعات کاملی از ماهیت اشیاء زمینی دارند، بخوبی می‌توانند در کشف و شناسایی مواد، بوسیله روشهای رقومی خودکار و نیمه خودکار بکار روند، این روشها را اصطلاحاً نقشه برداری مواد می‌نامند که در حقیقت نوعی طبقه‌بندی تصاویر و تولید نقشه‌های پوشش زمین هستند. بر همین اساس سؤالات زیر جهت انجام این تحقیق مطرح می‌گردد: ۱- تصاویر فراطیفی چگونه می‌توانند باعث بهبود دقت آشکارسازی هدف گردند؟ ۲- آیا استفاده از اطلاعات مکانی در کنار اطلاعات طیفی موجب افزایش دقت فرایند آشکارسازی می‌گردد؟ برای این منظور در این پژوهش به آشکارسازی بام ساختمان به‌عنوان هدف، در یک محیط شهری از طریق یک سری تصویر فراطیفی پرداخته می‌شود. از آنجائی که یک محیط شهری دارای ویژگی‌های پیچیده‌ای از نظر فیزیکی، هندسی و عناصر به کار گرفته شده در ساختمان‌هاست، داده‌های فراطیفی می‌توانند کمک مؤثری به شناسایی، استخراج و تولید نقشه از عناصر سازنده یک محیط شهری نمایند. همچنین استفاده از اطلاعات مکانی به خصوص در مورد تصاویر اخذ شده از مناطق شهری که در آن‌ها چندین پیکسل مجاور به یک کلاس یا عارضه یکسان تعلق دارند، می‌تواند نقش مؤثری در دقت آشکارسازی داشته باشد.

در ادامه، مبانی نظری، منطقه مورد مطالعه و روش آشکارسازی طیفی- مکانی پیشنهادی بیان می‌گردد. سپس به تشریح آزمون‌های عملی صورت گرفته، پرداخته و در نهایت در بخش پایانی نتیجه‌گیری از موارد بیان شده ارائه می‌گردد.

دقیقی از اشیاء بر اساس ساختارهای مکانی در تصویر ایجاد گردد، نقشه قطعه‌بندی حاصله اطلاعات مکانی دقیق و کاملی را ایجاد خواهد کرد. یک روش معمول جهت داشتن نتایج قطعه‌بندی دقیق، روش قطعه‌بندی مبتنی بر نشانه‌ها است [۲۸، ۲۹]. نشانه برای هر ناحیه، مکانی از تصویر است با جمعیت یک یا چند پیکسل. این نشانه‌ها سپس در فرایند قطعه‌بندی رشد یافته و منجر به ناحیه‌ای مشخص در نقشه قطعه‌بندی می‌شود. در آنالیز انجام گرفته در این تحقیق نیز به دلیل پیچیدگی‌های طیفی و ساختاری منطقه مورد نظر و قدرت تفکیک بسیار بالای تصویر، لزوم استفاده از توصیفگرهای بهینه متناظر با هر هدف، جهت آشکارسازی دقیق آن احساس می‌گردد.

در خصوص آشکارسازی طیفی هدف از دو دهه اخیر تاکنون تحقیقات مستمر و متعددی صورت پذیرفته است. در مطالعه‌ای چانگ و چیانگ، روش‌های فاصله مالهالانیس و فیلتر انطباقی را به‌عنوان روش‌های آشکارسازی آنامولی مطرح کردند و آن‌ها را بر روی تصاویر فراطیفی پیاده‌سازی نمودند [۳۰]. نکته حائز اهمیت این است که روش‌های مطرح شده در این تحقیق بر اساس خصوصیات ماتریس‌های کواریانس و کورولیشن بوده و در سطح زیرپیکسل به آشکارسازی می‌پردازند. با توجه به این که تصاویر ایجاد شده بوسیله آشکارسازهای آنامولی، به طور کلی درجه خاکستری هستند آشکارسازی آنامولی معمولاً به صورت بصری انجام می‌شود. به منظور جلوگیری از چنین دخالت‌های انسانی و ایجاد یک ارزیابی عینی نیاز به توسعه روشی است که به صورت اتوماتیک استخراج پیکسل‌های حاوی آنامولی را انجام دهد و آنها را از زمینه تصویر جداسازی کند. بدین منظور آنها از یک روش آستانه‌گذاری اتوماتیک برای تبدیل تصویر درجه خاکستری (حاصل از مرتبه اول) به تصویری دودویی استفاده نمود تا بتواند هدف‌های انتخاب شده را از زمینه تصویر به صورت اتوماتیک استخراج کند [۳۰]. در تحقیقی دیگر همایونی و رکس، سه روش آشکارسازی اندازه‌گیری زاویه طیفی، شباهت همبستگی طیفی و کمینه‌سازی مقید انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها معیارهای فوق را بر روی داده تصویری سنجنده CASI مربوط به یک منطقه شهری اعمال نمودند [۳۱]. امامی و آفری، با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی بر اساس پیکسل شامل روش‌های اندازه‌گیری زاویه طیفی و بیشترین شباهت و همچنین روش تجزیه طیفی (زیرپیکسل) به طبقه‌بندی تصویر AVIRIS مربوط به یک منطقه کشاورزی پرداختند [۳۲]. در این تحقیق برای حذف نویز و استفاده بهینه از این تصاویر، الگوریتم حداقل کسری نویز بر روی تصاویر انجام شد، سپس روش‌های فوق بر روی تصاویر اولیه و همچنین تصاویر حداقل کسری نویز اعمال شد و تعداد ۳، ۵، ۱۰، ۵۰، ۸۷، ۱۲۰، ۱۵۵، ۱۷۵ و ۱۹۵ باند برای طبقه‌بندی و تهیه نقشه موضوعی مورد استفاده قرار گرفت. فریتس و همکاران، جهت آشکارسازی شناورها در تصاویر فراطیفی از الگوریتم شبکه‌های عصبی و جهت مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم اندازه‌گیری زاویه طیفی استفاده نمودند [۳۳]. ژا و نیدمنوری، ابتدا با در

مبانی نظری

آشکارسازی هدف

یکی از آنالیزهایی که بر روی تصاویر فراطیفی انجام می‌گیرد، آشکارسازی هدف است [۳۵-۳۷]. آشکارسازی هدف را می‌توان نوعی طبقه‌بندی دو کلاسه دانست بطوریکه مشخص می‌کند آیا یک پیکسل حاوی هدف مشخص شده است یا خیر. به بیان دیگر آشکارسازی هدف، نقشه هر هدف را بطور جداگانه به دست می‌دهد [۳۸]. بر اساس مشخص یا نامشخص بودن مشخصه‌های طیفی اهداف، آشکارسازی به دو صورت نظارت شده و نظارت نشده انجام می‌گیرد. آشکارسازی نظارت شده با فرض واقف بودن بر صحنه تصویربرداری و در اختیار داشتن دانش اولیه در مورد اهداف موجود در آن، کار آشکارسازی تصاویر فراطیفی را انجام می‌دهند. آشکارسازی نظارت نشده با محوریت عدم شناخت کافی از منطقه بنیان‌گذاری شدند [۳۹]. ضرورت و نیاز به روشهای نظارت نشده از این واقعیت نشأت می‌گیرد که در بسیاری از کاربردهای واقعی یافتن اطلاعات اولیه بسیار دشوار می‌باشد. زیرا اولاً به دلیل رزولوشن طیفی بالای این تصاویر امکان استخراج سیگنال‌های فراوانی از تصویر فراهم می‌شود که بسیاری از این منابع با اطلاعات اولیه قابل آشکارسازی نیستند و ثانیاً حتی اگر این امکان فراهم بود جمع‌آوری اطلاعات در سطح پوشش داده شده توسط تصاویر فراطیفی از یک منطقه، کاری بسیار سخت و طاقت فرسا می‌باشد، از طرف دیگر همواره کاربردهای مورد انتظار از تصاویر فراطیفی به نحوی نیست که امکان شناخت منطقه را داشته باشیم. به طور کلی می‌توان مساله آشکارسازی اهداف را به وسیله آزمایش فرضیات صفر و یک که شامل دو فرض اساسی به صورت زیر است ارائه نمود [۴۰].

H_0 : وجود زمینه به تنهایی H_1 : وجود زمینه و هدف با هم فرض کنید L باند طیفی وجود داشته باشد، طیف پیکسل مشاهده شده x می‌تواند به صورت $x = [x(\lambda_1), x(\lambda_2), \dots, x(\lambda_L)]$ نمایش داده شود و طبق دو فرض اساسی بیان شده، می‌توان نسبت تشابه (LR) را به صورت رابطه (۱) بیان کرد.

$$L(x) = \frac{P(x|H_1)}{P(x|H_0)} \quad (1)$$

اگر $L(x)$ از مقدار حدآستانه تعیین شده کمتر باشد، فرض اول یعنی عدم حضور هدف و در حالتی که این مقدار از حدآستانه تجاوز کند، شرط وجود هدف پذیرفته می‌شود. کمیت $L(x)$ همراه مقدارآستانه به عنوان یک آشکارساز آماری مطرح می‌شود و اگر توابع چگالی احتمال در معادله فوق کاملاً شناخته شده باشد این آزمایش به عنوان یک آزمایش فرضیات ساده شناخته می‌شود و اگر توابع چگالی احتمال بطور کامل شناخته شده نباشد، با یک آزمایش فرضیات پیچیده روبرو می‌شویم. عموماً تصمیم‌گیری بر اساس مدل‌سازی هدف و پس زمینه و با بردارهای نرمال چندمتغیره انجام می‌گیرد که دارای تابع چگالی احتمال مطابق رابطه (۲) می‌باشد.

$$P(x) = \frac{1}{(2\pi)^{L/2} |\Sigma|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^T \Sigma^{-1}(x-\mu)} \quad (2)$$

که در رابطه فوق $|\Sigma|$ بیانگر دترمینان ماتریس کواریانس و L تعداد باندهای طیفی است و برای آشکارسازی اهداف موجود در تصویر از آزمون فرضیه‌ای به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} H_0: x \sim N(\mu_b, \Sigma_b) & \text{Target Absent} \\ H_1: x \sim N(\mu_t, \Sigma_t) & \text{Target Present} \end{cases} \quad (3)$$

با محاسبه لگاریتم طبیعی رابطه مربوط به نسبت تشابه، آشکارساز کوادراتیکی با رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$D(x) = \frac{1}{2}(x - \mu_b)^T \Sigma_b^{-1}(x - \mu_b) - \frac{1}{2}(x - \mu_t)^T \Sigma_t^{-1}(x - \mu_t) \quad (4)$$

این رابطه نشان‌دهنده فاصله طیفی مشاهده شده و مورد آزمایش، از مراکز یا میانگین‌های دو کلاس هدف و پس‌زمینه می‌باشد و حدآستانه‌ای که برای ارزیابی این فاصله استفاده می‌شود، از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$Pfa = \int_{\eta}^{\infty} P(y|H_0) dy \quad (5)$$

در این رابطه Pfa احتمال خطای نوع اول و η مقدار حدآستانه تعیین شده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید در محاسبه آشکارساز کوادراتیک در رابطه (۴)، بردار میانگین و ماتریس کواریانس هدف و پس‌زمینه مورد نیاز است و نتیجه آشکارسازی هنگامی بهینه می‌شود که هر دو مدل پس‌زمینه و هدف دارای توزیع نرمال چندمتغیره و ماتریس‌های کواریانس مشابه باشند. اما در عمل این پارامترها در دسترس نبوده و باید از داده‌های موجود در تصویر و با استفاده از روابط (۶) و (۷) برآورد شوند.

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \cong \mu_b \quad (6)$$

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x_n - \hat{\mu}][x(n) - \hat{\mu}]^T \cong \hat{\Sigma}_b \quad (7)$$

مشکلی که اغلب در این مورد پیش روی ماست عدم وجود داده کافی برای تعیین بردار میانگین و ماتریس کواریانس هدف می‌باشد که بدین منظور از مشخصه‌های طیفی اهداف با کمک اطلاعات موجود در کتابخانه‌های طیفی و یا میانگین تعداد محدودی از پیکسل‌های هدف شناخته شده در تصویر استفاده می‌گردد.

الگوریتم SVM

ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک روش طبقه‌بندی نظارت شده بر مبنای نظریه یادگیری آماری است [۴۱]. ایده اساسی این طبقه‌بندی‌کننده، یافتن یک ابرصفحه بهینه به عنوان سطح تصمیم‌گیری بوده به طوری که حاشیه بین دو کلاس را بیشینه کند (شکل ۱). فرض کنید k داده آموزشی (x_i, y_i) داشته که x_i بردار ویژگی n بعدی و $y_i \in \{-1, 1\}$ برچسب نمونه‌ها باشد، که مشخص می‌کند هر نمونه به کدام یک از دو کلاس متعلق است. در اینجا هدف یافتن ابرصفحه‌ای است که دو کلاس با برچسب ۱ و -۱ را با بیشترین حاشیه از هم جدا کند. این ابرصفحه را می‌توان با معادله $w \cdot x + b = 0$ بیان کرد، که در این رابطه بردار وزن w برداری عمود بر ابرصفحه و b بردار بایاس است، که به منظور اندازه‌گیری فاصله

درخت پوشای مینیمم به صورت درخت پوشا $T^* = (V, E_{T^*})$ به طوری که مجموع وزن یال های آن کمترین باشد تعریف می گردد (رابطه (۱۰)).

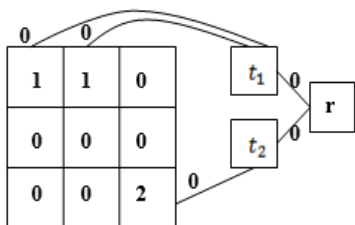
$$T^* \in \operatorname{argmin}_{T \in \mathcal{T}} \left\{ \sum_{e_{ij} \in T} w_{i,j} \right\} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، ST مجموعه تمام درخت های پوشا گراف G هست. از طرف دیگر MSF روی m رأس مجزا $\{t_1, \dots, t_m\}$ شامل پیدا کردن جنگل پوشا $F^* = (V, E_{F^*})$ بوده به طوری که هر درخت مجزا F^* از ریشه t_i رشد یافته و مجموع وزن یال های آن کمترین است (رابطه (۱۱)).

$$F^* \in \operatorname{argmin}_{F \in \mathcal{F}} \left\{ \sum_{e_{ij} \in F} w_{i,j} \right\} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، SF مجموعه تمام جنگل های پوشا G رشد یافته روی ریشه های $\{t_1, \dots, t_m\}$ هست.

برای ایجاد MSF مبتنی بر نشانه ها، ابتدا n رأس $(t_i \ i = 1, \dots, n)$ به گراف اضافه شده، n برابر تعداد رده های مسئله است، سپس از نشانه های کلاس یک به رأس یک، نشانه های کلاس دو به رأس دو و به همین ترتیب نشانه های کلاس n به رأس n یال هایی با وزن صفر ایجاد می شود. در مرحله بعد رأس دیگری مانند r به مجموعه اضافه و از n رأس اضافه شده در مرحله قبل یال هایی با وزن صفر به آن وصل می گردد (شکل (۲)). بعد از ایجاد درخت پوشای مینیمم گراف G و حذف یال های مربوط به رأس r MSF حاصل می شود. در MSF هر درخت روی یکی از n رأس اضافه شده رشد می نماید. در نهایت با اختصاص دادن کلاس هر نشانه به همه پیکسل های رشد یافته از آن، نقشه آشکارسازی طیفی- مکانی حاصل می گردد.



شکل ۲: مثالی از اضافه شدن رؤس t_1 ، t_2 و r به گراف تصویر جهت ساخت MSF روی نشانه های ۱ و ۲، پیکسل های غیر نشانه با عدد صفر نشان داده شده است

Fig. 2: An example of adding vertices t_1 ، t_2 and r to the image graph to make MSF on markers 1 and 2, non-marker pixels are shown with zero number

روش تحقیق

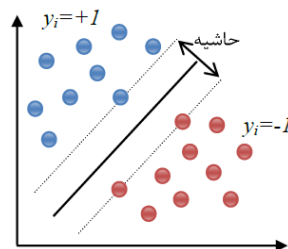
منطقه مورد مطالعه

برای انجام این تحقیق از داده های تصویری سنجنده $CASI$ استفاده شده است. $CASI$ یک سنجنده فراطیفی با قدرت تفکیک طیفی یا حداکثر تعداد باند ۲۲۸ است که البته می توان بنا به نیاز کاربر این تعداد را تغییر داد. باندهای این تصاویر فراطیفی گستره طیفی ۰.۴ تا ۱ میکرومتر را پوشش می دهند. قدرت تفکیک مکانی سنجنده نیز به ارتفاع سکوی حامل، یعنی هواپیما بستگی داشته و از ۱ تا ۱۰ متر می تواند متغیر باشد. تصاویر مورد پردازش در این تحقیق شامل تصویری با ۳۲ باند

ابرفصحه تا مبدا استفاده می شود. در حالتی که داده ها توسط ابرفصحه مذکور از هم جدا شوند، تابع تشخیص با رابطه (۸) بیان می شود.

$$f_{w,b} = \operatorname{sign}(w.x + b) \quad (8)$$

در این رابطه $\operatorname{sign}(\cdot)$ تابع علامت است. اگر ورودی آن بزرگتر یا مساوی صفر باشد، مقدار آن عدد ۱+ و در غیر این صورت تابع مقدار ۱- را بر می گرداند.



شکل ۱: تعیین ابرفصحه جداکننده دو کلاس که به صورت خطی جداپذیر هستند
Fig. 1: Determining the separating hyperplane of two classes that are linearly separable

هدف در مرحله آموزش یافتن مقادیر w و b است به طوری که حاشیه بین دو کلاس بیشینه شود. می توان نشان داد که بیشینه کردن حاشیه بین دو کلاس معادل کمینه سازی نرم بردار وزن است. در این حالت تابع هدف با رابطه (۹) بیان می شود.

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (9)$$

$$\text{subject: } y_i(w.x_i + b) - 1 \geq 0$$

قید موجود در این رابطه تضمین کننده عدم وجود نمونه در حاشیه بین دو کلاس است. با توجه به رابطه (۹) تعیین ابرفصحه در الگوریتم SVM منجر به حل مساله بهینه سازی کوادراتیک مقید می گردد.

الگوریتم MSF مبتنی بر نشانه ها

در این تحقیق از الگوریتم جنگل پوشای مینیمم (MSF) مبتنی بر نشانه ها جهت آشکارسازی تصاویر فراطیفی استفاده شد. در الگوریتم MSF هر پیکسل به صورت یک رأس از گراف $G = (V, E)$ که در آن V و E به ترتیب مجموعه رؤس و یال های گراف هستند، در نظر گرفته می شود، به طوری که هر یال $e_{i,j} \in E$ دو رأس i و j مربوط به پیکسل های همسایگی را به هم وصل می کند. علاوه بر این، هر یال $e_{i,j}$ دارای وزن $w_{i,j}$ بوده که بیانگر عدم تشابه رؤس مربوطه هست. اندازه گیری های عدم تشابه مختلفی مانند نرم های برداری، اندازه گیری زاویه طیفی (SAM) و دیورژانس اطلاعات طیفی (SID) می تواند جهت محاسبه وزن یال ها مورد استفاده قرار گیرد [۴۲]. در این تحقیق از هشت رأس همسایگی و اندازه گیری عدم تشابه SAM جهت محاسبه وزن یال ها، استفاده شد.

با در نظر گرفتن گراف $G = (V, E)$ ، درخت پوشا $T = (V, E_T)$ عبارت است از گرافی متصل و بدون چرخش با $E_T \subset E$ و جنگل پوشا $F = (V, E_F)$ گرافی منفصل و بدون چرخش با $E_F \subset E$ هست. با حذف یک یال از درخت پوشا می توان دو درخت پوشا ایجاد کرد [۲۹]. همچنین

جهت ارزیابی نتایج، بایستی نقشه واقعیت زمینی که در آن نواحی یا پیکسل‌های مربوط به هدف مشخص شده است، تهیه گردد. سپس نتیجه آشکارسازی با آن مقایسه گشته و ماتریس خطا بدست می‌آید. ماتریس خطا به شکل یک جدول توافقی است که اختلاف بین اطلاعات واقعیت زمینی و تصویر آشکارسازی شده را نشان می‌دهد و از طریق تکنیک‌های میان جدولی محاسبه می‌گردد [۴۳]. در مورد آشکارسازی هدف، ماتریس خطایی به صورت جدول (۱) تشکیل می‌شود. در این ماتریس داده‌های واقعی زمینی به صورت سطرها و داده‌های مربوط به نتایج آشکارسازی در ستونهای ماتریس ظاهر می‌شوند. سپس به صورت مقایسه پیکسل به پیکسل پارامترهای آماری این ماتریس محاسبه می‌گردد. تعداد پیکسل‌هایی که به صورت صحیح آشکارسازی شده باشند بر روی قطر اصلی قرار می‌گیرند و عناصر غیر قطری معرف مجموع خطاها می‌باشند.

جدول ۱: ماتریس خطا

Table 1: Confusion matrix

Confusion Matrix	Classified Matrix			sum
	0	1		
True	0	Tn	Fp	Cn
Classes	1	Fn	TP	Cp
	sum	Rn	Rp	N

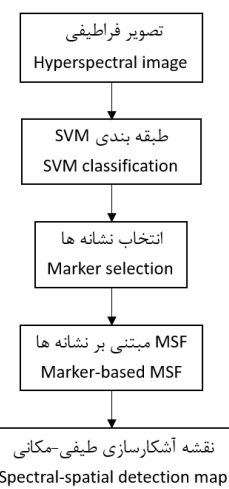
در جدول (۱)، Tn تعداد پیکسل‌های زمینه می‌باشد، که به درستی در داخل کلاس زمینه قرار گرفته است. Tp تعداد پیکسل‌های هدف است که به درستی در داخل کلاس هدف قرار گرفته است. Fp تعداد پیکسل‌های زمینه می‌باشد که به اشتباهی در داخل کلاس هدف قرار می‌گیرد و Fn تعداد پیکسل‌های هدف است که به اشتباهی در داخل کلاس زمینه قرار گرفته است. در ماتریس خطا، خطای omission و commission برای هدف مربوطه تعیین شده سپس معیارهای دقت کلی، ضریب کاپا، نویز و عدم انطباق استخراج می‌شوند [۴۴]. دقت کلی میانگینی از دقت آشکارسازی است که تقسیم مجموع تعداد پیکسل‌های هدف و زمینه‌ای که به درستی آشکارسازی شده‌اند بر کل پیکسل‌ها را نشان می‌دهد. ضریب کاپا دقت آشکارسازی را نسبت به یک آشکارسازی کاملاً تصادفی محاسبه کرده، به این معنی که دقت آشکارسازی را نسبت به حالتی که یک تصویر کاملاً به صورت تصادفی آشکارسازی شده محاسبه می‌کند.

طیفی و قدرت تفکیک ۲ متر هستند که در تاریخ می سال ۲۰۰۱ از منطقه شهری تولوز واقع در جنوب فرانسه برداشت شده است. از این تصاویر، مناطق مختلفی که شامل اهداف مورد نیاز برای شناسایی بود، انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۳) ترکیب رنگی کاذب از یک منطقه، شامل ۱۲۸ در ۱۲۸ پیکسل را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی کمی و محاسبه ماتریس خطا، با انجام تفسیر بصری دقیق و مشاهده طیف مواد مختلف، نقشه واقعیت زمینی منطقه حاوی پیکسل‌های متعلق به کلاس هدف یعنی بام‌های ساختمانی استخراج شد. همچنین منحنی طیفی آن، به وسیله میانگین‌گیری از طیف پیکسل‌های انتخاب شده به صورت دستی ایجاد شد.

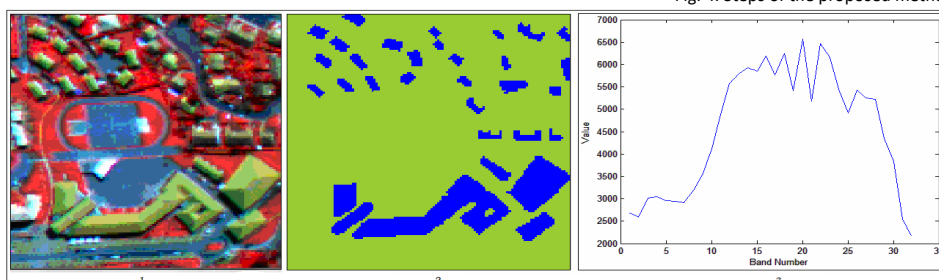
روش شناسی

این پژوهش از نوع توسعه‌ای، کاربردی و مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی‌های میدانی است. در این تحقیق به آشکارسازی طیفی-مکانی تصاویر فراطیفی جهت آشکارسازی ساختمان‌های با پوشش خاص در مناطق شهری پرداخته می‌شود. شکل (۴) مراحل روش پیشنهادی را نشان داده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد، ابتدا جهت انتخاب نشانه‌ها از نقشه طبقه‌بندی SVM استفاده و پیکسل‌های با درجه تعلق بالا به یک کلاس به‌عنوان نشانه انتخاب می‌شوند. سپس بر روی نشانه‌های به‌دست‌آمده الگوریتم MSF اعمال می‌گردد.



شکل ۴: مراحل روش پیشنهادی

Fig. 4: Steps of the proposed method



شکل ۳: (۱) ترکیب رنگی- کاذب تصویر CASI (R=0.914, G=0.620, B=0.451 میکرومتر)، (۲) داده‌های جمع آوری شده به منظور ارزیابی کمی-کیفی (۳) منحنی طیفی مربوط به پشت‌بام ساختمان‌ها

Fig. 3: (1) false-color combination of CASI image (R=0.914, G=0.620, B=0.451 micrometers), (2) data collected for quantitative-quality evaluation (3) spectral curve related to the building's roof

کوچک یعنی کمتر از ۲۰ پیکسل، پیکسل‌های با درجه احتمال بیشتر از یک حد آستانه به‌عنوان پیکسل‌های نشانه انتخاب گردید. حد آستانه انتخابی برابر با کمترین احتمال در بین ۲ درصد از بیشترین احتمالات کل تصویر هست [۴۲].

روش پیشنهادی بیان شده با الگوریتم‌های آشکارسازی طیفی SAM، MF و SVM مقایسه گردید. شکل (۶) نقشه‌های آشکارسازی حاصل از اعمال روش‌های فوق را نشان می‌دهد.

تصاویر دودویی بام ساختمان‌ها در شکل (۶)، با انتخاب یک حد آستانه مناسب به دست آمده است. جهت تعیین حد آستانه بهینه بایستی با ایجاد ماتریس خطا و سپس تشکیل منحنی‌های ROC به این هدف رسید. بدین صورت که با در نظر گرفتن ۱۰۰۰ عدد به‌عنوان حد آستانه در بازه صفر تا یک، ماتریس خطای مربوط به هر حد آستانه را تشکیل داده، سپس مقدار ضریب کاپا را برای هر ماتریس خطا محاسبه نمود. مقدار ماکزیمم ضریب کاپا، حد آستانه بهینه را مشخص می‌کند. در واقع منحنی‌های ROC نتایج آشکارسازی تصویر را برای حد آستانه‌های مختلف با اطلاعات واقعیت زمینی مقایسه می‌کند.

جدول (۲) و شکل (۷) مقادیر پارامترهای دقت کلی، ضریب کاپا، نویز و عدم انطباق چهار الگوریتم پیاده‌سازی شده بر روی تصویر اولیه را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که از جدول (۲) مشخص است به کارگیری همزمان اطلاعات طیفی و مکانی در الگوریتم MSF باعث افزایش دقت آشکارسازی شده است که این افزایش در پارامتر دقت کلی به ترتیب حدود ۱۹، ۱۶ و ۸ درصد نسبت به الگوریتم‌های SAM، MF و SVM هست. نتایج بدست آمده اهمیت استفاده از اطلاعات مکانی در عملیات آشکارسازی را نشان می‌دهد. از آنجا که نقشه واقعیت زمینی برای تمامی الگوریتم‌ها یکی بوده است می‌توان نتیجه گرفت اختلاف صحت مشاهده شده ناشی از عملکرد الگوریتم بوده است. از سوی دیگر علت عدم کسب ۱۰۰٪ به صحت نقشه واقعیت زمینی و توانایی الگوریتم آشکارسازی مورد استفاده برمی‌گردد.

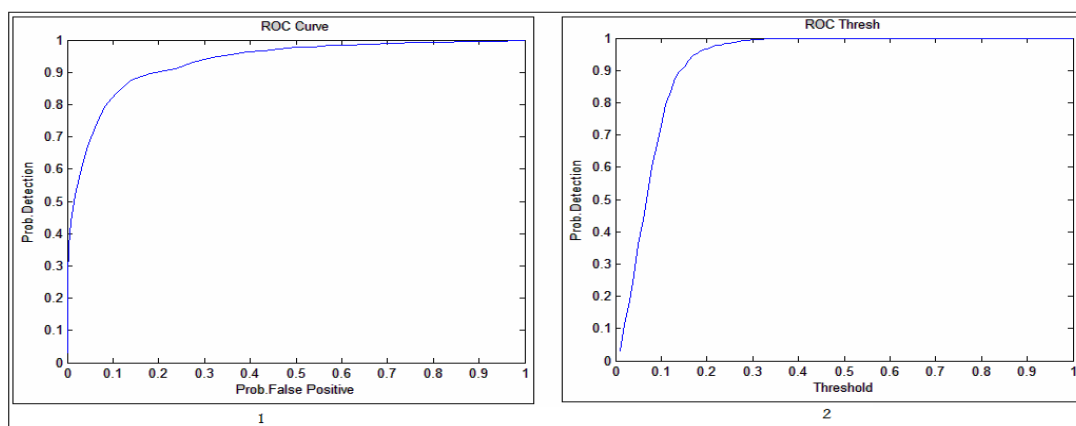
نویز تقسیم مجموع تعداد پیکسل‌های هدف و زمینه‌ای که به اشتباهی طبقه‌بندی شده است بر کل پیکسل‌ها را نشان می‌دهد. عدم انطباق نیز از تقسیم تعداد پیکسل‌های هدف که به اشتباهی در داخل کلاس زمینه قرار گرفته است بر کل پیکسل‌های تصویر بدست می‌آید.

برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها و صحت تصمیم‌گیری آن‌ها در آشکارسازی هدف، علاوه بر ماتریس خطا از منحنی ROC که فراوانی خطای آشکارسازی را روی داده‌های چک نشان می‌دهد استفاده شده است [۴۵]. این منحنی بر اساس مفاهیم احتمال توان آشکارسازی یا احتمال مثبت و احتمال تشخیص اشتباه ترسیم می‌شود. منحنی ROC نتایج آشکارسازی تصویر را برای حد آستانه‌های مختلف با اطلاعات واقعیت زمینی مقایسه می‌کند. در عمل تعدادی حد آستانه بین کمترین و بیشترین مقدار اطلاعات واقعی در نظر می‌گیرند، سپس برای هر حد آستانه می‌توان دو منحنی ROC در نظر گرفت، یک منحنی احتمال آشکارسازی در برابر احتمال تشخیص اشتباه و نیز یک منحنی احتمال آشکارسازی در برابر حد آستانه را نشان می‌دهد (شکل (۵))

خروجی (تصویر سهم) را می‌توان با در نظر گرفتن مقداری برای احتمال تشخیص اشتباه و با انتخاب یک حد آستانه مناسب از طریق منحنی‌های ROC به تصویری دودویی تبدیل کرد.

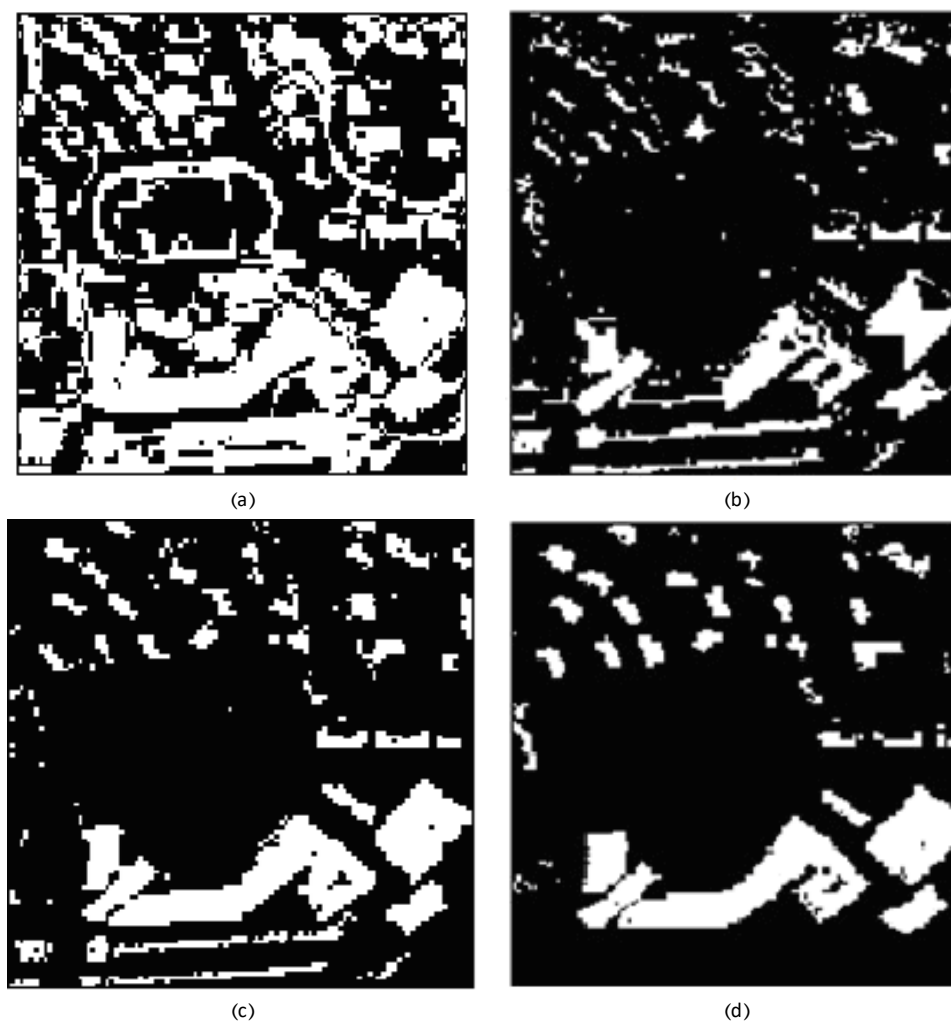
نتایج و بحث

در این تحقیق برای انتخاب نشانه‌ها از نقشه طبقه‌بندی SVM و کرنل پایه شعاعی گوسین استفاده شد [۴۶]. مقادیر دو پارامتر تنبیه (C) و کرنل گوسین (γ) در الگوریتم SVM به کمک تکنیک ارزیابی عرضی تعیین گردید. مقادیر پارامترهای فوق برابر با $C=128$ و $\gamma=0.02$ بدست آمد. سپس آنالیز برچسب‌گذاری مولفه‌های متصل بر اساس ۸ پیکسل همسایگی بر روی نقشه طبقه‌بندی SVM انجام گرفت و برای نواحی با بیشتر از ۲۰ پیکسل، ۵ درصد از پیکسل‌های با بیشترین احتمال تعلق به یک کلاس به‌عنوان پیکسل‌های نشانه انتخاب شد. برای نواحی



شکل ۵: (۱) منحنی احتمال آشکارسازی در برابر احتمال تشخیص اشتباه (۲) منحنی احتمال آشکارسازی در برابر حد آستانه

Fig. 5: (1) Detection probability curve against false probability curve (2) Detection probability curve against threshold

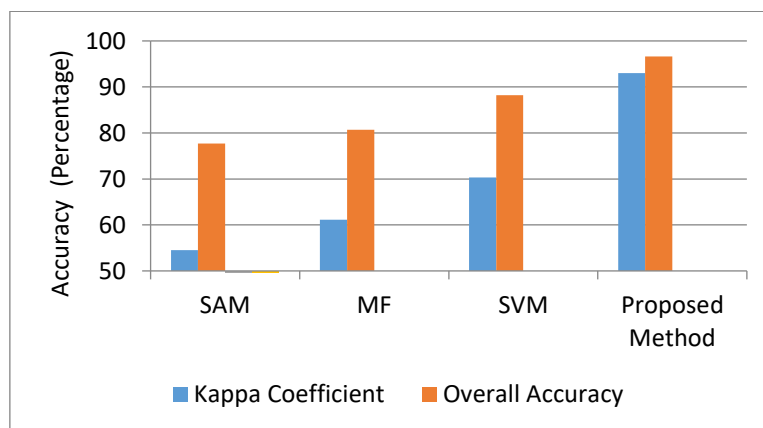


شکل ۶: تصاویر حاصله از اعمال الگوریتم‌های (a) SAM، (b) MF، (c) SVM و (d) روش پیشنهادی
 Fig. 6: Images resulting from the application of (a) SAM, (b) MF, (c) SVM and (d) proposed method algorithms

جدول ۲: ارزیابی دقت

Table 2: Accuracy assessment

عدم انطباق Non-conformity	نویز Noise	ضریب کاپا Kappa coefficient	دقت کلی Overall accuracy	
2.3	25.5	54.5	77.7	SAM
3.3	18.1	61.1	80.7	MF
1.3	12.9	70.3	88.2	SVM
3.7	2.1	93.0	96.6	روش پیشنهادی (Proposed method)



شکل ۷: مقادیر پارامترهای دقت کلی و ضریب کاپا برای روش‌های آشکارسازی به کار گرفته شده
 Fig. 7: Values of overall accuracy parameters and Kappa coefficient for the used detection methods

منابع و مأخذ

- [1] Bhattacharya BK, Green RO, Rao S, Saxena M, Sharma S, Kumar KA, et al. An overview of AVIRIS-NG airborne hyperspectral science campaign over India. *Curr. Sci.* 2019; 116: 1082–1088.
- [2] Chang C-I, Heinz DC. Constrained Subpixel Target Detection for Remotely Sensed Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2000; 38(3): 1144–1159. <https://doi.org/10.1109/36.843007>
- [3] Dos Reis Salles R, Souza Filho CR, Cudahy T, Vicente LE, Monteiro LVS. Hyperspectral remote sensing applied to uranium exploration: A case study at the Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal U-REE deposit, NW, Queensland, Australia. *J. Geochem. Explor.* 2017; 179: 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.002>
- [4] Mobasher MR, Gholami N, Farajzadeh Asl M. [Upgrading MODIS Cloud Detection Algorithm Using ASTER Simultaneous Image, Case Study: Damghan]. *Planning and Space Amayesh*. 2010; 15(2): 81–99. [In Persian]
- [5] Alimohammadi A, Shamsodini A, Ziaei P. [Comparison of spectral and spatial performance of image composition methods in the power difference of different resolutions of multispectral and panchromatic images: Tehran]. *Planning and Space Amayesh*. 2008; 12(2): 119–137. [In Persian]
- [6] Ghasemian Yazdi MH, Elyasi M. [Integration of Spatial Information of Icon Image and Spectral Information of Spot 4 Images]. *Planning and Space Amayesh*. 2009; 14(1): 57–81. [In Persian]
- [7] Landgrebe D. Some Fundamentals and methods for hyperspectral image Data Analysis. SPIE Int. Symp. On Biomedical Optics (Photonics West), San Jose CA, Proc. SPIE. 1999; 3603: 104–113. <https://doi.org/10.1117/12.346731>
- [8] Ren S, He K, Girshick R. Faster r-cnn: towards real time object detection with region proposal networks. *IEEE Trans Pattern Anal.* 2017; 39: 1137–1149. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.01497>
- [9] Carvalho OA, Meneses PR. Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM). Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF: 2002: Brasil, 1–9.
- [10] Chang C-I. Hyperspectral Imaging: Techniques for spectral Detection and Classification, Orlando, FL: 2003: Kluwer Academic, 1–370. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6>
- [11] Jang J-SR. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1993; 23(3): 665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- [12] Cheng G, Han J. A survey on object detection in optical remote sensing images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2016; 117: 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.014>

نتیجه‌گیری

با ظهور فن‌آوری‌های نوین در سنجنده‌ها و روش‌های برداشت داده‌های سنجش از دور فراطیفی، داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی زیاد به عنوان منابع با ارزشی جهت آشکارسازی و تشخیص عوارض موجود، مورد توجه قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های مختلفی، بر پایه‌ی دیدگاه‌های گوناگون برای استخراج اطلاعات از این داده‌ها پیشنهاد شده است. همچنین روش‌های مختلفی برای بهبود نتایج این الگوریتم‌ها توسعه پیدا کرده‌اند. با این حال مشکلات مطرح در روش‌های مبتنی بر پیکسل موجب گردیده که استفاده از روش‌های طیفی-مکانی در دهه‌های اخیر از اهمیت شایان توجهی برخوردار گردد. استفاده از اطلاعات مکانی به خصوص در مورد تصاویر اخذ شده از مناطق شهری که در آن‌ها چندین پیکسل مجاور به یک کلاس یا عارضه یکسان تعلق دارند، می‌تواند باعث بهبود دقت در آشکارسازی شود. در این تحقیق استراتژی اطلاعات مکانی در کنار اطلاعات طیفی جهت بهبود آشکارسازی هدف در آنالیز تصاویر فراطیفی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از الگوریتم طیفی-مکانی MSF مبتنی بر نشانه که در فرآیند طبقه‌بندی تصاویر استفاده می‌شود، جهت آشکارسازی بام ساختمان‌ها استفاده شد. روش پیشنهادی بر روی تصویر فراطیفی CASI پیاده‌سازی گردید و آزمایش‌ها برتری کمی و کیفی الگوریتم MSF مبتنی بر نشانه در مقایسه با الگوریتم‌های MF، SAM و SVM را نشان می‌دهد و باعث افزایش ضریب کاپا به میزان ۳۸، ۳۲ و ۲۳ درصد در مقایسه با MF، SAM و SVM به ترتیب شده است که این موضوع اهمیت به کارگیری اطلاعات مکانی در فرآیند آشکارسازی را نشان می‌دهد درحالی‌که الگوریتم‌های MF، SAM و SVM جهت آشکارسازی فقط نیاز به اطلاعات طیفی هدف موردنظر دارند. در نظر است در تحقیقات آتی از میزان خطای موجود در آشکارسازی طیفی مکانی هدف کاسته شود. شرایط ایجاد پیکسل‌های مختلط مانند هم‌پوشانی پدیده‌های زمینی و ناهمگن بودن اکثر پدیده‌ها، و در نتیجه افزایش واریانس داخلی هدف موجب افزایش خطای آشکارسازی در تصاویر فراطیفی می‌شود. از این‌رو سعی بر این است که بتوان با استفاده از روش‌های مختلف خطاهای فوق را کم نمود.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه زابل (IR-UOZ-GR-4685) به دلیل حمایت مالی صورت گرفته در انجام این تحقیق تشکر می‌نمایند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

- SVMs and morphological profiles. *IEEE Trans. Geos. And Remote Sens.* 2008; 46(11): 3804–3814.
- [26] Pesaresi M, Benediktsson JA. A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery. *IEEE Trans. Geos. And Remote Sens.* 2001 ; 39(2): 309–320.
<https://doi.org/10.1109/36.905239>
- [27] Jain R, Kasturi R, Schunck BG. Machine Vision. McGraw-Hill series in Computer Science., McGraw-Hill, Inc, 1995; 1-549.
- [28] Soille P. Morphological Image Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2006; 28(5): 673-683.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.99>
- [29] Tarabalka Y, Chanussot J, Benediktsson JA. Segmentation and classification of hyperspectral images using minimum spanning forest grown from automatically selected markers. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.* 2010; 40: 1267–1279.
<https://doi.org/10.1109/TSMCB.2009.2037132>
- [30] Chang C-I, Chiang S-S. Anomaly Detection and Classification for Hyperspectral Imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* 2002; 40(6): 1314-1325.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.800280>
- [31] Homayouni S, Roux M. Hyperspectral image analysis for material mapping using spectral matching, ISPRS04-Istanbul, GET: 2005: Telecom Paris, UMR 5141 LTCI, Department TSI, 46 rue Barrault, 75013 Paris, France.
- [32] Emami H, Afary A. Subpixel Classification on the Hyperspectral Images for Accuracy Improvement of Classification Results, Dep. of Geodesy and Geomatic Eng, K.N. Toosi University of Technology, Tehran-Iran; 2007.
- [33] Freitas S, Silva H, Almeida JM, Silva E. Convolutional neural network target detection in hyperspectral imaging for maritime surveillance. *International Journal of Advanced Robotic Systems.* 2019; 1-13.
- [34] Jha SS, Nidamanuri RR. Gudalur Spectral Target Detection (GST-D): A New Benchmark Dataset and Engineered Material Target Detection in Multi-Platform Remote Sensing Data. *remote sensing.* 2020; 12: 2145.
<https://doi.org/10.3390/rs12132145>
- [35] Akbari D, Safari AR, Homayouni S. [A Combination of Spectral-Spatial Detection Methods of Hyperspectral Images for the Better Separation of Special Buildings' Roofs in Urban Area]. *Journal of Geomatics Science and Technology.* 2014; 4(2): 1–10. [In Persian]
- [36] Hou Y, Zhang Y, Yao L, Liu X, Wang F. Mineral target detection based on MSCPE_BSE in hyperspectral image. the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016; 1614–1617.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729412>
- [37] Zhang X, Nansen C, Aryamanesh, N. Importance of spatial and spectral data reduction in the detection of internal defects in food products. *Appl Spectrosc.* 2015; 69(4): 473–480.
- [13] Freitas S, Silva H, Almeida J. Hyperspectral imaging for real-time unmanned aerial vehicle maritime target detection. *J Intell Robot Syst.* 2018; 90(3): 551–570.
<https://doi.org/10.1007/s10846-017-0689-0>
- [14] Frolov D, Smith RB. Locally Adaptive Constrained Energy minimization for AVIRIS image. Eighth JPL Airborne Earth Science (AVIRS): 1999.
<http://www.microimages.com/papers/>.
- [15] Kanjir U, Greidanus H, Oštir K. Vessel detection and classification from space borne optical images: A literature survey. *Remote Sens. Environ.* 2018; 207: 1–26.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.033>
- [16] Yadav D, Arora MK, Tiwari KC, Ghosh JK. Parameters affecting target detection in VNIR and SWIR range. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 2018; 21: 325–333.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.08.004>
- [17] Carleer AP, Wolff E. Urban land cover multi-level region-based classification of VHR data by selecting relevant features. *International Journal of Remote Sensing.* 2006; 27(6):1035-1051.
<https://doi.org/10.1080/01431160500297956>
- [18] Bauer Th, Steinnocher K. Per-parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique. *GeoBIT/GIS.* 2001; 24–27.
- [19] Frauman E, Wolff E. Segmentation of Very High Spatial Resolution Satellite Images in Urban Areas for Segments-Based Classification. Proceedings of the 5th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, Tempe, Arizona, USA, 2005; 1-4.
- [20] Batista MH, Haertel V. On the classification of remotes sensing high spatial resolution image data. *International Journal Remote Sensing.* 2010; 31: 5333–5548.
<https://doi.org/10.1080/01431160903485786>
- [21] Benz UC, Hofmann P, Willhauck G, Lingenfelder I, Heynen, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 2004; 58: 239– 258.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjrs.2003.10.002>
- [22] Frohn RC, Chaudhary N. Multi-scale image segmentation and object-oriented processing for land cover classification. *GIScience & Remote Sensing.* 2008; 45: 377-391.
<https://doi.org/10.2747/1548-1603.45.4.377>
- [23] Frohn RC, Reif M, Lane CR, Autrey, BC. Satellite remote sensing of isolated wetlands using object-oriented classification of LANDSAT-7 data. *The Society of Wetland Scientists, McLean.* 2009; 29(3):931-941.
<https://doi.org/10.1672/08-194.1>
- [24] Fauvel M. *Spectral and Spatial Methods for the Classification of Urban Remote Sensing Data* [dissertation]. Grenoble Institute of Technology; 2007.
- [25] Fauvel M, Chanussot J, Benediktsson JA, Sveinsson JR. Spectral and spatial classification of hyperspectral data using

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



داود اکبری دانشیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه زابل می‌باشند. ایشان مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری-سنجش از دور بترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۵ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. در حال حاضر ایشان بیش از ۱۰۰ مقاله علمی

در مجلات و کنفرانس‌های علمی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری بیش از ۴۰ مجله و کنفرانس علمی ملی و بین‌المللی فعالیت داشته‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: پردازش تصاویر فراطیفی، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و سیستم اطلاعات مکانی.

Akbari, D. Associate Professor at the Department of Surveying Engineering, Faculty of Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

✉ davoodakbari@uoz.ac.ir



محمد اکبری دانشیار گروه مهندسی عمران در دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند می‌باشند. ایشان مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری-GIS بترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۴ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. وی

تاکنون موفق به چاپ بیش از ۱۰۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی شده‌اند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: سیستم اطلاعات مکانی، هوش مصنوعی، توسعه کاربردهای سنجش از دور و پردازش تصویر.

Akbari, M. Associate Professor at the Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

✉ moakbari@birjand.ac.ir

<https://doi.org/10.1366/14-07672>

[38] Akbari D, Saadatseresht M, Homayouni S. Hyperspectral Detection Improvement by using Spectral-Spatial feature, the Map Asia 2008 Conference: 2008: Kuala Lumpur, Malaysia.

[39] Akbari D, Saadatseresht M, Homayouni, S. Evaluation and performance of Pattern Recognition Methods in Hyperspectral Image Data. *Geomatic 87 Conference: 2008: National Cartographic Center of Iran, Tehran, Iran.* (In Persian)

[40] Nasrabadi NM. Regularized Spectral Matched Filter for Target Recognition in Hyperspectral Imagery. *SPLetters*. 2008; 1: 317-320.

[41] Vapnik V. The nature of statistical learning theory, Springer Verlag. 2000; 1-314.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3264-1>

[42] Van der Meer F. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery. *Int. J. Appl. Earth Observation Geoinformation*. 2006; 8(1): 3-17.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.06.001>

[43] Homayouni S, Roux M. Material Mapping from Hyperspectral Images using Spectral Matching in Urban Area, IEEE Workshop on Advances in Techniques for analysis of Remotely Sensed Data: 2003: NASA Goddard center, Washington DC, USA.

[44] Rosenfield GH, Fitzpatrick-Lins K. A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1986; 52(2): 223-227.

[45] Bradley AP. The use of the area under the ROC Curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*. 1997; 30(7): 1145-1159.
[https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00142-2)

[46] Cristianini N, Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods, Cambridge University Press: 2000.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511801389>

Citation (Vancouver): Akbari D, Akbari M. [Hyperspectral Building Detection with Special Roofing in Urban Area using Remote Sensing Technology]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 265-276

<https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11226.1082>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Analysis and classification of land use using aerial imagery and deep learning based on U-Net architecture

M. Farhangi[†], A. Milan^{*}, S. Sadeghian

Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 07 September 2024
 Reviewed: 01 October 2024
 Revised: 16 October 2024
 Accepted: 18 November 2024

KEYWORDS:

Land use classification
 Aerial imagery
 Deep learning
 Convolutional neural network
 U-Net

* Corresponding author

✉ a_milan@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932456

Background and Objectives: Accurate land use classification is essential for effective natural resource management, urban planning, precision agriculture, and environmental monitoring. Such classification helps predict and prevent environmental issues. Methods like high-resolution satellite and aerial imagery, GIS, and deep learning techniques, including Convolutional Neural Networks (CNN) and the U-Net architecture, offer high precision in analyzing and classifying aerial images. The U-Net network, known for its unique structure, excels in defining land use boundaries. This study focuses on a region in Poland, using the U-Net model to enhance classification accuracy and efficiency through regularization techniques and the Adam optimizer.

Methods: This research used high-resolution aerial images and a deep learning model based on the U-Net architecture to achieve precise land use classification. The approach aimed at improving classification accuracy across four land use categories. High-resolution aerial images were collected, corrected geometrically and radiometrically to create orthophotos. These images were labeled and cropped to 256x256 pixels, with data augmentation techniques such as rotation and flipping applied. The dataset was divided into training (75%), validation (25%), and testing (5% of the validation set). The U-Net model includes convolutional blocks with 3x3 kernels, normalization layers, and dropout layers, organized into encoding, decoding, and output layers. Hyperparameters included the Adam optimizer, a learning rate of 0.0001, and a batch size of 16. Model performance was evaluated using metrics like overall accuracy, kappa coefficient, and Jaccard score.

Findings: The algorithm was tested on data from Poznań, Poland, utilizing high-resolution aerial images from 2021 with a 25 cm spatial resolution. The data, labeled by experts, covered four land use types: buildings, forests, roads, and water. Out of 769 labeled images, 576 were used for training (expanded to 2304 samples after augmentation), 183 for validation, and 10 for testing. The model, developed using Python and Keras on TensorFlow and trained in Google Colab, achieved high accuracy after 96 iterations, validated against expert-labeled maps. While the U-Net model performed well in general classification, it encountered challenges with rare classes like water. Data augmentation and more samples for such classes could improve accuracy. The training and validation accuracy reached 0.95 and 0.85, respectively, with validation errors stabilizing around 0.5. The U-Net model demonstrated significant improvements in accuracy, kappa coefficient, and Jaccard index compared to previous studies, underscoring the importance of high-quality data and precise parameter tuning.

Conclusion: The study assessed the U-Net deep learning model for accurate land use classification using aerial images. Results indicate that the model effectively identified and differentiated between land use types with high precision. The U-Net structure achieved an overall accuracy of 92.47%, a Jaccard index of 54.45%, and a kappa coefficient of 79.59%. These results demonstrate the model's strong capability in defining class boundaries. Future improvements could involve utilizing multispectral and hyperspectral images for more detailed information, combining U-Net with other networks like ANN, optimizing hyperparameters with advanced search methods, and employing transfer learning, especially with limited training data. Implementing these strategies could enhance accuracy and efficiency in land use classification, with broader applications in scientific and practical fields.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

7



NUMBER OF TABLES

5

مقاله پژوهشی

تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از تصاویر هوایی و یادگیری عمیق مبتنی بر معماری U-Net

مهدی فرهنگی، اصغر میلان*، سعید صادقیان

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی برای مدیریت مؤثر منابع طبیعی، برنامه‌ریزی شهری، کشاورزی دقیق و پایش محیط زیست ضروری است. طبقه‌بندی به پیش‌بینی و پیش‌گیری از مشکلات زیست‌محیطی کمک می‌کند. روش‌هایی مانند تصاویر ماهواره‌ای و هوایی با وضوح بالا، GIS و تکنیک‌های یادگیری عمیق از جمله شبکه‌های عصبی کانولوشنال (CNN) و معماری U-Net دقت بالایی در تحلیل و طبقه‌بندی تصاویر هوایی ارائه می‌دهند. شبکه U-Net با ساختار منحصر به فرد خود در تعریف مرزهای کاربری اراضی برتری دارد. این مطالعه بر روی منطقه‌ای در لهستان تمرکز دارد و از مدل U-Net برای افزایش دقت و کارایی طبقه‌بندی از طریق تکنیک‌های منظم‌سازی و بهینه‌سازی Adam استفاده می‌کند.

روش‌ها: در این تحقیق از تصاویر هوایی با قدرت تفکیک ۲۵ سانتی‌متر و در باند مرئی برای تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی استفاده شده است. مدل U-Net به دلیل معماری خاص خود، شامل بلوک‌های کانولوشن و فعال‌سازی ReLU، برای استخراج ویژگی‌های مکانی دقیق و حفظ جزئیات تصویر انتخاب شد. به منظور افزایش دقت و جلوگیری از بیش‌برازش، از تکنیک‌های منظم‌سازی مانند حذف تصادفی (Dropout) و Regularization L2 بهره گرفته شد. همچنین، برای بهبود همگرایی مدل، روش‌های افزون‌سازی داده و تکنیک توقف زود هنگام (Early Stopping) به کار رفته است. تصاویر هوایی به قطعات کوچک‌تر با ابعاد ۲۵۶×۲۵۶ پیکسل تقسیم و به سه مجموعه آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شدند.

یافته‌ها: الگوریتم U-Net بر روی داده‌های شهر پوزنان در کشور لهستان اعمال شد. این داده‌ها توسط کارشناسان برچسب‌گذاری شدند و شامل چهار نوع کاربری اراضی: ساختمان‌ها، جنگل‌ها، جاده‌ها و آب هستند. از ۷۶۹ تصویر برچسب‌گذاری شده، ۵۷۶ تصویر برای آموزش مدل (که پس از تکنیک افزون‌سازی داده به ۲۳۰۴ تصویر گسترش یافت)، ۱۸۳ تصویر برای اعتبارسنجی و ۱۰ تصویر نیز برای آزمایش استفاده شد. این مدل، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه Keras بر بستر TensorFlow توسعه یافته و در Google Colab آموزش داده شد و پس از ۹۶ تکرار به دقت بالایی رسید و با نقشه‌های برچسب‌گذاری شده توسط کارشناسان اعتبارسنجی شد. در حالی که مدل U-Net در دسته‌بندی کلی عملکرد خوبی داشت، با چالش‌هایی در کلاس‌های نادر مانند آب مواجه شد. افزایش داده‌ها و نمونه‌های بیشتر برای این کلاس‌ها می‌تواند دقت را بهبود بخشد. دقت‌های آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب به ۰.۹۵ و ۰.۸۵ رسید و خطای اعتبارسنجی در حدود ۰.۵ تثبیت شد. مدل U-Net بهبودهای قابل توجهی در دقت کلی، ضریب کاپا و امتیاز ژاکارد نسبت به مطالعات قبلی نشان داد که حاکی از اهمیت داده‌های با کیفیت و تنظیم دقیق پارامترها است.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه، مدل یادگیری عمیق U-Net، برای دسته‌بندی دقیق کاربری اراضی با استفاده از تصاویر هوایی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این مدل به طور مؤثر انواع کاربری اراضی را با دقت بالا شناسایی و تفکیک کرده است. ساختار U-Net دقت کلی ۹۲.۴۷٪، امتیاز ژاکارد ۵۴.۴۵٪ و ضریب کاپا ۷۹.۵۹٪ را به دست آورد. این نتایج توانایی قوی مدل را در تعریف مرزهای کلاس‌ها نشان می‌دهد. بهبودهای آینده می‌تواند شامل استفاده از تصاویر چند طیفی و فراطیفی برای اطلاعات دقیق‌تر، ترکیب U-Net با سایر شبکه‌ها مانند ANN، بهینه‌سازی فرآیندها با استفاده از روش‌های جستجوی پیشرفته و به‌کارگیری یادگیری انتقالی، به ویژه در شرایط با داده‌های محدود باشد. اجرای این استراتژی‌ها می‌تواند دقت و کارایی در دسته‌بندی کاربری اراضی را افزایش دهد و کاربردهای وسیع‌تری در زمینه‌های علمی و عملی ارائه دهد.

تاریخ دریافت: ۱۷ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۱۰ مهر ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۵ مهر ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۲۸ آبان ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

طبقه‌بندی کاربری اراضی
تصاویر هوایی
یادگیری عمیق
شبکه عصبی کانولوشنی

* نویسنده مسئول

a_milan@sbu.ac.ir

۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۵۶ ①

مقدمه

امروزه، طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی نقشی حیاتی در طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها از جمله مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی شهری، کشاورزی دقیق و نظارت بر محیط زیست ایفا نموده و شناسایی دقیق کاربری اراضی نقشی اساسی در مدیریت پایدار منابع طبیعی دارا می‌باشد [۱]. این اطلاعات، کمک می‌کنند تا بتوان مسائل نظیر کاهش مساحت زمین‌های کشاورزی، جنگل‌زدایی و خسارات محیط‌زیستی را پیش‌بینی و از آنها پیشگیری نمود [۲]. به علاوه، شناخت دقیق کاربری اراضی باعث بهبود مدیریت منابع در دسترس و بهینه‌سازی در استفاده از منابع نظیر آب و کود شده و در تعیین مناطق مختلف مسکونی، تجاری، صنعتی و فضای سبز به برنامه‌ریزان کمک می‌نماید تا برنامه‌های توسعه شهری را بر اساس نیازها و منابع موجود بهینه‌سازی کنند [۳]. در نهایت، شناخت مناطق حساس محیط‌زیستی نظیر مناطق حفاظت‌شده و آبخیزها می‌تواند به حفظ و حفاظت از محیط‌زیست کمک نماید و از تخریب این مناطق جلوگیری کند [۴]. برای تعیین کاربری اراضی، از منابع و روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که هر کدام ویژگی‌ها و مزایای خاص خود را دارند.

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و هوایی با وضوح بالا از جمله ابزارهای مهم در تحلیل کاربری اراضی است [۵]. این تصاویر اطلاعات دقیقی از وضعیت فعلی اراضی را فراهم نموده و به تحلیل تغییرات زمانی و مکانی در این کاربری‌ها کمک می‌کنند [۶]. با این حال، استخراج اطلاعات دقیق از تصاویر هوایی، به ویژه در مناطقی با تنوع کاربری بالا، چالش‌برانگیز است [۷]. سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) یکی دیگر از ابزارهای موثر در تعیین کاربری اراضی هستند که با استفاده از آنها، داده‌های مکانی و آماری از منابع مختلف نظیر سنجش از دور، نقشه‌های جغرافیایی و داده‌های زمین‌شناسی، می‌توانند به طور دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اطلاعات دقیقی از وضعیت و کاربری اراضی ارائه دهند. باید به این نکته توجه نمود که مطالعات میدانی اهمیت زیادی در تحلیل کاربری اراضی دارند، این مطالعات شامل نمونه‌برداری از خاک و گیاهان، اندازه‌گیری عمق آب‌های زیرزمینی و داده‌های زمین‌شناسی می‌شوند که با انجام آنها می‌توان به تحلیل دقیقی از وضعیت اکولوژیک و استفاده از اراضی پرداخت. همچنین مدل‌های آماری و ریاضی ابزارهای مؤثری برای تحلیل کاربری اراضی هستند، این مدل‌ها شامل استفاده از مدل‌های آماری مانند تحلیل عاملی و خوشه‌بندی، مدل‌های ریاضی مانند مدل‌های مفهومی و شبکه‌های بیزی برای پیش‌بینی و تحلیل کاربری اراضی می‌باشند که با ارائه مدل‌های تحلیلی دقیق به مدیران و تصمیم‌گیران کمک می‌کنند. استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق و هوش مصنوعی هم به عنوان یکی از روش‌های نوین در تحلیل کاربری اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تکنیک‌ها از شبکه‌های عصبی عمیق برای تحلیل تصاویر هوایی و ماهواره‌ای و استخراج ویژگی‌های پیچیده استفاده می‌کنند که به تحلیل دقیق‌تری از وضعیت کاربری اراضی کمک می‌کنند. این روش‌ها با ترکیب و استفاده موازی، می‌توانند

به تحلیل جامع و دقیقی از کاربری اراضی در مقیاس‌های مختلف مانند شهری، روستایی و محیط‌های طبیعی کمک کنند و اطلاعات مفیدی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی فراهم آورند. طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از یادگیری عمیق به دلیل دقت بالا و توانایی پردازش حجم زیادی از داده‌ها، به عنوان یک رویکرد مؤثر و پیشرفته در این حوزه شناخته شده است. در این روش، از شبکه‌های عصبی عمیق برای تحلیل تصاویر هوایی و ماهواره‌ای استفاده می‌شود که ساختارهای مختلفی دارند و هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند [۸]. در ادامه، به توضیح برخی از مهم‌ترین ساختارهای یادگیری عمیق برای طبقه‌بندی کاربری اراضی پرداخته می‌شود. شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) یکی از رایج‌ترین و موفق‌ترین ساختارهای یادگیری عمیق در تحلیل تصاویر هستند. این شبکه‌ها با استفاده از لایه‌های کانولوشنی، توانایی استخراج ویژگی‌های مکانی از تصاویر را دارند. CNNها برای طبقه‌بندی تصاویر هوایی و شناسایی الگوهای مختلف کاربری اراضی بسیار مؤثر هستند. شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) نیز در تحلیل داده‌های سری زمانی و تصاویر متوالی کاربرد دارند. این شبکه‌ها با استفاده از حافظه داخلی خود، می‌توانند اطلاعات زمانی را نگهداری کرده و تحلیل کنند. در زمینه طبقه‌بندی کاربری اراضی، RNNها می‌توانند تغییرات زمانی در کاربری اراضی را تشخیص و تحلیل کنند. شبکه‌های عصبی مولد (GAN) نیز به عنوان یک ابزار قدرتمند در تولید داده‌های مصنوعی و تقویت داده‌ها کاربرد دارند. GANها با استفاده از دو شبکه رقابتی، توانایی تولید تصاویر مصنوعی با کیفیت بالا را دارند که می‌توانند برای افزایش دقت مدل‌های طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرند. در نهایت، شبکه‌های عصبی عمیق هیبریدی که ترکیبی از ساختارهای مختلف شبکه‌های عصبی هستند، نیز در تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شبکه‌ها با ترکیب ویژگی‌های مختلف از شبکه‌های CNN، RNN و GAN، می‌توانند دقت و کارایی بالاتری در تحلیل تصاویر هوایی و ماهواره‌ای داشته باشند [۹].

یادگیری عمیق، به عنوان زیرشاخه‌ای از هوش مصنوعی، در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری داشته و به عنوان ابزاری قدرتمند برای حل مسائل پیچیده پردازش تصویر از جمله طبقه‌بندی تصاویر هوایی مطرح شده است [۱۰]. شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN)، به عنوان یکی از زیر شاخه‌های یادگیری عمیق، در استخراج ویژگی‌های مکانی از تصاویر و طبقه‌بندی آنها به طور مؤثری عمل می‌کنند. معماری شبکه U-Net، یک ساختار CNN مبتنی بر رمزگشایی و رمزنگاری است که به طور خاص برای وظایف استخراج ویژگی و طبقه‌بندی تصویری طراحی شده است. این، قابلیت استخراج و بازسازی ویژگی‌های مکانی و معنایی تصاویر را به طور همزمان داراست. U-Net با ساختار منحصر به فرد خود، دقت بالایی در شناسایی و تفکیک مرزهای کلاس‌های مختلف کاربری اراضی ارائه می‌دهد [۱۱]. با توجه به این موارد، استفاده از تصاویر هوایی با وضوح بالا و معماری شبکه U-Net مبتنی بر یادگیری عمیق CNN،

داده‌های برچسب‌گذاری شده و دقت پایین در برخی کلاس‌ها، همچنان وجود دارند.

این مطالعه روشی مبتنی بر معماری شبکه U-Net برای طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی ارائه می‌دهد. نوآوری تحقیق حاضر در به‌کارگیری تکنیک‌های بهینه‌سازی و منظم‌سازی، از جمله حذف تصادفی و نرمال‌سازی دسته، برای بهبود همگرایی و کاهش بیش‌برازش در مدل U-Net نهفته است. این معماری به دلیل توانایی بالا در استخراج ویژگی‌های مکانی و حفظ جزئیات دقیق تصویر، در حوزه طبقه‌بندی تصاویر کارآمد است. معماری U-Net با بهره‌گیری از بلوک‌های کانولوشن و فعال‌سازی ReLU، عملکرد قابل ملاحظه‌ای در شناسایی الگوهای پیچیده دارد. افزون بر این، مسیرهای رمزنگاری و رمزگشایی با فیلترهای افزایشی و لایه‌های تجمیع‌کننده بیشینه و Conv2DTranspose، امکان تحلیل و بازسازی دقیق تصاویر را فراهم می‌سازد. استفاده از داده‌های هوایی با کیفیت بالا برای افزایش دقت در طبقه‌بندی کاربری اراضی نیز، از دیگر جنبه‌های نوآورانه این پژوهش است. همچنین، استفاده از تنظیم دقیق فرایمترها همچون تابع بهینه‌ساز Adam، نرخ یادگیری، ابعاد دسته‌بندی و تعداد مسیر رمزنگاری و رمزگشایی مناسب، موجب بهبود عملکرد مدل و دقت طبقه‌بندی شده است. این تحقیق به منظور ارائه روشی دقیق و کارآمد برای تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی، به‌ویژه در مناطقی با تنوع کاربری بالا و پیچیدگی‌های مکانی، طراحی شده است.

روش تحقیق

در این پژوهش با هدف طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی، از تصاویر هوایی و مدل یادگیری عمیق کانولوشنی مبتنی بر معماری U-Net استفاده شده است. این روش با تمرکز بر افزایش دقت و صحت طبقه‌بندی تصاویر، به تحلیل کاربری اراضی در چهار دسته مختلف پرداخته است. فرایند طی شده برای طبقه‌بندی کاربری اراضی با یادگیری عمیق U-Net که در این مقاله صورت گرفته است در شکل (۱) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۱) ابتدا تصاویر هوایی با وضوح بالا تهیه گردید. سپس در بخش آماده‌سازی داده‌ها تصحیحات هندسی و رادیومتریکی جهت تهیه تصویر ارتوفتو اعمال و همچنین برچسب‌گذاری تصویر بصورت دستی، برای هر کاربری (ساختمان، راه، پوشش جنگلی و آب)، توسط کارشناس خبره صورت گرفت. در ادامه کل تصویر به‌همراه برچسب تصویر، به تصاویر کوچک به ابعاد 256×256 پیکسل، برش داده شد تا به عنوان نمونه داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون از این تصاویر و برچسب‌های متناظر تهیه شده، استفاده گردد. سپس از تکنیک‌های افزون‌سازی داده، مانند چرخش در سه جهت: (۱) چرخش 90° درجه، (۲) وارونه‌سازی افقی و (۳) وارونه‌سازی عمودی، استفاده شد. استفاده از تکنیک‌های افزون‌سازی داده در یادگیری عمیق به دو دلیل اصلی انجام می‌شود:

رویکردی نوآورانه و کارآمد برای تحلیل و طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی ارائه می‌دهد [۱۲]. این روش می‌تواند به بهبود دقت و کارایی فرایند طبقه‌بندی و ارائه اطلاعات ارزشمند برای تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف کمک کند.

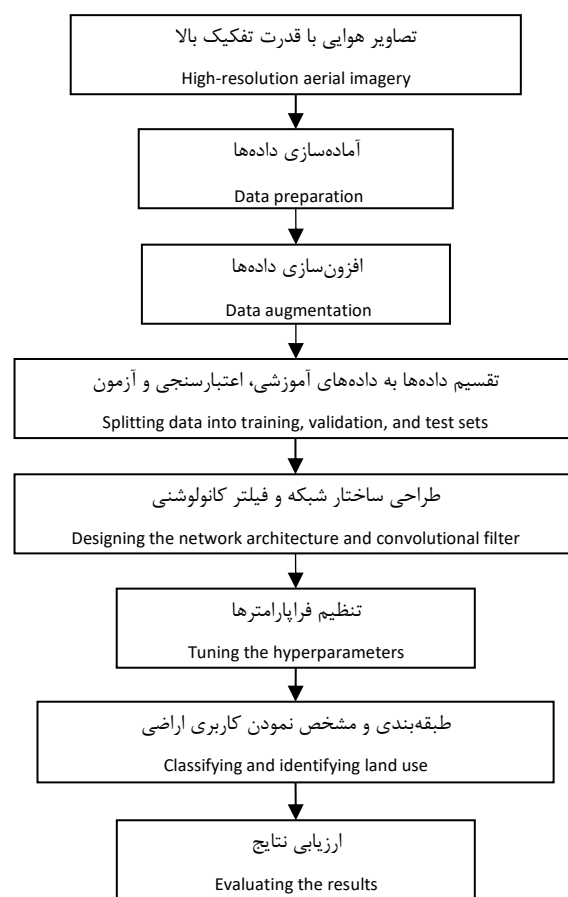
در سال‌های اخیر، تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از تصاویر هوایی و روش‌های یادگیری عمیق توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این تحقیقات با هدف بهبود دقت و کارایی در تفکیک انواع کاربری‌های اراضی انجام شده‌اند. مطالعه انجام شده توسط وون کیونگ باک و همکاران در سال ۲۰۲۴ نشان داد که مدل SiU-Net در مقایسه با DeepLabv3+ و U-Net، عملکرد بهتری در طبقه‌بندی پوشش زمین با داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 دارد [۱۳]. در تحقیقی دیگر، توان لین جیانگ و همکاران از U-Net برای طبقه‌بندی پوشش زمین در منطقه معدنی ویتنام استفاده کردند و نشان دادند که توابع بهینه‌ساز Nadam و Adadelta دقت بالاتری دارند و U-Net قادر به نظارت بر تغییرات پوشش زمین است [۱۴]. در مطالعه‌ای که توسط جاناناتان سولورزانو و همکاران در سال ۲۰۲۱ صورت گرفت، ترکیب داده‌های چندطیفی (MS) و راداری (SAR) برای مدل U-Net مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیق آنها نتایج حاکی از آن بود که این ترکیب دقت طبقه‌بندی باغ‌ها و جنگل‌ها را بهبود می‌بخشد [۱۵]. در تحقیقی از اندرو کلارک و همکاران، تاثیر تغییر پارامترهای مختلف شبکه‌های عصبی کانولوشنی بر عملکرد طبقه‌بندی پوشش زمین مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل‌های پیچیده‌تر دقت بالاتری دارند [۱۶]. حسام النجار و همکاران با استفاده از ادغام مدل رقومی سطح (DSM) و تصاویر پهپاد با شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN)، بهبود دقت طبقه‌بندی پوشش زمین را بررسی کردند و نشان دادند که ادغام داده‌ها بهبود قابل توجهی در دقت دارد [۱۷]. تجندرا کومار یاداو و همکاران در سال ۲۰۲۱، استفاده از تصاویر پهپادی و یادگیری عمیق را برای طبقه‌بندی پوشش زمین را در معدن زغال سنگ Mae_Moh در تایلند بررسی کردند و به دقت بالایی در طبقه‌بندی دست یافتند [۱۸]. میثم محرمی و همکاران در سال ۱۴۰۰ نقشه پوشش اراضی را با تصاویر ماهواره‌ای و دو الگوریتم یادگیری عمیق و جنگل تصادفی تهیه کردند و نشان دادند که شبکه عصبی عمیق دقت بهتری نسبت به جنگل تصادفی دارد [۱۹].

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات پیشین و همچنین اهمیت و ضرورت تهیه نقشه پوشش زمین در مدیریت و تصمیم‌گیری‌های کلان کشوری، استفاده از تصاویر هوایی با وضوح بالا و روش‌های یادگیری عمیق می‌تواند دقت قابل توجهی در طبقه‌بندی کاربری اراضی فراهم کند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) و به‌ویژه معماری U-Net در استخراج ویژگی‌های مکانی از تصاویر و طبقه‌بندی دقیق آن‌ها بسیار موثر عمل می‌کنند. با این حال، چالش‌هایی همچون بیش‌برازش مدل، کمبود

در شکل (۲)، عمل چرخش بر روی یک نمونه از تصاویر در سه جهت نمایش داده شده است.

در گام بعدی، به منظور آموزش و ارزیابی مدل یادگیری عمیق U-Net، تصاویر به سه مجموعه آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم‌بندی شدند. این تقسیم‌بندی از جهت حفظ استقلال و عملکرد صحیح مدل بسیار حیاتی است. حدود ۷۵ درصد از کل داده‌های این مجموعه برای آموزش مدل، اختصاص یافت که شامل تصاویر و برچسب‌های مربوط به چهار دسته مختلف پوشش کاربری (ساختمان‌ها، جنگل‌ها، جاده‌ها و آب) است. این داده‌ها به طور تصادفی انتخاب شده‌اند تا مدل بتواند تنوع داده‌ها را یاد بگیرد و عملکرد بهتری در طبقه‌بندی داشته باشد. ۲۵ درصد باقی‌مانده داده‌ها برای بخش اعتبارسنجی، مورد استفاده قرار گرفت. این مجموعه داده برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود تا از تنظیمات بهینه مدل و جلوگیری از بیش برآزش اطمینان حاصل شود. ۵ درصد از مجموعه داده‌های اعتبارسنجی نیز به صورت تصادفی انتخاب شده و به بخش آزمون، اختصاص یافت. این مجموعه کوچک‌تر برای ارزیابی نهایی عملکرد مدل پس از اتمام فرایند آموزش استفاده می‌گردد. نتایج حاصل از این مجموعه به عنوان ارزیابی نهایی عملکرد مدل در طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. برای اطمینان از تعمیم‌پذیری مدل، تمامی مجموعه‌ها، شامل تصاویر مختلف از هر چهار پوشش کاربری مورد نظر بوده و به صورت تصادفی و بدون تداخل انتخاب شدند. این فرایند تضمین می‌کند که مدل قادر است به درستی و با دقت بالا، انواع مختلف کاربری اراضی را طبقه‌بندی کند. در گام بعد نیاز به طراحی ساختار شبکه و فیلتر کانولوشنی می‌باشد.

جهت طراحی ساختار شبکه و فیلتر کانولوشنی، بایستی شناخت دقیقی از معماری U-net داشت. معماری U-Net یک معماری شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) است که ابتدا در سال ۲۰۱۵ برای برنامه‌های پردازش تصویر پزشکی معرفی شد [۲۲]. این معماری اصطلاحاً به دلیل شباهت ساختارش به حرف "U"، U-Net نامگذاری شده است. U-Net از ساختاری که شامل لایه‌های کانولوشنی بالا به پایین و سپس لایه‌های کانولوشنی پایین به بالا است، استفاده می‌کند. ساختار اصلی U-Net شامل دو بخش اصلی است که عبارتند از:



شکل ۱: روش پیشنهادی در این تحقیق جهت طبقه‌بندی کاربری اراضی
Fig. 1: The proposed method in this study for land use classification

○ افزایش حجم داده‌ها: ایجاد نمونه‌های جدید و متنوع از داده‌های موجود، به مدل کمک می‌کند که با حجم بیشتری از داده‌ها آموزش ببیند و این امر به بهبود دقت و عملکرد مدل کمک می‌کند [۲۰].
○ کاهش بیش برآزش: اعمال تغییرات تصادفی مانند چرخش، تغییر مقیاس و افزودن نویز به داده‌های آموزشی، باعث می‌شود که مدل به الگوهای کلی‌تری توجه کند و به دقت و عملکرد بهتری بر روی داده‌های جدید واکنش نشان دهد، در نتیجه بیش برآزش را کاهش می‌دهد [۲۱].



شکل ۲: نمایی از افزون‌سازی داده (تکنیک چرخش و وارونه‌سازی)
Fig. 2: A view of data augmentation (rotation and flipping technique)

تصادفی برخی از نوره‌ها در هر لایه، به جلوگیری از وابستگی بیش از حد مدل به ویژگی‌های خاص داده آموزشی و در نتیجه بهبود کارایی بر روی داده‌های جدید کمک می‌کند.

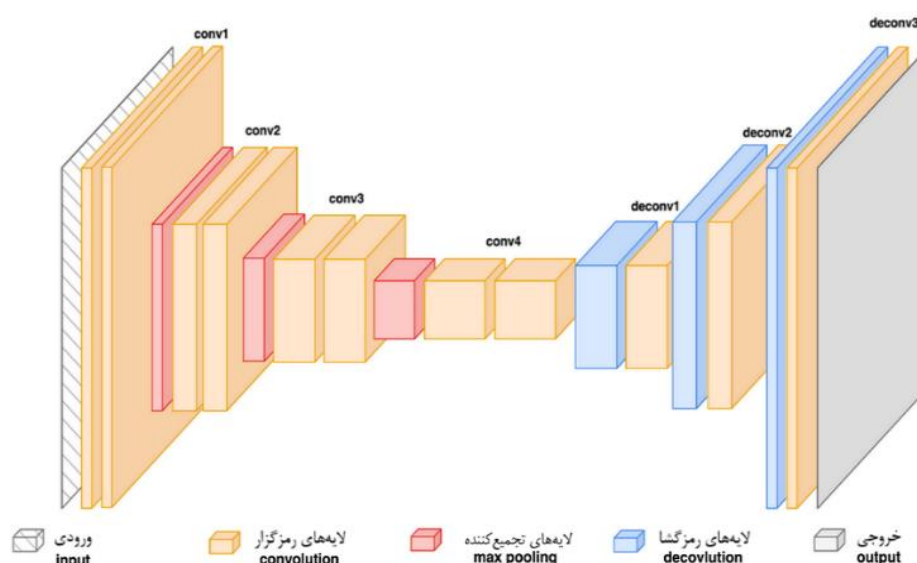
در بخش طراحی ساختار شبکه، مدل مورد نظر شامل سه بخش اصلی مسیر رمزنگاری، مسیر رمزگشایی و لایه خروجی است که هر یک با اهداف خاصی در فرایند پردازش و طبقه‌بندی تصاویر به کار گرفته شده‌اند. مسیر رمزنگاری شامل ۵ مرحله است که در هر مرحله ابعاد فیلترهای کانولوشن کاهش می‌یابد (از فیلتر با ابعاد 256×256 در اولین مرحله تا فیلتر با ابعاد 16×16 در مرحله آخر). این کار باعث استخراج ویژگی‌های پیچیده‌تر از تصاویر در مراحل پایین‌تر و ویژگی‌های با سطح پایین‌تر مانند لبه‌ها و بافت‌ها در مراحل بالاتر می‌شود. همچنین در انتهای هر مرحله از یک لایه تجمیع‌کننده بیشینه برای کاهش ابعاد تصویر و کنترل پیچیدگی مدل استفاده شده است. مسیر رمزگشایی شامل ۵ مرحله است، با این تفاوت که در هر مرحله با استفاده از لایه‌های Conv2DTranspose ابعاد تصویر افزایش می‌یابد. همچنین در هر مرحله خروجی این لایه با خروجی مربوطه در مسیر رمزنگاری با ابعاد مشابه ترکیب می‌شود تا اطلاعات مکانی از مسیر رمزنگاری به مسیر رمزگشایی منتقل شود و در نهایت منجر به خروجی با قدرت تفکیک بالا و دقت مطلوب در طبقه‌بندی تصویر گردد. در نهایت، یک لایه کانولوشن با فیلتری به ابعاد 5×5 و هسته 1×1 برای خروجی مدل در نظر گرفته شده است. خروجی این لایه با ابعاد تصویر مطابقت دارد و هر پیکسل خروجی نشان‌دهنده احتمال تعلق آن پیکسل به یکی از ۵ دسته (۴ طبقه کاربری اراضی به همراه پس‌زمینه) می‌باشد. برای تبدیل خروجی به یک برچسب کاربری از عملگر Softmax استفاده شده است. عوارضی که در مجموعه ۴ کاربری تعریف شده قرار نگیرند، توسط مدل یادگیری عمیق به دسته پس‌زمینه اختصاص داده می‌شود.

○ بخش انقباضی (Encoder): در این بخش، تصاویر ورودی از طریق یک سری لایه کانولوشنی و لایه‌های تجمیع‌کننده (معمولاً لایه‌های تجمیع‌کننده بیشینه) کاهش می‌یابند و ویژگی‌های مهم برای تصمیم‌گیری بعدی استخراج می‌شوند [۲۳]. این فرایند به صورت تدریجی انجام می‌شود و به کاهش ابعاد تصویر و افزایش عمق (تعداد کانال‌ها) منجر می‌شود.

○ بخش انبساطی (Decoder): در این بخش، با استفاده از لایه‌های کانولوشنی پایین به بالا و لایه‌های کانولوشن معکوس، ابعاد تصویر افزایش می‌یابد و ویژگی‌های استخراج شده در بخش رمزنگاری بازسازی می‌شوند [۲۴]. در واقع، این بخش بازسازی دقیق تصویر را با استفاده از ویژگی‌هایی که در بخش رمزنگاری به دست آمده‌اند، انجام می‌دهد.

شکل (۳) ساختاری از مدل U-Net با لایه ورودی و خروجی و همچنین لایه‌های رمزگزار، تجمیع‌کننده و رمزگشا را نشان می‌دهد.

عملکرد اصلی U-Net در برنامه‌های تصویری به طور خاص در شناسایی و طبقه‌بندی اجسام و عوارض در تصاویر و همچنین سایر وظایف پردازش تصویر است. برخلاف شبکه‌های CNN معمولی که معمولاً اطلاعات محیطی اطراف یک نقطه را در نظر می‌گیرند، U-Net قادر است اطلاعات محیطی بیشتری را در نظر بگیرد و از آنها برای بازسازی دقیق‌تر و بهتر تصاویر استفاده کند، به ویژه در مواردی که نیاز به بازسازی دقیق تصاویر و یا اجسام کوچک در تصاویر وجود دارد [۲۵]. مدل U-Net طراحی شده در این مطالعه، از بلوک‌های کانولوشنی تشکیل شده است که هر بلوک شامل دو لایه کانولوشن با هسته 3×3 ، اعمال‌کننده فعال‌سازی ReLU و یک لایه نرمال‌سازی دسته و حذف تصادفی (Dropout) است. استفاده از نرمال‌سازی دسته، به بهبود همگرایی مدل و کاهش پدیده بیش برآزش کمک می‌کند. Dropout نیز با حذف



شکل ۳: نمونه‌ای از ساختار معماری U-Net
Fig. 3: An example of the U-Net architecture

○ اندازه دسته‌بندی: اندازه دسته ۱۶ انتخاب شده است. دسته‌بندی به فرایند تقسیم کردن داده‌های آموزشی به زیرمجموعه‌های کوچک‌تر گفته می‌شود که در هر تکرار برای آموزش مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند. انتخاب اندازه مناسب دسته می‌تواند بر حافظه مورد نیاز برای آموزش مدل و سرعت همگرایی آن تأثیر بگذارد.

تنظیمات و ساختار مدل، به مدل U-Net این امکان را می‌دهد تا با دقت و کارایی بالا، وظایف طبقه‌بندی تصویر را انجام دهد و به نتایج مطلوبی در طبقه‌بندی کاربری اراضی دست یابد.

در جدول (۱) بطور خلاصه، معماری شبکه U-Net طراحی شده آمده است.

گام آخر در طبقه‌بندی کاربری اراضی، ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از مدل است. این ارزیابی شامل استفاده از معیارهای دقت کلی، ضریب کاپا و امتیاز ژاکارد می‌باشد تا اطمینان حاصل شود که مدل به‌درستی توانسته است کاربری‌های مختلف را شناسایی و دسته‌بندی کند. این معیارها کمک می‌کنند تا عملکرد مدل به‌طور دقیق‌تر مورد سنجش قرار گیرد و نقاط ضعف و قوت آن مشخص شود.

دقت کلی (رابطه ۱)، یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی است. این معیار نشان‌دهنده نسبت تعداد نمونه‌های درست طبقه‌بندی شده به کل نمونه‌ها است [۲۷]. به عبارت دیگر، دقت کلی نشان می‌دهد که مدل چقدر در تشخیص نمونه‌ها به درستی عمل کرده است.

$$\text{Overall_Accuracy} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (1)$$

تنظیم فرآیندها در طراحی مدل U-net از اهمیت بالایی برخوردار است، این تنظیمات به طور مستقیم بر عملکرد و دقت مدل تأثیر می‌گذارد. انتخاب صحیح فرآیندها می‌تواند زمان آموزش را کاهش داده و از بروز بیش‌برازش در مدل جلوگیری کند. همچنین تنظیم نادرست این پارامترها می‌تواند منجر به کاهش دقت و بروز نوسانات در فرایند آموزش شود؛ بنابراین دستیابی به تعادل مناسبی بین دقت و کارایی مدل ضروری است. از مهم‌ترین فرآیندهایی که در این مطالعه تنظیم شدند عبارت است از:

- تابع بهینه‌ساز: الگوریتم Adam و SGD به عنوان توابع بهینه‌ساز انتخاب شده است. Adam یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای شبکه‌های عصبی عمیق است که با به‌روزرسانی لحظه‌ای نرخ یادگیری برای هر پارامتر، به همگرایی سریع‌تر مدل کمک می‌کند [۲۶]. SGD یک الگوریتم بهینه‌سازی است که در هر مرحله وزن‌های مدل را بر اساس یک نمونه تصادفی از داده‌ها به‌روزرسانی می‌کند و به دلیل پردازش سریع‌تر با داده‌های بزرگ استفاده می‌شود. الگوریتم SGD پایه بسیاری از روش‌های پیشرفته‌تر بهینه‌سازی مثل Adam، RMSProp و AdaGrad است که مشکلات مربوط به نوسان‌ها و نرخ یادگیری را بهتر مدیریت می‌کنند.
- نرخ یادگیری: مقدار ۰.۰۰۰۱ برای نرخ یادگیری در نظر گرفته شده است. نرخ یادگیری پارامتری است که میزان به‌روزرسانی وزن‌های مدل را در هر تکرار تعیین می‌کند. مقدار مناسب نرخ یادگیری می‌تواند بر سرعت همگرایی و عملکرد نهایی مدل تأثیرگذار باشد.

جدول ۱: معماری U-Net طراحی شده
Table 1: Designed U-Net Architecture

بخش (Section)	توضیحات (Description)
بلوک‌های کانولوشن	شامل دو لایه کانولوشن با هسته ۳×۳ (Includes two convolution layers with a 3×3 kernel)
تابع فعال‌سازی	ReLU
نرمال‌سازی دسته	بهبود همگرایی و کاهش بیش‌برازش (Improves convergence and reduces overfitting)
حذف تصادفی	جلوگیری از وابستگی بیش از حد به ویژگی‌های خاص (Prevents excessive dependency on specific features)
مسیر رمزنگاری	۵ مرحله با افزایش فیلترها (۱۶ تا ۲۵۶) (5 stages with increasing filters (16 to 256))
لایه تجمیع‌کننده	کاهش ابعاد تصویر و کنترل پیچیدگی مدل (Reduces image dimensions and controls model complexity)
مسیر رمزگشایی	۵ مرحله با Conv2DTranspose برای افزایش ابعاد تصویر (5 stages with Conv2DTranspose to increase image dimensions)
ترکیب خروجی	انتقال اطلاعات مکانی از مسیر رمزنگاری (Transfers spatial information from the encoding path)
لایه خروجی	۵ فیلتر با هسته ۱×۱ (5 filters with a 1×1 kernel)
تابع بهینه‌ساز	Adam & SGD
نرخ یادگیری	0.0001
ابعاد دسته‌بندی	16

در این رابطه:

○ TP: تعداد نمونه‌هایی که به درستی به عنوان مثبت طبقه‌بندی شده‌اند.

○ TN: تعداد نمونه‌هایی که به درستی به عنوان منفی طبقه‌بندی شده‌اند.

○ FP: تعداد نمونه‌هایی که به اشتباه به عنوان مثبت طبقه‌بندی شده‌اند.

○ FN: تعداد نمونه‌هایی که به اشتباه به عنوان منفی طبقه‌بندی شده‌اند.

ضریب کاپا (رابطه ۲)، معیاری است که میزان توافق بین دو مجموعه داده (به عنوان مثال، پیش‌بینی‌های مدل و مقادیر واقعی) را با در نظر گرفتن احتمال توافق اتفاقی اندازه‌گیری می‌کند [۲۸]. این معیار نسبت به دقت کلی حساس‌تر است زیرا اثرات اتفاقی را در نظر می‌گیرد.

$$Kappa_Coefficient = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (۲)$$

در این رابطه:

○ p_o : دقت مشاهده شده (دقت کلی)

○ p_e : دقت تصادفی

امتیاز ژاکارد (رابطه ۳)، معیاری برای سنجش شباهت بین دو مجموعه است. این معیار اغلب در زمینه‌های طبقه‌بندی و خوشه‌بندی استفاده می‌شود. امتیاز ژاکارد بین ۰ و ۱ یا به صورت درصدی محاسبه می‌شود [۲۹]. مقادیر بالاتر نشان دهنده شباهت بیشتر بین دو مجموعه است.

$$Jaccard_Score = |A \cap B| / |A \cup B| \quad (۳)$$

که در آن:

○ $|A \cap B|$: تعداد عناصر مشترک بین دو مجموعه A و B

○ $|A \cup B|$: تعداد کل عناصر در دو مجموعه A و B

امتیاز F1 (رابطه ۴)، در بازه‌ای از ۰ تا ۱ قرار دارد که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است [۳۰].

$$F1\ Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (۴)$$

که در آن:

○ Precision (دقت): درصد پیش‌بینی‌های مثبت صحیح از کل پیش‌بینی‌های مثبت مدل است. به عبارت دیگر، دقت به ما می‌گوید که چه مقدار از پیش‌بینی‌های مثبت مدل، واقعاً صحیح بوده‌اند.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۵)$$

○ Recall (یادآوری): درصد نمونه‌های مثبت واقعی که به درستی توسط مدل شناسایی شده‌اند. این معیار نشان می‌دهد که مدل چقدر خوب در تشخیص تمام نمونه‌های مثبت عمل کرده است.

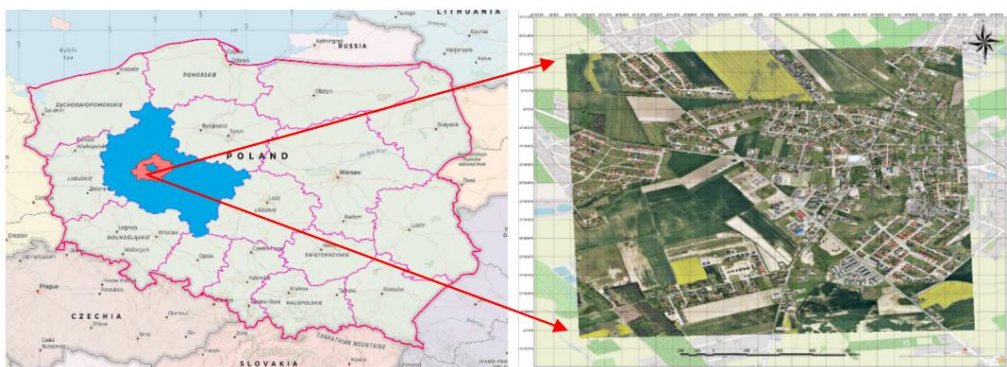
$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۶)$$

امتیاز F1 برای ارزیابی مدل‌هایی که ممکن است در شناسایی کلاس‌های نادر ضعیف عمل کنند، مناسب است، زیرا این معیار هم به Precision و هم به Recall توجه دارد و تعادل بین آنها را برقرار می‌کند. امتیاز F1 جزو معیارهای ارزیابی در این پژوهش نبوده و صرفاً جهت مقایسه عملکرد مدل با سایر مطالعات پیشین به کار گرفته شده است.

این معیارها به طور گسترده‌ای برای ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق در مسائل مختلف طبقه‌بندی و قطعه‌بندی تصویر استفاده می‌شوند و هر کدام مزایا و کاربردهای خاص خود را دارند.

پایه‌سازی روش تحقیق

برای پایه‌سازی الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه از داده‌های شهر پوزنان (Poznański) در غرب استان ویلکوپولسکا (Wielkopolskie) از کشور لهستان استفاده شده است. این شهر در کنار رودخانه وارتا (Warta) واقع شده و به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و بزرگ‌ترین شهرهای لهستان شناخته می‌شود. این منطقه با مساحت ۵۲۳/۰۱۶ هکتار در بازه‌ای از طول جغرافیایی ۱۶°۴۲'۰۳" تا ۱۶°۴۵'۰۴" شرقی و بازه‌ای از عرض جغرافیایی ۵۲°۲۹'۵۸" تا ۵۲°۳۱'۱۵" شمالی قرار دارد. شکل (۴) موقعیت و پوشش این منطقه را نمایش می‌دهد.



شکل ۴: منطقه مطالعاتی: تصویر اورتوفتو از شهر پوزنان - ویلکوپولسکا - لهستان
Fig. 4: Study Area: Orthophoto of the City of Poznań - Wielkopolska - Poland

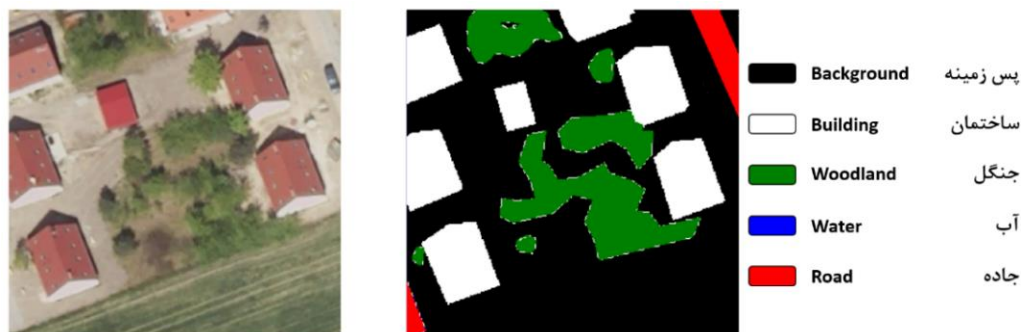
پردازشی مانند حافظه و پردازنده را فراهم می‌کند. در نتیجه، مدل قادر است عملیات کانولوشن و آموزش را با سرعت بیشتری انجام دهد که این مسئله به‌ویژه در مدل‌هایی با تعداد لایه‌های زیاد مانند U-Net اهمیت دارد. دوماً، این اندازه به مدل کمک می‌کند تا جزئیات محلی بیشتری از تصاویر را ببیند، به‌خصوص در شناسایی لبه‌ها و مرزهای کاربری‌های اراضی مانند جاده‌ها و ساختمان‌ها. قطعات کوچک‌تر امکان پردازش دقیق‌تر و استخراج بهتر ویژگی‌های مکانی را فراهم می‌کنند که برای بهبود دقت طبقه‌بندی ضروری است. علاوه بر این، برش تصاویر به این اندازه تنوع بیشتری از داده‌ها را به مدل ارائه می‌دهد که باعث افزایش تعمیم‌پذیری و بهبود دقت مدل در مواجهه با داده‌های جدید می‌شود. همچنین، اندازه 256×256 پیکسل با معماری U-Net سازگار است و از تغییرات شدید در ابعاد ورودی در طی مراحل مختلف مدل جلوگیری می‌کند که این تناسب به بهبود همگرایی مدل و کاهش مشکلاتی مانند اعوجاج در تصاویر خروجی کمک می‌کند. به طور کلی، این اندازه بهینه به دلیل افزایش دقت و کارایی مدل، یکی از عوامل کلیدی در بهبود عملکرد U-Net در این پژوهش بوده است.

برای پیاده‌سازی و اجرای مدل یادگیری عمیق U-Net، از زبان برنامه‌نویسی Python استفاده شده است. تمامی مراحل آموزش و ارزیابی مدل در محیط Google Colab با استفاده از سرور گرافیکی T4 GPU انجام گرفته است. Google Colab به دلیل داشتن پردازنده‌های گرافیکی قدرتمند (مانند T4 GPU)، توانسته است زمان محاسباتی مدل را به طور قابل توجهی کاهش داده و فرایند آموزش را تسریع کند. این ویژگی به ویژه برای مدل‌های یادگیری عمیق با حجم داده‌های بالا و تعداد تکرارهای زیاد، ضروری است. به علاوه از مجموعه‌ای از کتابخانه‌های متنوع برای پردازش تصاویر، آماده‌سازی داده‌ها و پیاده‌سازی مدل استفاده شد. برای بارگذاری و پردازش تصاویر، از کتابخانه‌هایی مانند PIL، tifffile و gdal استفاده شده است. برای مصورسازی نتایج و تحلیل داده‌ها از Matplotlib و ابزارهای مرتبط مانند PrettyTable و Pandas بهره گرفته شده است. در بخش تقسیم‌بندی داده‌ها، کتابخانه scikit-learn برای تقسیم داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون استفاده شد. همچنین، از OpenCV برای پردازش و تحلیل تصاویر و کتابخانه Keras برای طراحی و آموزش مدل‌های یادگیری عمیق بهره گرفته شد.

در این پژوهش از تصاویر هوایی در سال ۲۰۲۱ استفاده شده است [۳۱]. این تصاویر با وضوح بالا و قدرت تفکیک مکانی ۲۵ سانتی متر در سه باند اصلی محدوده طیف مرئی در شرایط نوری مناسب اخذ شده است. انتخاب داده‌های مربوط به کشور لهستان به دلیل چندین عامل مهم صورت گرفته است. نخست آنکه، دسترسی به داده‌های هوایی با کیفیت بالا برای مناطق داخلی ایران، فرایندی زمان‌بر و مستلزم هزینه‌های بالایی است. از سوی دیگر، در صورت تهیه داده‌ها، برچسب‌گذاری دقیق و گسترده آن‌ها به دلیل وسعت مناطق، امری بسیار پیچیده و زمان‌بر محسوب می‌شد. در مقابل، داده‌های هوایی مناطقی از کشور لهستان به صورت رایگان در دسترس پژوهشگران بوده و پیش از این توسط کارشناسان به طور کامل برچسب‌گذاری شده است، که این امر علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به میزان قابل توجهی موجب تسریع در انجام پژوهش می‌شود. همچنین، داده‌های استفاده شده از نظر تصحیحات هندسی و رادیومتریکی کیفیت بالایی داشته و برای بهره‌برداری در مدل‌های یادگیری عمیق از جمله U-Net کاملاً مناسب بودند. از دیگر مزایای این منطقه، تنوع کاربری‌های اراضی آن (شامل ساختمان‌ها، جنگل‌ها، جاده‌ها و آب‌ها) است که امکان ارزیابی دقیق‌تر مدل و تعمیم‌پذیری نتایج به سایر مناطق و همچنین سایر مطالعات را فراهم می‌کند. در شکل (۵) نمونه‌ای از برچسب‌های تهیه شده نشان داده شده است. راهنمای موجود در این شکل، برای سایر اشکال مشابه در این مطالعه، صادق است.

از ۷۶۹ تصویر برچسب‌گذاری شده با ابعاد 256×256 پیکسل، تعداد ۵۷۶ تصویر به بخش داده‌های آموزشی اختصاص داده شد که پس از اعمال تکنیک‌های افزون‌سازی داده، تعداد مجموعه داده‌های آموزشی به ۲۳۰۴ نمونه افزایش یافت. ۱۸۳ تصویر به بخش داده‌های اعتبارسنجی و ۱۰ تصویر به مجموعه داده‌های آزمون اختصاص داده شد.

در این پژوهش، تصاویر هوایی به قطعات کوچک‌تر با اندازه 256×256 پیکسل برش داده شدند که این انتخاب به دلایل مختلفی بر بهبود کارایی مدل یادگیری عمیق U-Net تأثیرگذار بوده است. اولاً، برش تصاویر به این اندازه باعث کاهش حجم داده‌های پردازشی و به تبع آن کاهش پیچیدگی محاسباتی می‌شود که امکان استفاده بهینه‌تر از منابع



شکل ۵: برچسب تهیه شده توسط کارشناس از کاربری‌های مورد مطالعه
Fig. 5: Label prepared by the expert for the studied land uses

جولوگیری از بیش‌برازش اهمیت دارد، زیرا مدل ممکن است به خوبی بر روی داده‌های آموزشی عمل کند اما در مواجهه با داده‌های جدید عملکرد ضعیفی داشته باشد. با توقف آموزش در بهترین نقطه، نه تنها زمان آموزش کاهش می‌یابد، بلکه مدل بهینه‌تری نیز به دست می‌آید که به ویژگی‌های اصلی داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی پاسخ می‌دهد. این امر به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر مدل کمک می‌کند و موجب دستیابی به دقت و کارایی بالاتر در طبقه‌بندی کاربری اراضی می‌شود.

در آخر نقشه تهیه شده توسط مدل یادگیری عمیق U-net، توسط معیارهای ارزیابی دقت با نقشه تهیه شده توسط کارشناس مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول (۲) نقشه تهیه شده توسط مدل، برای برخی از مجموعه داده‌های آزمون به همراه نقشه تهیه شده توسط کارشناس خبره و معیارهای ارزیابی عملکرد مدل، آمده است.

همچنین به منظور محاسبه دقت مدل در تشخیص مرزهای کاربری‌های اراضی نیز، از ابزار Metrics در کتابخانه scikit-learn استفاده شد. این ترکیب از کتابخانه‌ها و ابزارها، به اجرای موفق و کارآمد مدل U-Net کمک کرده و فرآیند پیاده‌سازی، آموزش و ارزیابی مدل را تسریع و بهبود بخشیده است.

پس از اعمال تنظیمات و طراحی ساختار U-net، مجموعه داده آموزشی به مدل معرفی گردید. در گام بعدی مدل U-net پس از ۹۶ تکرار، به بیشترین دقت رسیده و فرآیند آموزش خود را با استفاده از تکنیک Early Stopping، متوقف نمود. تکنیک Early Stopping برای جلوگیری از بیش‌برازش در فرآیند آموزش مدل U-Net استفاده شده است. این روش به‌صورت خودکار آموزش مدل را متوقف می‌کند زمانی که دقت آن بر روی مجموعه اعتبارسنجی به حداکثر مقدار خود رسیده و از آن پس شروع به کاهش می‌کند. استفاده از Early Stopping به دلیل

جدول ۲: پیش‌بینی مدل U-Net برای مجموعه داده‌های آزمون

Table 2: U-Net Model Predictions for the Test Dataset

شماره تصویر	Image number	تهیه شده توسط U-Net (Generated by U-Net)	تهیه شده توسط کارشناس خبره (Produced by an Expert)	تصویر اصلی (Original)
تصویر اول	First Image			
تصویر دوم	Second Image			
تصویر سوم	Third Image			

معیار ارزیابی
(Evaluation Criteria)

دقت کلی (Overall Accuracy)	ضریب کاپا (Kappa Coefficient)	امتیاز ژاکارد (Jaccard Score)
First Image	86.37	76.11
Second Image	90.55	89.57
Third Image	75.01	66.01

نتایج و بحث

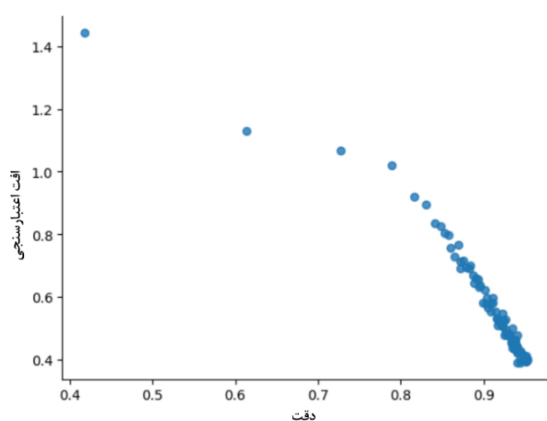
نیز به سرعت کاهش یافته است، اما پس از حدود ۵۰ تکرار به یک مقدار ثابت (در حدود ۰.۵) می‌رسد و سپس نوسانات کمی را نشان می‌دهد. بهترین نقطه مدل در دقت و مقدار افت آن برای هر دو مجموعه داده آموزش و تست در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: دقت و افت حاصل از آموزش مدل برای مجموعه داده‌های آموزش و اعتبارسنجی

Table 3: Accuracy and loss achieved from model training for the training and validation datasets

دقت آموزش (Training accuracy)	افت آموزش (Training loss)	دقت اعتبارسنجی (Validation accuracy)	افت اعتبارسنجی (Validation loss)
0.9503	0.1958	0.8883	0.3941

با توجه به جدول (۳) مدل به طور کلی عملکرد خوبی به ویژه در داده‌های آموزشی دارد. دقت بالا در هر دو مجموعه داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده این است که مدل به خوبی آموزش دیده و می‌تواند داده‌های جدید را نیز به خوبی تشخیص دهد. در شکل (۷)، نمودار پراکندگی رابطه بین خطای اعتبارسنجی و دقت، نشان داده شده است.

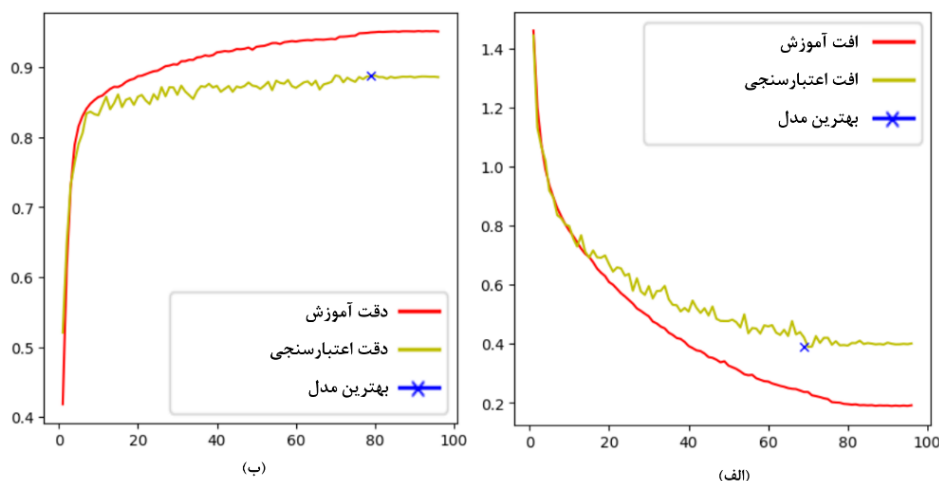


شکل ۷: رابطه بین دقت و افت اعتبارسنجی

Fig. 7: The relationship between accuracy and validation degradation

جدول (۲) نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل U-Net در طبقه‌بندی تصاویر هوایی با دقت بالا می‌باشد. همانگونه که از نتایج مشخص است مدل توانسته به خوبی ویژگی‌های مختلف موجود در تصاویر را شناسایی کرده و طبقه‌بندی‌های دقیقی را ارائه دهد. با این حال، برخی محدودیت‌ها و چالش‌ها نیز در طول پژوهش مشاهده شد که می‌توانند بهبودهای بیشتری را ایجاد کنند. یکی از مواردی که بایستی به آن توجه کرد، چالش مربوط به کلاس‌های نادر آب می‌باشد. در برخی موارد، مدل در تشخیص کلاس‌های نادر مانند آب، دقت کمتری داشت. این مسئله می‌تواند به دلیل تعداد کم نمونه‌های آموزشی مربوط به این کلاس‌ها باشد. استفاده از تکنیک‌های افزایش داده و جمع‌آوری داده‌های بیشتر برای این کلاس‌ها می‌تواند به بهبود دقت مدل کمک کند. دقت مدل یادگیری عمیق U-Net با استفاده از مجموعه داده‌های آموزش و سپس ارزیابی دقت مدل آموزش دیده برای مجموعه داده‌های اعتبارسنجی در طول ۹۶ تکرار در شکل (۶) نشان داده شده است. در شکل (۶)، محور عمودی نمودار، نشان‌دهنده دقت یا افت مدل بوده و محور افقی نمودار، متعلق به تعداد تکرار آموزش و اعتبارسنجی مدل است.

طبق نمودار شکل (۶) قسمت (ب)، دقت مدل در داده‌های آموزشی به سرعت افزایش می‌یابد و در حدود ۰.۹۵ به تعادل می‌رسد. این نشان می‌دهد که مدل به خوبی آموزش دیده است. همچنین دقت مدل در داده‌های اعتبارسنجی نیز به طور کلی افزایش می‌یابد، اما پس از حدود ۲۰ تکرار به مقدار حدود ۰.۸۵ می‌رسد و سپس تغییرات کوچکی را نشان می‌دهد. نقطه بهترین مدل نشان‌دهنده بهترین عملکرد مدل در داده‌های اعتبارسنجی است. در این نقطه از فرایند آموزش، دقت اعتبارسنجی تقریباً به حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین مطابق نمودار شکل (۶) قسمت (الف)، خطای مدل در داده‌های آموزشی به سرعت کاهش می‌یابد و پس از حدود ۶۰ تکرار به یک مقدار کم (تقریباً نزدیک به صفر) می‌رسد. همچنین خطای مدل در داده‌های اعتبارسنجی



شکل ۶: الف) افت مدل و ب) دقت مدل برای مجموعه داده‌های آموزش و اعتبارسنجی

Fig. 6: a) Model loss and b) Model accuracy for training and validation datasets

نتایج به دست آمده از این پژوهش و نتایج مقالات منتخب را نشان می‌دهد.

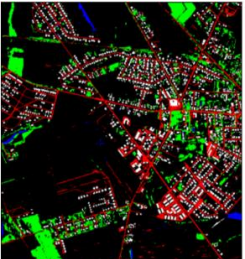
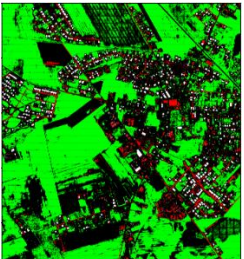
نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که مدل U-Net به کار رفته در این پژوهش با استفاده از بهینه‌ساز Adam، بهبود قابل توجهی در دقت کلی، ضریب کاپا و امتیاز ژاکارد نسبت به مطالعات پیشین داشته است. این بهبودها را می‌توان به استفاده از تکنیک‌های منظم‌سازی مانند حذف تصادفی و Regularization L2، روش‌های افزون‌سازی داده، تکنیک توقف زودهنگام و تنظیم بهینه فراپارامترها نسبت داد. معیارهای ارزیابی به دست آمده از بهینه‌ساز SGD نیز، علی‌رغم تنظیمات یکسان در بخش فراپارامترهای مدل U-Net، این بهینه‌ساز دقت قابل قبولی را ارائه نداده است که حاکی از تاثیر بسزای انتخاب دقیق بهینه‌ساز در عملکرد مدل یادگیری عمیق است. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که مدل U-Net پیشنهادی قادر به شناسایی دقیق تر و بهتر کلاس‌های مختلف کاربری اراضی است و می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی با دقت بالا مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که تفاوت‌های جغرافیایی و شرایط محیطی مناطق مختلف مورد مطالعه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت مدل‌های یادگیری عمیق در طبقه‌بندی کاربری اراضی داشته باشد. اگرچه نتایج ارائه شده در جدول (۴) نشان‌دهنده عملکرد U-Net در مناطق گوناگون است، این مقایسه باید با در نظر گرفتن تفاوت‌های شرایط مکانی و نوع داده‌ها مورد استفاده تفسیر گردد. به همین دلیل، این مقایسه به عنوان یک مقایسه کلی از عملکرد مدل پیشنهادی، ارائه شده و نتایج نمی‌توانند به طور دقیق برای تمام مناطق جغرافیایی تعمیم یابند.

این نمودار نشان‌دهنده اثربخشی مدل U-Net در طبقه‌بندی کاربری اراضی بوده و نشان می‌دهد که در شرایط بهینه، مدل می‌تواند به دقت بالایی در حدود ۰.۸۵ تا ۰.۹۵ برسد. با افزایش عملکرد مدل، کاهش خطای اعتبارسنجی مشهود است. نقاطی که در نزدیکی خطای اعتبارسنجی پایین و دقت بالا متمرکز شده‌اند، نشان‌دهنده مدل‌هایی هستند که عملکرد بهتری دارند. برای بهبود بیشتر عملکرد مدل و کاهش خطای اعتبارسنجی، نیاز به بهینه‌سازی‌های بیشتری در مراحل آموزش و اعتبارسنجی وجود دارد. همچنین، می‌توان به اهمیت داشتن مجموعه داده‌های با کیفیت بالا و مناسب برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق اشاره کرد. به طور کلی، این نمودار اهمیت تنظیم دقیق فراپارامترها و استفاده از داده‌های آموزشی مناسب در بهبود عملکرد مدل را نشان می‌دهد. در نهایت نقشه کل منطقه مورد مطالعه برای چهار کاربری ساختمان، جنگل، جاده و آب، توسط مدل آموزش یافته، تهیه گردید که در جدول (۴) مشهود است. برای بررسی تاثیر انتخاب الگوریتم بهینه‌ساز در آموزش مدل یادگیری عمیق، علاوه بر بهینه‌ساز Adam، از مدل یادگیری عمیق آموزش دیده مبتنی بر الگوریتم بهینه‌ساز SGD با مولفه‌های یکسان در فراپارامترها، نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴)، نشان‌دهنده عملکرد مدل U-Net در تفکیک و طبقه‌بندی کاربری اراضی بر اساس تصاویر هوایی بر با دو الگوریتم بهینه‌ساز Adam و SGD می‌باشد. برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از مدل U-Net با داده‌های هوایی با قدرت تفکیک ۲۵ سانتی‌متر در باند مرئی با نتایج مطالعات پیشین مقایسه شد. جدول (۵) مقایسه‌ای بین

جدول ۴: نقشه پوشش کاربری توسط معماری U-Net به تفکیک هر بهینه‌ساز برای کل منطقه مورد مطالعه

Table 8: Land cover map generated by the U-Net architecture, separated by each optimizer, for the entire study area

تهیه شده توسط U-Net (Generated by U-Net)			
تصویر اصلی (Original)	تهیه شده توسط کارشناس خبره (Produced by an Expert)	بهینه‌ساز (Optimizer)	راهنما (Legend)
		Adam	SGD
			
		Background پس زمینه Building ساختمان Woodland جنگل Water آب Road جاده	

جدول ۵: ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی با نتایج مطالعات پیشین

Table 5: Evaluation of the proposed model's performance compared to previous studies

معیار ارزیابی (Evaluation Criteria)						مطالعات
امتیاز ژاکارد (Jaccard Score)	امتیاز F1 (F1 Score)	ضریب کاپا (Kappa Coefficient)	دقت کلی (Overall Accuracy)	بهینه‌ساز (Optimizer)	Studies	
-	58.00	-	76.00	Adam	Jonathan Solórzano et al. (2021)	جاناتان سولورزانو و همکاران ۲۰۲۱
-	-	78.10	82.20	Adam	Linh T. Giang et al. (2020)	توان لین جیانگ و همکاران ۲۰۲۰
-	54.10	-	90.50	Adam	Won-Kyung Baek et al. (2024)	وون کیونگ باک و همکاران ۲۰۲۴
56.00	-	72.50	-	Adam	Andrew Clark et al. (2023)	اندرو کلارک و همکاران ۲۰۲۳
54.45	92.63	79.59	92.47	Adam	This Study. (2024)	مطالعه حاضر ۲۰۲۴
51.71	15.89	4.51	44.56	SGD		

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل و طبقه‌بندی دقیق کاربری اراضی با استفاده از تصاویر هوایی و مدل یادگیری عمیق CNN مبتنی بر معماری U-Net پرداخته شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده عملکرد قوی و دقت بالای مدل در تفکیک انواع کاربری‌های اراضی مختلف می‌باشد. نتایج حاصله توسط سه معیار ارزیابی مهم به صورت زیر است:

○ امتیاز ژاکارد: امتیاز ژاکارد نیز در بررسی عملکرد، مدل ۵۴.۴۵ درصد محاسبه شد. این شاخص که معیار خوبی برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی تصویر است، در مدل پیشنهادی بهبود قابل توجهی را نشان داد. مقدار بالای امتیاز ژاکارد نشان‌دهنده توانایی مدل در شناسایی دقیق مرزهای کلاس‌های مختلف است.

○ ضریب کاپا: این ضریب برای ارزیابی توافق بین دسته‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و دسته‌های واقعی استفاده می‌شود. ضریب کاپا ۷۹.۵۹ درصد نشان‌دهنده توافق قوی بین نتایج مدل و داده‌های واقعی است.

○ دقت کلی: دقت کلی هدست‌آمده، ۹۲.۴۷ درصد بود که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در تشخیص و طبقه‌بندی صحیح پیکسل‌های تصاویر هوایی به کلاس‌های مختلف کاربری اراضی می‌باشد. این دقت بالا به دلیل استفاده از ساختار U-Net و بهره‌گیری از لایه‌های کانولوشن و عملیات رمزنگاری و رمزگشایی باشد که ویژگی‌های مکانی و معنایی تصاویر را به خوبی استخراج و پردازش می‌کنند.

مدل U-Net مورد استفاده در این مطالعه با توجه به ساختار ویژه خود توانست به خوبی ویژگی‌های مکانی و بافتی تصاویر هوایی را استخراج کند و به نتایج بسیار مطلوبی در طبقه‌بندی دست یابد. تصاویر خروجی حاصل از این مدل به وضوح نشان‌دهنده توانایی آن در تشخیص و تفکیک مناطق مختلف مانند جنگل‌ها، ساختمان‌ها، جاده‌ها و آب‌ها هستند. بررسی نتایج برای کلاس‌های مختلف کاربری اراضی

(ساختمان‌ها، جنگل‌ها، آب‌ها و جاده‌ها) نشان داد که مدل در شناسایی کلاس‌های با ویژگی‌های بارز مانند ساختمان‌ها و جاده‌ها عملکرد بهتری دارد. این به دلیل ویژگی‌های برجسته و مشخص این کلاس‌ها در تصاویر هوایی است. در مقابل، کلاس‌هایی با ویژگی‌های کمتر مشخص، مانند آب، ممکن است چالش‌های بیشتری برای مدل ایجاد کنند، اگرچه دقت آن‌ها نیز قابل قبول بود. استفاده از الگوریتم Adam برای بهینه‌سازی و تنظیم مناسب نرخ یادگیری و اندازه دسته‌ها به بهبود همگرایی مدل و کاهش خطاهای آموزشی کمک کرد. همچنین، استفاده از لایه‌های نرمال‌سازی دسته و حذف تصادفی به کاهش پدیده بیش‌برازش و بهبود کارایی مدل روی داده‌های جدید کمک کرد. زمان آموزش مدل نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که با استفاده از بهینه‌ساز Adam و تنظیمات مناسب فرآیند آموزش، مدل توانست در زمان مناسبی به همگرایی برسد. در مقایسه با روش‌های مرسوم و سایر معماری‌های یادگیری عمیق، U-Net با ساختار بهینه‌شده خود، توانسته است مرزهای بین کلاس‌های مختلف کاربری اراضی را با دقت بیشتری تشخیص دهد. این ویژگی‌ها، به همراه استفاده از تصاویر هوایی با قدرت تفکیک بالا و باند مرئی، نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی نه تنها در شناسایی دقیق کلاس‌ها مؤثر است بلکه قادر به بهبود قابل توجه دقت کلی طبقه‌بندی نیز می‌باشد. بدین ترتیب، استفاده از این مدل می‌تواند به عنوان رویکردی نوین و کارآمد در تحلیل و طبقه‌بندی کاربری اراضی مورد توجه قرار گیرد.

پیشنهاد‌های تحقیقات آتی

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و به منظور بهبود بیشتر دقت کارایی مدل‌های یادگیری عمیق در طبقه‌بندی کاربری اراضی، پیشنهاد می‌شود از تصاویر چند طیفی و ابرطیفی با ترکیب این تصاویر با داده‌های هوایی بهره‌گیری شود، زیرا این تصاویر می‌توانند اطلاعات بیشتری از

software and true color satellite images. *Sustain.* 2019 Oct 1;11(19). <https://doi.org/10.3390/su11195266>

[4] Kanmani K, Padmanabhan V, Pari P. Accuracy Assessment of different classifiers for Sustainable Development in Landuse and Landcover mapping using Sentinel SAR and Landsat-8 data. *EAI Endorsed Trans Energy Web.* 2023;10:1–10. <https://doi.org/10.4108/ew.4141>

[5] Hao M, Dong X, Jiang D, Yu X, Ding F, Zhuo J. Land-use classification based on high-resolution remote sensing imagery and deep learning models. *PLoS One [Internet].* 2024;19(4 April):1–16. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0300473>

[6] Boyle SA, Kennedy CM, Torres J, Colman K, Pérez-Estigarribia PE, De La Sancha NU. High-resolution satellite imagery is an important yet underutilized resource in conservation biology. *PLoS One.* 2014;9(1):1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086908>

[7] Mousavi, S. M., Ebadi, H., & Kiani, A. (2019). An optimized deep learning-based method for the spectral-spatial classification of high-resolution images in semi-urban areas. *Journal of Scientific Research in Surveying Science and Technology*, 9(2), December, 20. [in Persian]

[8] Sawant S, Ghosh JK. Land use land cover classification using Sentinel imagery based on deep learning models. *J Earth Syst Sci [Internet].* 2024 May 24;133(2):101.

[9] Zhao S, Tu K, Ye S, Tang H, Hu Y, Xie C. Land Use and Land Cover Classification Meets Deep Learning: A Review. *Sensors (Basel).* 2023;23(21). <https://doi.org/10.4108/ew.4141>

[10] Khankeshizadeh E, Mohammadzadeh A, Arefi H, Mohsenifar A, Pirasteh S, Fan E, et al. A Novel Weighted Ensemble Transferred U-Net Based Model (WETUM) for Postearthquake Building Damage Assessment From UAV Data: A Comparison of Deep Learning- and Machine Learning-Based Approaches. *IEEE Trans Geosci Remote Sens [Internet].* 2024;62:1–17.

[11] Unnikrishnan A, Sowmya V, Soman KP. Deep learning architectures for land cover classification using red and near-infrared satellite images. *Multimed Tools Appl.* 2019 Jul 15;78(13):18379–94. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-7179-2>

[12] Haq MA, Rahaman G, Baral P, Ghosh A. Deep Learning Based Supervised Image Classification Using UAV Images for Forest Areas Classification. *J Indian Soc Remote Sens.* 2021 Mar 1;49(3):601–6. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01231-3>

[13] Baek WK, Lee MJ, Jung HS. Land Cover Classification From RGB and NIR Satellite Images Using Modified U-Net Model. Vol. 12, *IEEE Access.* 2024. p. 69445–55. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3401416>

[14] Giang TL, Dang KB, Le QT, Nguyen VG, Tong SS, Pham VM. U-net convolutional networks for mining land cover classification based on high-resolution UAV imagery. *IEEE Access.* 2020;8:186257–73.

ویژگی‌های کاربری‌های موجود در سطح زمین فراهم کنند و دقت طبقه‌بندی را افزایش دهند. همچنین، ترکیب داده‌های طیفی مختلف به شناسایی بهتر کلاس‌های پیچیده کمک می‌کند. علاوه بر این، پیاده‌سازی و ارزیابی مدل‌های ترکیبی مانند ترکیب معماری U-Net با شبکه‌های توجه (Attention Networks) می‌تواند در تشخیص و تفکیک دقیق‌تر مرزهای کلاس‌های کاربری اراضی موثر باشد. بهینه‌سازی فرآیندها با استفاده از روش‌های جستجوی پیشرفته مانند جستجوی شبکه‌ای (Grid Search) و جستجوی تصادفی (Random Search) نیز به یافتن ترکیب بهینه پارامترها و در نتیجه بهبود کارایی مدل کمک می‌کند. استفاده از روش‌های یادگیری انتقالی و مدل‌های پیش آموزش‌دیده می‌تواند زمان آموزش مدل را کاهش داده و دقت آن را افزایش دهد، به ویژه در شرایطی که داده‌های آموزشی محدود هستند. اجرای این پیشنهادها می‌تواند دقت و کارایی مدل‌های یادگیری عمیق را در طبقه‌بندی کاربری اراضی ارتقا دهد و به کاربردهای گسترده‌تری در زمینه‌های مختلف علمی و عملی منجر شود.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش این مقاله به شرح زیر است: نویسنده اول مسئولیت گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله را بر عهده داشته است. نویسنده دوم به عنوان استاد راهنمای پژوهش، در طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام آن، بررسی و کنترل نتایج و همچنین اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله نقش داشته است. نویسنده سوم نیز در طراحی پژوهش مشارکت داشته و در مطالعه و بازبینی مقاله همکاری کرده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تمامی عزیزانی که در این تحقیق همکاری داشته‌اند، کمال قدردانی و سپاس خود را اعلام می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است»

منابع و مآخذ

- [1] Dyson J, Mancini A, Frontoni E, Zingaretti P. Deep learning for soil and crop segmentation from remotely sensed data. *Remote Sens.* 2019;11(16). <https://doi.org/10.3390/rs11161859>
- [2] Khan BA, Jung J woo. applied sciences Semantic Segmentation of Aerial Imagery Using U-Net with Self-Attention and Separable Convolutions. 2024. <https://doi.org/10.3390/app14093712>
- [3] Chapa F, Hariharan S, Hack J. A new approach to high-resolution urban land use classification using open access

hyperspectral remote sensing image classification. *Int J Remote Sens* [Internet]. 2020;41(7):2664–83. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1694725>

[27] Pashaei M, Kamangir H, Starek MJ, Tissot P. Review and evaluation of deep learning architectures for efficient land cover mapping with UAS hyper-spatial imagery: A case study over a wetland. *Remote Sens*. 2020 Mar 1;12(6). <https://doi.org/10.3390/rs12060959>

[28] Thompson WD, Walter SD. A reappraisal of the kappa coefficient. *J Clin Epidemiol* [Internet]. 1988 Jan;41(10):949–58.

[29] Fletcher S, Isla MZ. Comparing sets of patterns with the Jaccard index. Vol. 22, *Australasian Journal of Information Systems*. 2018. <https://doi.org/10.3127/ajis.v22i0.1538>

[30] M H, M.N S. A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations. *Int J Data Min Knowl Manag Process* [Internet]. 2015 Mar 31;5(2):01–11. Available from: <http://www.aircconline.com/ijdkp/V5N2/5215ijdkp01.pdf>. <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201>

[31] Boguszewski A, Batorski D, Ziemba-Jankowska N, Dziedzic T, Zambrzycka A. LandCover.ai: Dataset for Automatic Mapping of Buildings, Woodlands, Water and Roads from Aerial Imagery. 2020 May 5.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مهدی فرهنگ‌ی فارغ‌التحصیل مهندسی نقشه‌برداری از دانشگاه صنعتی اراک در سال ۱۴۰۲ است و در حال حاضر به عنوان دانشجوی استعداد درخشان در مقطع کارشناسی ارشد فتوگرامتری در دانشگاه شهید بهشتی مشغول به تحصیل است. او دارای سابقه فعالیت‌های علمی و پژوهشی

متعددی است که شامل مقالات پذیرش شده در حوزه‌های مختلفی از جمله پایش تغییرات کاربری اراضی، ارزیابی دقت روش‌های طبقه‌بندی در تحلیل کاربری اراضی، مدل‌سازی سری زمانی مکانی TEC یونسفری با استفاده از یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی و ارزیابی نظام کاداستر معدن می‌باشد.

وی همچنین به عنوان دبیر انجمن علمی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی اراک در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ فعالیت داشته است. او با تمرکز بر کاربرد هوش مصنوعی و به‌ویژه مدل‌های یادگیری عمیق در حوزه فتوگرامتری و سنجش از دور، به پژوهش و فعالیت‌های علمی در این زمینه‌ها پرداخته است.

Farhangi, M., M.Sc. Student in Photogrammetry, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

✉ m.farhangi@sbu.ac.ir

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030112>

[15] Solórzano J V., Mas JF, Gao Y, Gallardo-Cruz JA. Land use land cover classification with U-net: Advantages of combining sentinel-1 and sentinel-2 imagery. Vol. 13, *Remote Sensing*. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13183600>

[16] Clark A, Phinn S, Scarth P. Optimised U-Net for Land Use–Land Cover Classification Using Aerial Photography. *PFG – J Photogramm Remote Sens Geoinf Sci* [Internet]. 2023 Apr 13;91(2):125–47. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s41064-023-00233-3>. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00233-3>

[17] Al-Najjar HAH, Kalantar B, Pradhan B, Saeidi V, Halin AA, Ueda N, et al. Land cover classification from fused DSM and UAV images using convolutional neural networks. *Remote Sens*. 2019 Jun 1;11(12). <https://doi.org/10.3390/rs11121461>

[18] Mohrrami, M., & Nisani Samani, N. (2021). Comparison of deep learning and random forest methods in urban land cover classification (Case study: Tabriz city). *Journal of Scientific Research in Surveying Science and Technology*, 11(4), June, 23–11. [in Persian]

[19] Yadav TK, Chidburee P, Mahavik N. Land cover classification based on uav photogrammetry and deep learning for supporting mine reclamation: A case study of mae moh mine in lampang province, thailand. *Appl Environ Res*. 2021;43(4):39–54. <https://doi.org/10.35762/AER.2021.43.4.4>

[20] Yang S, Xiao W, Zhang M, Guo S, Zhao J, Shen F. Image Data Augmentation for Deep Learning: A Survey. 2022.

[21] Cubuk ED, Zoph B, Mane D, Vasudevan V, Le Q V. Autoaugment: Learning augmentation strategies from data. *Proc IEEE Comput Soc Conf Comput Vis Pattern Recognit*. 2019;2019-June(Section 3):113–23. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00020>

[22] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation BT - *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. In: Navab N, Hornegger J, Wells WM, Frangi AF, editors. Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 234–41. <https://doi.org/10.3390/rs11121461>

[23] Omi T, Ueda N, Aihara K. Fully neural network based model for general temporal point processes. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2019.

[24] Trabelsi K, Ammar A, Masmoudi L, Boukhris O, Chtourou H, Bouaziz B, et al. Sleep Quality and Physical Activity as Predictors of Mental Wellbeing Variance in Older Adults during COVID-19 Lockdown: ECLB COVID-19 International Online Survey. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2021 Apr 19;18(8):4329.

[25] Zhou Z, Rahman Siddiquee MM, Tajbakhsh N, Liang J. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. In 2018. p. 3–11.

[26] Bera S, Shrivastava VK. Analysis of various optimizers on deep convolutional neural network model in the application of



سعید صادقیان دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه تهران در رشته مهندسی نقشه برداری- فتوگرامتری است. وی علاوه بر تدریس در دانشگاه، دارای

سوابق علمی و اجرایی بسیاری نیز می باشد. او به عنوان عضو هیات تحریریه نشریه علمی پژوهش های سنجش از دور و اطلاعات مکانی فعالیت دارد و تجربه ریاست آموزشکده نقشه برداری سازمان نقشه برداری کشور در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲ را نیز دارا می باشد.

Sadeghian, S. Associate Professor at the Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ sa_sadeghian@sbu.ac.ir



اصغر میلان استادیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی نقشه برداری- فتوگرامتری می باشد. ایشان تا کنون

موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس های داخلی و بین المللی معتبر شده اند. زمینه های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، کاداستر و پردازش تصاویر می باشد

Milan, A. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

✉ a_milan@sbu.ac.ir

Citation (Vancouver): Farhangi M, Milan A, Sadeghian S. [Analysis and classification of land use using aerial imagery and deep learning based on U-Net architecture]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 277-292

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11250.1083>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Presenting a temporal-spectral signature model to identify and distinguish different plant species by using satellite images

P. Afzali Kordmahalleh¹, S. Behzadi^{*2}¹ Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University. Tehran, Iran² Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 12 June 2024
Reviewed: 221 July 2024
Revised: 24 August 2024
Accepted: 01 November 2024

KEYWORDS:

Object Recognition
Temporal-Spectral Signature
Satellite Imagery
Forest Species Classification

* Corresponding author

✉ s_bhezadi@sbu.ac.ir

☎ (+9821) 73932488

Background and Objectives: Object recognition is a widely discussed topic across various disciplines. However, identifying tree species in forests remains challenging due to their similar appearances and behaviors. This study aims to address this issue by leveraging the temporal-spectral signature model in Google Earth Engine (GEE) to differentiate forest plant species. The innovation of this research lies in determining the temporal-spectral behavior of tree species by calculating the brightness of satellite image bands across different months of the year, creating a unique matrix for each species.**Methods:** The study utilized Landsat 8 and 9 satellite imagery from 2016 to 2022, focusing on a section of the southern forests of Gilan province. Initially, spectral behavior curves for vegetation, land, and water were plotted. By coding in GEE, the average brightness values for each band were calculated, producing combined bar and line graphs for the three categories. Temporal-spectral signatures for tree species were then developed using typology maps and field surveys, with 200 data points collected for oak, hornbeam, beech, alder, and Bergan needle species. A matrix of 84×1 was formed, representing the temporal-spectral signature for each species, using Bands 1 to 7 of Landsat 8 across 12 months. MATLAB was employed to visualize the generated matrices.**Findings:** The results revealed distinct brightness levels in specific bands and months for different species. For instance, in the first band during the second month, brightness values for oak, hornbeam, beech, Bergan needle, and alder were 0.38, 0.31, 0.27, 0.46, and 0.25, respectively. The highest brightness levels for most species occurred in the fifth band during the tenth month. Classification using the random forest method with both 7-band and 84-band inputs showed that the innovative temporal-spectral signature approach improved the Kappa coefficient to approximately 0.4. This unique signature enables the accurate identification and differentiation of tree species, supported by field observations.**Conclusion:** The study demonstrates that temporal-spectral signatures can effectively differentiate tree species in forests, facilitating improved classification and monitoring. This approach holds potential for broader application to other species, paving the way for advanced forest management and monitoring by organizations such as natural resources and environmental agencies. Future research should extend this method to additional species to further enhance forest classification systems.

NUMBER OF REFERENCES

32



NUMBER OF FIGURES

15



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

ارائه مدل امضای طیفی زمانی به منظور شناسایی و تفکیک گونه‌های مختلف گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

پارسا افصلی کردمجله^۱، سعید بهزادی^{۲*}^۱ گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران^۲ گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: تشخیص اشیا یکی از موضوعات پرکاربرد در بسیاری از رشته‌ها است. با این حال، شناسایی گونه‌های درختی در جنگل‌ها به دلیل شباهت‌های ظاهری و رفتاری، چالشی اساسی محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف شناسایی عوارض و تفکیک گونه‌های گیاهی در جنگل‌ها به روش مدل امضای طیفی زمانی در سامانه گوگل ارث انجام شده است. نوآوری این پژوهش در تعیین رفتار طیفی زمانی گونه‌های درختی نهفته است؛ به این صورت که روشنایی باندهای تصاویر ماهواره‌ای در ماه‌های مختلف سال برای هر گونه محاسبه شده و ماتریسی منحصربه‌فرد ایجاد می‌شود.

روش‌ها: داده‌های اصلی این مطالعه شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ است و منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل‌های جنوب استان گیلان می‌باشد. در مرحله اول، نمودار رفتار طیفی گیاه، خشکی و آب ترسیم شد. میانگین مقادیر هر باند برای این سه عارضه در طول یک سال محاسبه شده و نمودارهای ترکیبی میله‌ای و خطی ایجاد شدند. در مرحله دوم، با استفاده از نقشه‌های تیپولوژی و برداشت‌های زمینی، ۲۰۰ نقطه داده برای گونه‌های بلوط، مرز، راش، توسکا و سوزنی‌برگ جمع‌آوری شد. با ایجاد مدلی، میانگین مقادیر هر باند در ماه‌های مختلف محاسبه شد و ماتریس ۸۴×۱ به عنوان امضای طیفی زمانی هر گونه ایجاد گردید. این ماتریس‌ها با استفاده از نرم‌افزار متلب نمایش داده شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که روشنایی باندها در ماه‌های مشخص برای هر گونه متفاوت است. به عنوان مثال، در باند اول ماه دوم، روشنایی گونه‌های بلوط، مرز، راش، سوزنی‌برگ و توسکا به ترتیب ۰.۳۸، ۰.۳۱، ۰.۲۷، ۰.۴۶ و ۰.۲۵ بود. بیشترین میزان روشنایی برای چهار گونه درختی در بلند پنجم ماه دهم و کمترین میزان در بلند هفتم ماه دوازدهم مشاهده شد. طبقه‌بندی با روش جنگل تصادفی و با استفاده از ۷ باند و ۸۴ باند انجام شد که ضریب کاپا در روش پیشنهادی به حدود ۰.۴ افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: امضای طیفی زمانی به عنوان یک روش منحصربه‌فرد، امکان شناسایی و تفکیک گونه‌های جنگلی را فراهم می‌کند. این پژوهش با استفاده از برداشت‌های زمینی دقت مناسبی را نشان داده است. پیشنهاد می‌شود این روش برای گونه‌های دیگر نیز به کار گرفته شود تا طبقه‌بندی جنگل‌ها بهبود یابد. این اقدامات می‌تواند مدیریت و نظارت بر جنگل‌ها را برای سازمان‌هایی نظیر منابع طبیعی و محیط زیست تسهیل کند.

تاریخ دریافت: ۲۳ خرداد ۱۴۰۳

تاریخ داوری: ۳۱ تیر ۱۴۰۳

تاریخ اصلاح: ۰۳ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۱ آبان ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

تشخیص اشیا

امضای طیفی-زمانی

تصاویر ماهواره‌ای

طبقه‌بندی گونه‌های جنگلی

* نویسنده مسئول

s_behzadi@sbu.ac.ir

۲۱-۷۳۹۳۲۴۸۸ ①

مقدمه

امروزه جنگل‌های شمال کشور، نیازمند مناسبترین و سریعترین روش تهیه اطلاعات و تلفیق آنها با یکدیگر برای برنامه ریزی و مدیریت بهینه می‌باشد [۲]. ضرورت تعیین عوارض، دلیلی شده است که علم سنجش از دور به کمک انسان بیاید. با کمک علم سنجش از دور و استفاده از تحلیل‌ها زمانی مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی، امکان شناسایی گونه‌های جنگلی فراهم می‌شود. این علوم به جمع‌آوری اطلاعات در مورد اشیا از راه دور در مکان‌ها و زمان‌های مختلف، معمولاً با ماهواره می‌پردازند. حجم بسیار زیاد تصاویر هوایی چند طیفی، منجر به کاهش شدید سرعت پردازش داده‌ها و بروز مشکلاتی در آرشیو و مدیریت آنها برای تولید نقشه گونه‌های درختی می‌شود [۳]. یکی از متداول‌ترین

جنگل‌ها از مهمترین منابع طبیعی هستند که وجودشان عاملی حیاتی برای زنده ماندن گونه‌های گیاهی و جانوری می‌باشد. از این رو مدیریت و برنامه‌ریزی برای جلوگیری از نابودی جنگل‌ها برای هر جامعه امری ضروری می‌باشد. یکی از امور ضروری در محیط زیست، تعیین و تفکیک گونه‌های جنگلی و تیپ‌بندی آنها می‌باشد. با این روش پایش و مدیریت جنگل آسان‌تر خواهد بود. نکته مهم در بهره‌گیری از تمام قابلیت‌های تصاویر در جنگلداری، اجرای روش بهینه طبقه بندی و استخراج اطلاعات مفید است [۱]. از طرفی به دلیل وسعت زیاد مناطق جنگلی، شناسایی گونه‌های درختی به صورت سنتی و دستی غیرممکن است.

به ترتیب با ۰/۹۴ و ۹۵/۳ است [۹]. روحانی و همکاران با استفاده از تصاویر لندست به مطالعه تغییرات محیط زیستی و پیرامونی در استان قم از سال ۱۹۸۹ میلادی تا ۲۰۱۹ پرداختند. تصاویر مربوطه پردازش و در ۱۱ کلاس طبقه‌بندی شد. دو روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و کمترین فاصله در استان قم مناسب ارزیابی گردید. نتایج طبقه‌بندی مربوط به تصاویر اخذشده در سال ۲۰۱۹، رشد مثبت مشهود در کلاس های شهری، کشاورزی، انواع مرتع و پهنه های آبی را نشان داد [۱۰].

خدامی و همکاران با هدف جلوگیری از نابودی درختان بلوط، در شهرستان گیلانغرب، رفتار طیفی جنگل‌های آلوده به زوال بلوط قبل و بعد از اجرای برش بهداشتی را توسط تصاویر ماهواره لندست ۸ از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ بررسی کردند. ۳۰ نقطه در منطقه تعیین و شاخص های گیاهی NDVI، WDI، SAVI و NDWI استخراج شد. نتایج نشان داد که نمودار رفتار طیفی بعد از اجرای برش بهداشتی تا سال ۱۳۹۷ روند صعودی داشته است [۱۱]. اسمی‌زاده و همکاران در پژوهشی به‌وسیله علم سنجش از دور، تغییرات کربن آلی خاک (SOC) در جنگل‌های استان خوزستان طی ۲۰ سال گذشته را برآورد کردند. تصاویر سنجنده‌های OLI ماهواره لندست ۸ و ETM+ ماهواره لندست ۷ در سال ۲۰۱۶ گردآوری شد. استفاده از روش‌های مختلف رگرسیون خطی ارتباطی میان SOC و نسبت‌های انعکاسی باندهای ماهواره لندست و شاخص‌های گیاهی و رطوبتی مانند NDVI، SAVI، BSCI و NDMI و NSMI پیدا شد. در نتیجه ارتباط میان مواد آلی خاک و انعکاس‌های محدوده طیفی قرمز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه تایید شد [۱۲].

رضایی و همکاران در مورد مدیریت و پایش اراضی آبی در بحث مصرف آب با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به تحقیق پرداختند. هدف اصلی طبقه‌بندی اراضی دشت عباس دهلران در سال آبی ۲۰۲۲ بود. داده‌های اصلی پژوهش شاخص NDVI و سری زمانی تصاویر سنتینل ۲ (باندهای ۴ و ۸) برای ۳ ماه اسفند، فروردین و اردیبهشت بود. دقت طبقه‌بندی انجام‌شده بر اساس نقشه‌های کاداستر، برای اراضی آبی ۹۸.۴٪ و برای اراضی دیم مقدار ۸۶.۷٪ محاسبه شد [۱۳].

جلیلی و همکاران با استفاده از روش های تحلیل طیفی سری زمانی به بررسی علل افت تراز دریاچه ارومیه پرداختند. ترکیب روش های تخمین طیفی چندکاهنده و آنالیز طیف تکین در این تحقیق بررسی شد که نتایج دوره های معنی دار بلندمدت را در سری زمانی تراز دریاچه نشان داد [۱۴]. کوکبی و همکاران یک ماژول مکانی طیفی ارائه شده که قادر به استخراج امضای طیفی است. این ماژول پیکسل‌های نواحی مرزی میان دو یا چند ناحیه کلاستر را شناسایی و این نواحی ناهمگن مکانی را حذف می‌کند. هدف ماژول مستقل پیشنهادی، کاهش خطای RMSE تصویر بازسازی شده است [۱۵].

موسایی کردشاهی و همکاران در پژوهشی به رفتار طیفی گونه‌های زبان گنجشک، نارون و سرو در دو حالت آلوده و شاهد را بررسی کردند. این تحقیق در بخشی از بزرگراه امام خمینی اصفهان صورت پذیرفت. همچنین شاخص‌های طیفی حساس به استرس و کلروفیل محاسبه شد. نتایج مدل شبکه

شیوه‌ها برای تشخیص عوارض توسط تصاویر ماهواره‌ای استفاده از بازتاب نور در باندهای مختلف است. ترکیب میانگین مقدار این باندها، امضا و رفتار طیفی هر عارضه را نشان می‌دهد. همانگونه که اثرانگشت هر انسان با دیگری فرق می‌کند، امضای طیفی هر عارضه نیز منحصر بفرد است. این خصوصیت در واقع بیانگر رفتار بازتابی عارضه در طول موج های متفاوت می‌باشد [۴]. از کاربردهای مهم امضای طیفی می‌توان به بررسی تغییرات و شناسایی عوارض اشاره کرد. با مدل‌سازی و تحلیل‌های مربوط، رفتار طیفی عوارض تعیین و بطور خودکار طبقه‌بندی می‌شوند. جهت فهم بهتر مطالب، درباره پیشینه موضوع موردنظر مطالعه شده است. عباسی و همکاران اقدام به بررسی رفتار بازتاب طیفی برگ درختان زبان گنجشک سرو و نارون کردند. این گونه‌های درختی در قسمتی از بزرگراه امام خمینی اصفهان قرار داشتند که در معرض آلودگی ترافیکی بودند. شاخص‌های طیفی حساس به استرس و کلروفیل بررسی گردید که نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تفکیک گونه های شاهد و آلوده با استفاده از شاخص های طیفی PRI NDVI Gitelson به ترتیب دارای صحت ۵/۶۲٪ و ۵/۸۷٪ بود [۵]. ایمانی‌فر و حسنلو بر این باور بودند که ترکیب داده‌های سنجنده‌های متفاوت می‌تواند منجر به پیدایش تغییرات کاذب در شاخص‌های گیاهی گردد. بدین منظور باید کالیبراسیون نسبی انجام گیرد. لذا پژوهشی با هدف حذف تغییرات کاذب ناشی از تفاوت های توابع حساسیت طیفی و شبیه‌سازی منحنی‌های رفتار طیفی، توسط مدلی خطی، کالیبراسیون سنجنده‌های لندست نسبت به سنتینل-۲ صورت پذیرفت. نتایج نشان‌دهنده قابلیت پیوستگی بالای مقادیر بازتابش مادون قرمز و شاخص NDVI میان این دو مجموعه بود [۶]. رنجبر اسلاملو و همکاران به بررسی رفتار بازتابندگی طیفی نهال بلوط ایران (Qurecus Brantii) متأثر از غلظت-های مختلف گردوغبار در محیط آزمایشگاهی پرداختند. اندازه‌گیری طیفی سطح تاج پوشش با دستگاه اسپکترورادایومتر Fieldspec3 انجام شد و شاخص‌های طیفی PVI، DVI، NDVI و SAVI2 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، شاخص های گفته شده روش های مناسبی برای تخمین میزان اثر پذیری از تنش گرد و غبار می‌باشند [۷].

موسایی و همکاران به‌منظور آگاهی از وضعیت سلامتی درختان اقدام به اندازه‌گیری رفتار طیفی درختان زبان گنجشک در دو مکان متفاوت از نظر میزان آلودگی ترافیکی کردند. این عمل توسط اسپکترورادایومتر Spec3 Field ASD در طول موج ۲۵۰-۳۵۰ نانومتر صورت پذیرفت. نتایج آنالیز واریانس ها ANOVA اختلاف معنی‌داری را بین بازتاب طیفی زبان گنجشک در دو محیط آلوده و غیرآلوده با سطح اطمینان ۹۵٪ نشان داد [۸].

مردانه و همکاران به منظور تعیین آفات، تغییرات طیفی گندم آتیلا و گندم کوهی را بررسی کردند. این پژوهش در منطقه دشت مغان شهرستان پارس‌آباد با استفاده از ماهواره‌های IRS و لندست ۸ انجام شد. از بین شاخص‌های استرس و سبزی‌نگی پوشش گیاهی، شاخص GNDVI بیشترین کارایی را داشت و توانست ۸۱٪ وضعیت مناطق را درست برآورد کند. شاخص GVI دارای بیشترین مقدار ضریب کاپا و صحت کلی

وضعیت فیزیولوژیکی ظریف است. پژوهش یادشده کمک می‌کند که در چه شرایطی تغییرات طیفی یک شاخص مفید برای نظارت بر تنوع زیستی است و چگونه می‌توان آن را در شبکه‌های نظارتی ادغام کرد [۲۳]. یو و همکاران پژوهشی را در رابطه با بیماری پژمردگی کاج (PWD) براساس تصاویر فراطیفی مبتنی بر وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین انجام دادند. باندهای قرمز، سبز و آبی و تصویر فراطیفی چندزمانه بدست آمد. ویژگی‌های طیفی هر تاج درخت، مانند بازتاب طیفی، مشتقات طیفی مرتبه اول و دوم، و شاخص‌های پوشش گیاهی محاسبه گردید. نتیجه گرفته شد که تصاویر فراطیفی مبتنی بر پهباد برای نظارت بر بیماری پژمردگی کاج کارآمد است [۲۴]. ژانگ و همکاران به دلیل فنولوژی سالانه متفاوت هر محصول، مدل برازش شده با دمای انباشته (AT) و شاخص گیاهی (VI) را ایجاد کردند. این مدل براساس تصاویر Landsat 8، Sentinel2 و دمای سطح زمین در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بود. این تحقیق ثابت کرد که ویژگی‌های طبقه‌بندی سری VI-AT در سال‌های مورد آزمایش تفاوت‌های درون کلاسی کمتری دارند [۲۵]. باتوجه به مطالعات انجام داده شده مشخص می‌گردد که شناسایی عوارضی که تفاوت فاحشی با هم دارند، بوسیله تصاویر ماهواره‌ای قابل انجام می‌باشد. اما مشخص کردن یک گونه گیاهی یا تعیین محصولات کشاورزی، حتی تعیین آب شیرین یا شور نیاز به بررسی گسترده‌تری دارد. پژوهش حاضر با هدف شناسایی عوارض گوناگون و به‌خصوص طبقه‌بندی و تفکیک گونه‌های گیاهی بوسیله امضای طیفی زمانی، اقدام به ایجاد منحنی رفتار و امضای طیفی گونه‌های بلوط، ممرز، راش، سوزنی برگان و توسکا کرده است.

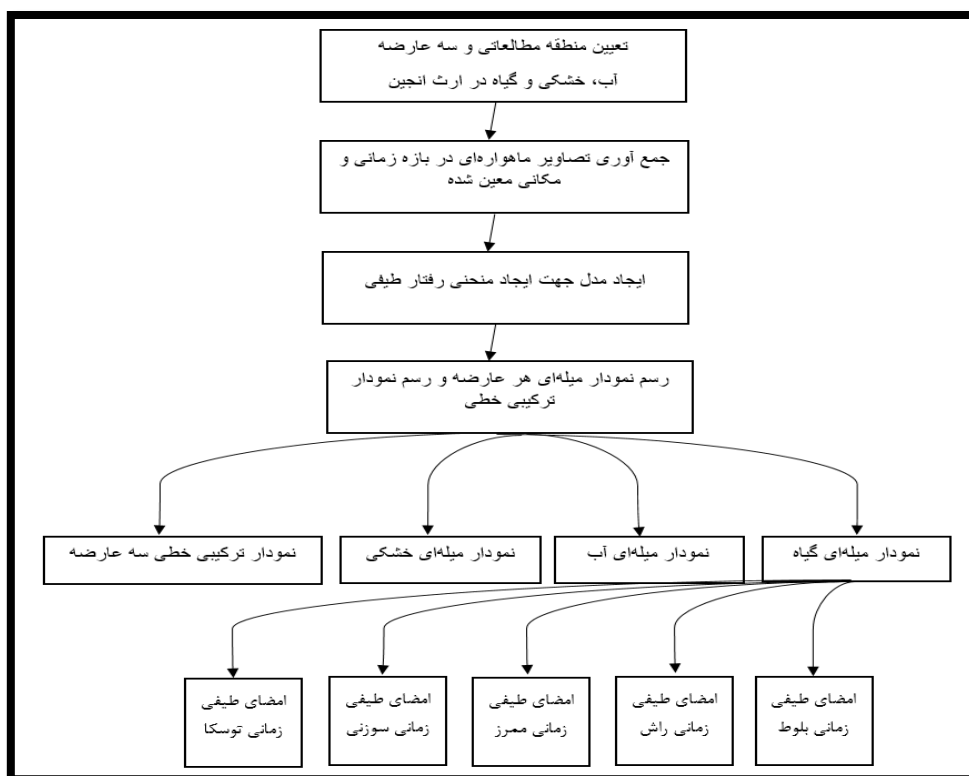
روش تحقیق

با گسترش علم و تکنولوژی بسیاری از اعمالی که خطای انسانی در آن وجود داشت و زمانبر بود، امروزه توسط ماشین‌ها و نرم‌افزارهای مخصوص قابل انجام می‌باشد [۲۶]. به عنوان مثال امروزه شناسایی اجسام با استفاده از تصاویر، شکلی جدید به خود گرفته است. طوریکه هوش مصنوعی قادر به انجام این کار است [۲۷]. با این حال در شناخت عوارض توسط تصاویر ماهواره‌ای همچنان دچار مشکل بوده و دارای خطا است. از آنجا که یکی از مشکلات همیشگی در سنجش از دور، تعیین نوع عارضه و طبقه‌بندی آنها است، این پژوهش با هدف شناسایی عوارض روی زمین بوسیله تصاویر ماهواره‌ای، به بررسی مناطق و عوارض مختلف توسط ماهواره‌ای لندست ۸ در سامانه گوگل ارث انجام پذیرفته است [۲۸]. اساس کلی پژوهش برپایه منحنی رفتار طیفی عوارض می‌باشد. به این معنی که در تصاویر ماهواره‌ای هر عارضه انعکاس مشخصی را دارد و با ایجاد آن می‌توان هر عارضه را در مناطق مختلف شناسایی کرد [۲۹، ۳۰]. در این راستا بررسی مقدار عددی هر باند از عوارض شبیه به هم، می‌تواند یک امضای طیفی یا منحنی رفتار طیفی منحصر بفرد برای هر جسمی ایجاد کند [۳۱، ۳۲]. در ابتدا با فلوجارت شکل (۱) مراحل کار به‌صورت مختصر بیان شده است.

عصبی مصنوعی با استفاده از شاخص‌های طیفی برای تفکیک گونه‌های شاهد و آلوده دارای صحت کلی ۷۳/۴٪ بود [۱۶]. قدیمی و همکاران تاثیر گردوغبار بر روی گیاه را توسط سنجش از دور را مورد مطالعه قرار دادند. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شناسایی باندهایی که گردوغبار بر روی آن تاثیرگذار است، شاخص‌های مدنظر تشکیل شد. نتایج نشان داد که بررسی تاثیر گرد و غبار بر روی گیاه با استفاده از این شاخص‌ها شانس کمتری جهت شناسایی شدن دارند. همچنین مشاهده شد که گرد و غبار موجود بر روی گیاه با استفاده از دو روش ولج و مولتی تیپر بهتر قابل شناسایی می‌باشد [۱۷]. هاشمی تنگستانی و همکاران در پژوهشی آشکارسازی واحدهای سنگی کمپلکس سوریان در شمال شرق فارس را هدف قرار دادند. بدین منظور از دسته داده‌های استر و سنتینل ۲ استفاده کردند. برای آشکارسازی واحدهای سنگی منطقه از روش‌های نسبت‌گیری باندی بر روی ۹ باند بازتابی سنجنده استر و روش تحلیل مولفه‌های اصلی بر روی ۹ باند سنتینل ۲ و استر استفاده شد. این پردازش‌ها توانست، واحدهای سنگی کلریت‌اپیدوت شیست، کالک شیست، میکاشیست و همچنین دایک‌های دیابازی و کوارتزیتی را تفکیک کند [۱۸]. رسولیان و همکاران در تحقیقی دست به آشکار سازی تجربی آب‌های کدر و شفاف سد سفیدرود بوسیله تصاویر سنجنده سنتینل-۲ با اتکا به رفتار طیفی آب کدر و شفاف زدند. توسط منحنی رفتار طیفی این آب کدر و شفاف و همچنین شاخص OIF، ترکیب‌های رنگی بهینه تولید شد. در محدوده طول‌موج‌های ۰/۴ تا ۰/۸۷ میکرومتر، این دو پدیده به خوبی قابل تفکیک از هم و سایر پدیده‌ها هستند [۱۹]. کومار و همکاران به تولید امضای طیفی و استخراج ویژگی از کلاس‌های کاربری زمین با استفاده از تصاویر لندست چندزمانه و چندطیفی بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ اقدام کردند. برای پایش سلامت باغات از شاخص پوشش گیاهی VI استفاده شد. نتایج مطالعه ارائه شده حاکی از آن است که تغییرات قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه رخ داده است که بر محیط زیست و فعالیت‌های انسانی تأثیر گذاشته است [۲۰]. شریفی و همکاران با هدف بالا بردن دقت طبقه‌بندی تصاویر ابرطیفی، معماری جدیدی از شبکه‌های عصبی را معرفی کردند. این معماری از بردار طیفی مکانی حاصل از ترکیبات مختلف ویژگی‌های مکانی استفاده می‌کند. نتایج نشان‌دهنده بهتر بودن روش پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌ها بود [۲۱]. ورمولن و همکاران به برآورد FVC برای مدیریت پایدار، توسط تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 8، آنالیز طیفی و ژئوپردازش ابری در سامانه گوگل ارث انجام پذیرا شدند. نتایج نشان داد که Sentinel-2 با استفاده از ترکیب باند SWIR2 و شاخص‌های مدنظر بهترین عملکرد را دارد. این مطالعه به برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار زیست‌محیطی و اقتصادی مرتع کمک شایانی می‌کند [۲۲]. فاسناخت و همکاران به بررسی روابط علی ارتباط بین تنوع طیفی و تنوع زیستی گیاهی یا به اصطلاح فرضیه تنوع زیستی (SVH) پرداختند. تحقیقات نمایان ساخت که تغییرات طیفی ناشی از گونه‌ها یا ویژگی‌های عملکردی در مقایسه با سایر عوامل مانند فصلی و

می‌شود. همچنین داده‌های استفاده‌شده مربوط به تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و اندست ۹ است که بنابر موضوع تحقیق با استفاده از فیلترهای زمانی، مکانی و درصد وجود ابر در هر تصویر محدود می‌شوند و در سامانه ارث انجین جهت انجام تحلیل‌های زمانی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیگر داده مورد استفاده از تحقیق شیپفایل تیپولوژی گونه‌های درختی قسمت جنوبی استان گیلان می‌باشد. ابتدا سه نقطه در سامانه به‌عنوان خشکی، گیاه و آب در نظر گرفته شده است. نقطه خشکی در دشت کویر (قرمز)، نقطه گیاه در جنگل‌های شمال ایران (سبز) و نقطه آب در دریای خزر (آبی) تعیین شد که در شکل (۲) دیده می‌شود.

بدین منظور در مرحله اول با روش یادشده به شناسایی آب، گیاه و خشکی پرداخته شد. پس از بررسی صحت طبقه‌بندی این سه عارضه، مرحله دوم که هدف اصلی تحقیق می‌باشد، یعنی تعیین نوع گونه‌های گیاهی، هدف قرار می‌گیرد. برای جمع‌آوری داده و تحلیل آن‌ها نیاز به سامانه‌ای قدرتمند می‌باشد. سامانه گوگل ارث انجین به دلیل گردآوری تصاویر با حجم کم و تحلیل زمانی مکانی با سرعت بالا در این پژوهش بکار گرفته شده است. ایجاد توابع متعدد و ساخت مدل‌های گوناگون از دیگر مزیت‌های این سامانه می‌باشد. منطقه مطالعاتی پژوهش قسمت شمالی ایران می‌باشد که تمام عوارض خشکی، گیاه و آب در آن رویت



شکل ۱: فلوچارت مراحل کار

Fig. 1: Flowchart



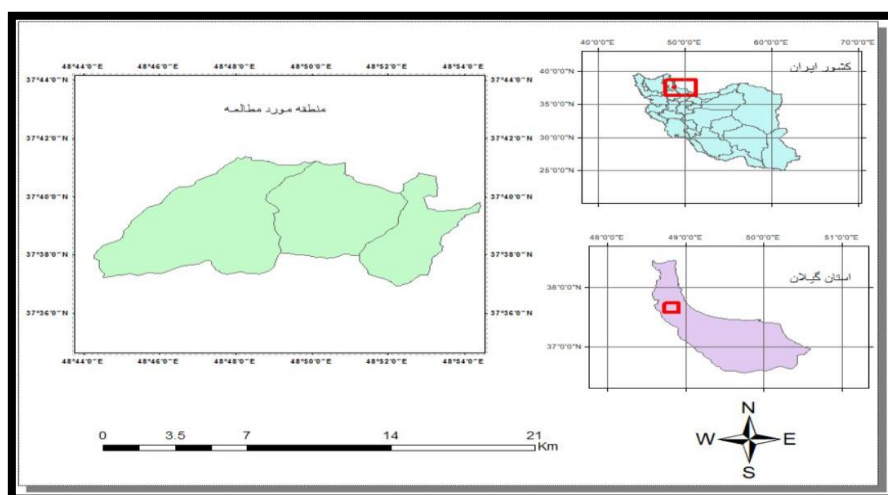
شکل ۲: عوارض خشکی (قرمز)، گیاه (سبز) و آب (آبی) بر روی نقشه

Fig. 2: Land (red), plant (green), and water (blue) on the map

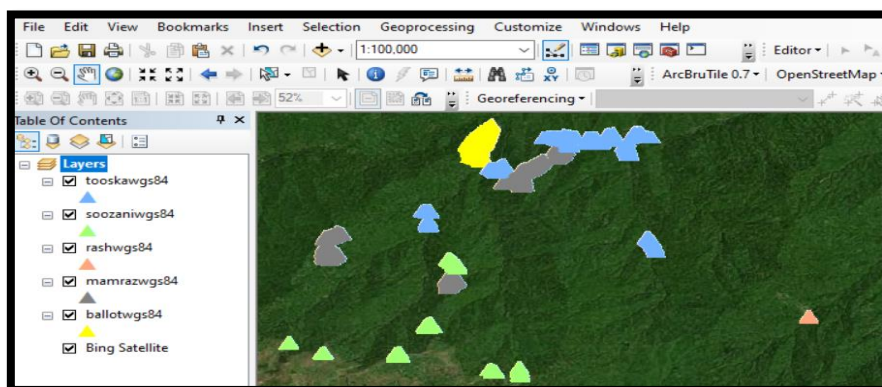
تعیین گونه‌های درختی بوسیله امضای طیفی که مختص هر گونه است، آغاز می‌گردد. از آنجا که گونه‌های درختی شباهت‌های زیادی با یکدیگر دارند و به‌راحتی قابل تمایز نیستند، تعیین میزان روشنایی هر گونه و تعیین امضای طیفی آن امکان شناسایی گونه‌های مختلف را فراهم می‌کند. برای این کار ۵ گونه بلوط، ممرز، راش، توسکا و سوزنی‌برگان مورد بررسی قرار می‌گیرند. منطقه مطالعاتی در بخش دوم پژوهش قسمتی از جنگل‌های جنوب استان گیلان است که در شکل (۳) قابل رویت می‌باشد.

با استفاده از تیپولوژی قسمتی از جنگل‌های گیلان و برداشت‌های زمینی، نقاط تست برای هر گونه مشخص شد. تعداد این نقاط برای هر کدام از گونه‌ها ۲۰۰ در نظر گرفته شد. از آنجا که تیپولوژی جنوب جنگل‌های گیلان بصورت شیپفایل در اختیار قرار گرفته بود، با استفاده از نرم‌افزار آرکمپ نقاط تست برای ۵ گروه اصلی قابل مشاهده در شکل (۴) انتخاب و سپس به ارث انجین وارد شد. نکته مهم در این قسمت اصلاح سیستم مختصات به WGS84 می‌باشد که گروه‌های ایجاد شده به‌طور صحیح بر روی نقشه در ارث انجین جانمایی شوند.

بعد از تعیین نقاط مورد مطالعه، مدلی در سامانه ایجاد می‌شود. این مدل قادر به گردآوری تمام تصاویر سال ۲۰۲۲ در محدوده جغرافیایی مدنظر، با فیلتر ابری کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. از آنجا که قسمتی از برخی تصاویر پوشش ابری داشتند، با استفاده از دستور میانه (median) یک تصویر جامع اخذ گردید. با تشکیل تصویر میانه و جانمایی نقاط بر روی آن، مقدار عددی هر باند برای سه عارضه خشکی، گیاه و آب محاسبه می‌شود. برای نمایش و درک بهتر مقادیر، از نمودار میله‌ای استفاده گردید. محور افقی نمودار، نشان‌دهنده باندهای ۱ تا ۷ تصویر می‌باشد و محور عمودی، مقدار عددی هر باند عارضه مدنظر را نمایش می‌دهد. درواقع با این مدل نمودار رفتار طیفی سه عارضه تشکیل می‌شود. در بخش دیگری از پژوهش تعیین سه نوع عارضه به کمک تصاویر لندست ۹ در دستور کار قرار گرفت. نتایج این بخش هم در یک نمودار خطی ترکیبی دوبعدی نمایش داده شد. به‌صورتی که نمودار حاصل نشانگر میزان روشنایی هر عارضه در ۷ باند می‌باشد. پس از تشکیل نمودار منحنی رفتار عوارض، مشخص می‌شود که با این روش امکان شناسایی خشکی، آب و گیاه از یکدیگر با خطای نسبتاً کمی وجود دارد. پس از آگاهی از عملکرد مناسب در مرحله اول، مرحله دوم که



شکل ۳: منطقه مورد مطالعه در مرحله دوم
Fig. 3: The studied area in the second stage



شکل ۴: منطقه مورد مطالعه در مرحله دوم
Fig. 4: The studied area in the second stage

نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، ابتدا عوارض مورد مطالعه بر روی نقشه در سامانه گوگل ارث انجین تعیین می‌شود. نقطه خشکی در دشت کویر به رنگ قرمز، نقطه جنگل در جنگل‌های شمال کشور ایران به رنگ سبز و نقطه آب در دریای خزر با رنگ آبی در شکل ۱ قابل مشاهده است. تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ با توجه به منطقه مطالعاتی و زمان معین گردآوری شده و با جانمایی عوارض سه‌گانه بر روی آن، مدلی در سامانه گوگل ارث انجین ساخته شد که قادر به برآورد میانگین مقدار باندهای ۱ تا ۷ برای هریک از عوارض می‌شود. پس از تعیین این مقادیر، همانطور که در شکل‌های (۶) تا (۸) دیده می‌شود، نمودار میله‌ای هر عارضه ترسیم می‌شود. برای ایجاد نمودار میله‌ای تابعی ساخته شد که محور عمودی آن مقادیر تعیین شده (میزان روشنایی) و محور افقی نام باندهای ۱ تا ۷ در لندست-۸ می‌باشد. میزان روشنایی باندهای آب، خشکی و گیاه به ترتیب در بازه‌های ۰/۰۰۱ - ۰/۰۱۷، ۰/۱۲ - ۰/۴۲ و ۰/۰۲ - ۰/۳ محاسبه شد.

در جدول (۱) به تفکیک مقدار روشنایی هر یک از سه عارضه آب، خشکی و گیاه آورده شده است.

به‌منظور بررسی بیشتر، داده‌های لندست-۹ نیز مورد بررسی قرار گرفت و تابع خطی ترکیبی سه عارضه یا همان منحنی رفتار طیفی در شکل (۹) ایجاد شد. این نمودار نیز تفاوت بین سه گروه را به خوبی نمایان می‌سازد. با مشاهده نمودار نتیجه گرفته می‌شود که سه عارضه آب، گیاه و خشکی کاملاً از هم قابل جداسازی هستند. لذا برای واکاوی بیشتر و تخصصی‌تر روی گونه‌های گیاهی، در مرحله بعد با روشی جدید و منحصربفرد به تعیین رفتار طیفی زمانی گونه‌های مختلف در جنگل‌های شمال ایران پرداخته شده است.

حال که جداسازی سه عارضه خشکی، گیاه و آب موفقیت‌آمیز بود، امکان بررسی و تعیین گونه‌های گیاهی که از نظر ساختار با یکدیگر شباهت دارند، فراهم می‌شود. ابتدا برای اطمینان از شباهت ذاتی گونه‌های جنگلی، نمودار خطی (منحنی رفتار) سه گونه توسکا، افرا و مرمر ترسیم شد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که سه گونه آزمایش شده در باندهای ۱ تا ۷ بسیار رفتاری شبیه به هم دارند و اعداد آنها به یکدیگر نزدیک است. لذا تشخیص و تفکیک آنها از هم سخت بوده و اگر قابل انجام باشد، با خطا همراه خواهد بود.

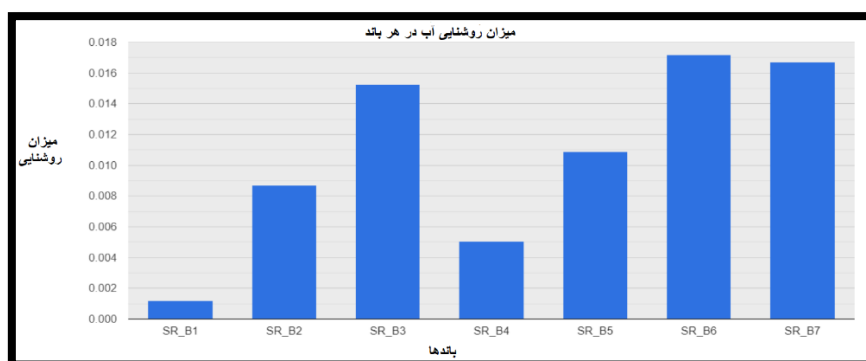
در سامانه گوگل ارث انجین تمام تصاویر ماهواره لندست-۸ که پوشش گیاهی کمتر از ۲۰ درصد داشتند بصورت ماهانه، گردآوری شد. باتوجه به هدف تحقیق و وجود مجموعه نقاط تست گونه‌ها، تابعی جهت محاسبه میانگین ماهانه تمام باندهای ۱ تا ۷ برای هر گیاه در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ ایجاد گردید. تابع ابداعی قادر است که میانگین مقدار هر باند را در ماهی خاص تعیین کند. بطور مثال باند ۱ گونه توسکا در ماه اول میلادی مقدار ۰.۱۵ را به خود اختصاص داده است که از میانگین‌گیری نقاط گروه توسکا در ماه‌های اول هر سال بوجود آمده است. این عمل برای ۱۱ ماه دیگر توسکا نیز انجام می‌شود. پس از تشکیل ماتریس یک گونه، ماتریس دیگر گونه‌ها نیز به صورتی که گفته شد، ایجاد می‌شود. از آنجا که در این مطالعه به بررسی ۷ باند در ۱۲ ماه از سال پرداخته شده است، برای هر گونه گیاهی یک ماتریس 84×1 ایجاد می‌شود. این ماتریس در واقع همان امضای طیفی هر گونه می‌باشد. باتوجه به امضای طیفی مختص به گونه‌ها، امکان شناسایی هر نوع گیاه با دقتی قابل قبول ممکن خواهد شد. پس از تشکیل ماتریس، برای نمایش بهتر نیاز به استفاده از نرم‌افزار متلب می‌باشد. در متلب، ماتریس 84×1 هر کدام از گونه‌های گیاهی را تبدیل به ماتریس‌های 12×7 می‌شوند. دلیل آن هم این است که در حالت گفته شده، هر سطر ماتریس مربوط به یک ماه از سال و هر ستون از ماتریس مربوط به باندهای ۱ تا ۷ می‌شود. به عنوان مثال ماتریس گروه بلوط در شکل (۵) نمایش داده شده است. حال با استفاده از دستوراتی همچون `imtools` در متلب امضای طیفی هر کدام از گونه‌ها به صورت گرافیکی نمایش داده می‌شود.

در انتها نیز برای بررسی صحت این روش، با استفاده از داده‌های آموزشی و تست موجود، طبقه‌بندی گونه‌های درختی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی یکبار با ۷ باند و بار دیگر با 84 باند مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا داده‌های آموزشی وارد سامانه ارث انجین شدند و با دستور `merge()` در یک مجموعه قرار گرفته و بوسیله ID مخصوص از یکدیگر متمایز می‌شوند. سپس با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و دستور `ee.Classifier.smileRandomForest()` یکبار با باندهای ۱ تا ۷ و بار دیگر بوسیله باندهای ۱ تا 84 طبقه‌بندی انجام می‌شود. در ادامه با واردکردن داده‌های تست و مقایسه آنها با طبقه‌بندی انجام شده، ضریب کاپا برای هر دو روش بدست می‌آید.

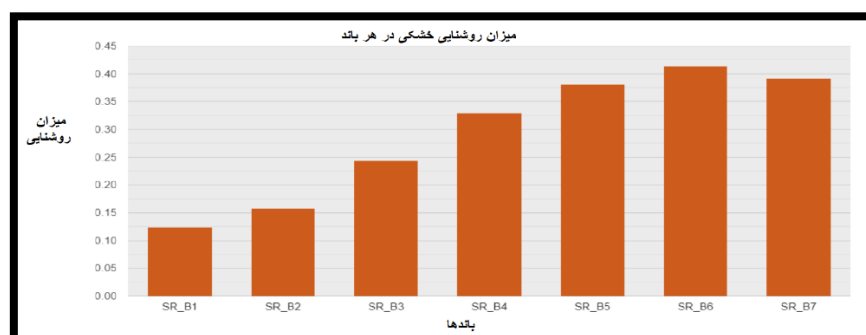
```
baloot [0.165294534397371 0.1413797095171676 0.111761867322705 0.11075756083096354 0.2043817816071274 0.23111884120451517 0.15934905185064008;
0.3788512202580113 0.3634603922524728 0.3257905386449877 0.3320799125127556 0.3739761752037963 0.22622869757950798 0.17086442292106052
0.13026151941581207 0.11140422264406503 0.09492780856233983 0.09911584817180949 0.21035630631545357 0.260822736588884 0.18122712097877314
0.28641516302735354 0.2689567705816474 0.24701396850022403 0.2365914628771711 0.37460188038093 0.2008094048697101 0.14438678468923924
0.11300205731810617 0.09218770456461867 0.08556668897551939 0.05614771801701262 0.4297552103838645 0.20412724656014403 0.09032327971182579
0.29090166719984417 0.27097104144983053 0.2456255934455178 0.23096450609116514 0.4801211013527941 0.29813131178952446 0.19339920968309907
0.1475988797658731 0.1263231987610829 0.11003944145377018 0.08917269184569682 0.35735446054580783 0.19725424217537416 0.09875107658180324
0.11191002150212438 0.09160446366372187 0.07995949199130713 0.0603565872793109 0.32018782925014655 0.180490601530745 0.08026929750792251
0.1779462933417194 0.15563985643800626 0.13350590826435524 0.11717115966064379 0.2966673828599867 0.2011595176886921 0.12012267660749845
0.5357727529096209 0.5249023664096171 0.48915825082250863 0.5016573360882515 0.5753902539241412 0.23229055857855427 0.2060494557761949
0.1489005201488487 0.11980007807454787 0.09731781008568677 0.08537796880157034 0.24916462489396088 0.17611623712438196 0.08946543048359146
0.1375063428701448 0.11398831462441397 0.08923190824441181 0.09217915657815362 0.20786035079355084 0.26593056071765164 0.173113212943816]
```

شکل ۵: ماتریس 12×7 گونه بلوط

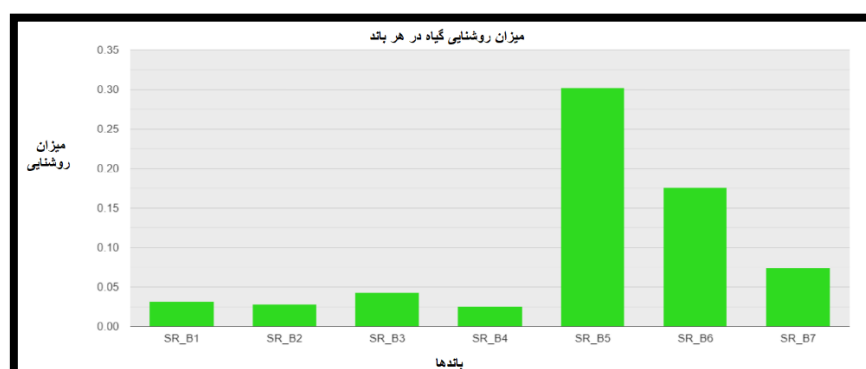
Fig. 5: 7x12 matrix of oak species



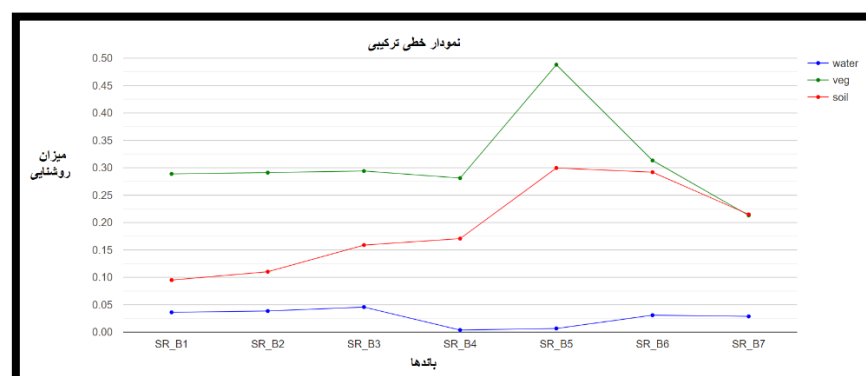
شکل ۶: میزان روشنایی آب در هر باند
Fig. 6: The brightness of the water in each band



شکل ۷: میزان روشنایی خشکی در هر باند
Fig. 7: The brightness of the land in each band



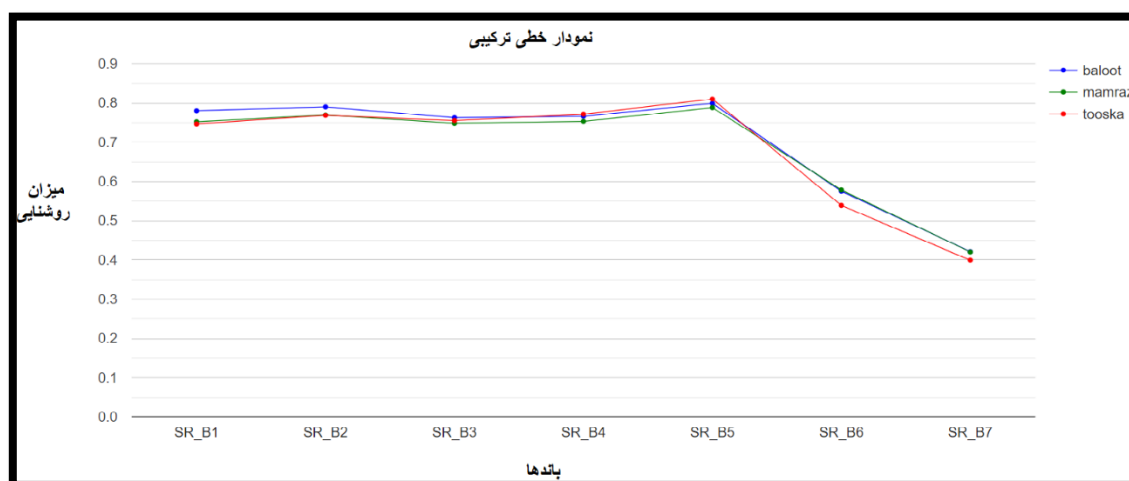
شکل ۸: میزان روشنایی گیاه در هر باند
Fig. 8: The brightness of the plant in each band



شکل ۹: نمودار خطی میزان روشنایی سه عارضه آب، گیاه و خشکی
Fig. 9: Linear diagram of brightness of three complications: water, vegetation and soil

جدول ۱: میزان روشنایی هر عارضه
Table1: The brightness of each feature

روشنایی (brightness)							عارضه
باند ۷	باند ۶	باند ۵	باند ۴	باند ۳	باند ۲	باند ۱	(Feature)
Band 7	Band 6	Band 5	Band 4	Band 3	Band 2	Band 1	
۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	آب water
0.016	0.017	0.011	0.005	0.015	0.009	0.001	
۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۱۲	خشکی soil
0.39	0.42	0.38	0.33	0.23	0.16	0.12	
۰/۰۸	۰/۱۷۵	۰/۳	۰/۰۱۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲۵	گیاه Vegetable
0.08	0.175	0.3	0.015	0.04	0.02	0.025	



شکل ۱۰: نمودار خطی میزان روشنایی سه گونه بلوط، ممرز و توسکا
Fig. 10: Linear diagram of the brightness of three types of oak, hornbeam and alder

ابتدا تصاویر موردنظر اخذ شده و به‌جای تعیین تصویر سالیانه، تصاویر ماهانه با دستور median() استخراج می‌شوند. حال با جانمایی گونه‌هایی که در آرکمپ ایجاد شده است، میزان روشنایی گونه‌های جنگلی در هر ماه برای باندهای ۱ تا ۷ محاسبه می‌شود. این عمل برای هر ۱۲ ماه از سال ادامه پیدا می‌کند. باتوجه به ۷ باند و ۱۲ ماه، برای هر گروه یک ماتریس ۸۴×۱ تشکیل می‌شود که امضای طیفی زمانی هر گونه گیاهی می‌باشد. پس از تعیین امضای طیفی زمانی ۸۴ بانده پنج گونه جنگلی مورد مطالعه، برای نمایش مناسبتر، ماتریس‌های ۸۴×۱ هر گونه گیاهی تولید شده در آرث انجین وارد نرم‌افزار متلب شده و تبدیل به ماتریس-های ۱۲×۷ می‌شوند. با استفاده از دستوراتی چون imtool در نرم‌افزار متلب، تصویر گرافیکی گونه‌های بلوط، ممرز، راش، سوزنی‌برگان و توسکا که در واقع امضای طیفی زمانی آنها است، در شکل‌های (۱۱) تا (۱۵) بصورت جداگانه به نمایش درآمده است.

از این رو تعیین امضای طیفی زمانی با ۸۴ باند (استفاده از باندهای ۱ تا ۷ در دوازده ماه سال) به‌جای ۷ باند سالانه در دستور کار قرار گرفت. نوآوری مقاله در این قسمت می‌باشد که بجای استفاده از ۷ باند برای تعیین امضای طیفی، از ۷ باند در ۱۲ ماه با عنوان امضای طیفی زمانی استفاده می‌گردد. معمولاً در تحقیقات گذشته برای طبقه‌بندی از چند باند محدود استفاده می‌شد. با این روش ابداعی امکان طبقه‌بندی عوارض شبیه بوسیله ترکیب باندها و زمان با دقت قابل قبولی فراهم خواهد شد. داده‌های این مرحله شامل تصاویر ماهواره‌ای ماهانه لندست ۸ بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، برداشت زمینی و نقشه تیپولوژی جنگل می‌باشد که در ۵ گروه بلوط، ممرز، راش، سوزنی‌برگان و توسکا تقسیم‌بندی شده‌اند. مدلی در سامانه آرث انجین ایجاد گردید که می‌تواند میانگین مقدار عددی هر باند را در ۱۲ ماه سال تعیین کند. در پژوهش حال حاضر باندهای ۱ تا ۷ لندست ۸ مورد بررسی قرار گرفت.

0.13	0.10	0.06	0.05	0.05	0.03	0.02
0.27	0.24	0.18	0.15	0.14	0.03	0.02
0.12	0.09	0.06	0.05	0.09	0.07	0.05
0.28	0.26	0.22	0.22	0.27	0.13	0.10
0.11	0.09	0.07	0.04	0.30	0.12	0.05
0.44	0.43	0.41	0.41	0.54	0.41	0.32
0.14	0.12	0.09	0.07	0.28	0.13	0.06
0.11	0.08	0.06	0.04	0.23	0.11	0.05
0.39	0.38	0.35	0.35	0.44	0.22	0.16
0.55	0.54	0.50	0.52	0.58	0.21	0.18
0.24	0.21	0.17	0.15	0.19	0.12	0.08
0.12	0.09	0.05	0.03	0.03	0.02	0.01

شکل ۱۳: امضای طیفی راش

Fig. 13: Spectral signature of beech

0.20	0.18	0.14	0.14	0.20	0.14	0.10
0.31	0.30	0.27	0.27	0.32	0.11	0.08
0.18	0.16	0.14	0.15	0.23	0.21	0.15
0.30	0.29	0.27	0.27	0.37	0.17	0.12
0.12	0.09	0.09	0.06	0.43	0.19	0.09
0.45	0.45	0.43	0.44	0.63	0.41	0.29
0.13	0.11	0.09	0.07	0.39	0.19	0.08
0.11	0.09	0.07	0.05	0.34	0.17	0.07
0.24	0.22	0.20	0.19	0.36	0.21	0.13
0.59	0.58	0.55	0.56	0.63	0.23	0.20
0.18	0.15	0.12	0.11	0.21	0.16	0.11
0.13	0.10	0.07	0.07	0.14	0.17	0.11

شکل ۱۲: امضای طیفی ممرز

Fig. 12: Spectral signature of hornbeam

0.17	0.14	0.11	0.11	0.20	0.23	0.16
0.38	0.36	0.33	0.33	0.37	0.23	0.17
0.13	0.11	0.09	0.10	0.21	0.26	0.18
0.29	0.27	0.25	0.24	0.37	0.20	0.14
0.11	0.09	0.09	0.06	0.43	0.20	0.09
0.29	0.27	0.25	0.23	0.48	0.30	0.19
0.15	0.13	0.11	0.09	0.36	0.20	0.10
0.11	0.09	0.08	0.06	0.32	0.18	0.08
0.18	0.16	0.13	0.12	0.30	0.20	0.12
0.54	0.52	0.49	0.50	0.58	0.23	0.21
0.15	0.12	0.10	0.09	0.25	0.18	0.09
0.14	0.11	0.09	0.09	0.21	0.27	0.17

شکل ۱۱: امضای طیفی بلوط

Fig. 11: Spectral signature of oak

0.15	0.13	0.09	0.07	0.10	0.09	0.06
0.25	0.22	0.18	0.16	0.17	0.07	0.05
0.12	0.10	0.08	0.07	0.14	0.14	0.10
0.27	0.25	0.23	0.22	0.32	0.16	0.11
0.13	0.11	0.09	0.07	0.38	0.17	0.08
0.43	0.42	0.40	0.40	0.57	0.42	0.31
0.14	0.12	0.10	0.08	0.36	0.17	0.08
0.11	0.09	0.07	0.05	0.30	0.14	0.06
0.24	0.22	0.20	0.19	0.34	0.19	0.11
0.58	0.57	0.53	0.55	0.62	0.24	0.21
0.17	0.14	0.10	0.08	0.13	0.08	0.05
0.13	0.10	0.06	0.05	0.07	0.06	0.04

شکل ۱۵: منحنی رفتار طیفی توسکا

Fig. 15: Spectral signature of alder

0.32	0.30	0.27	0.27	0.32	0.10	0.07
0.46	0.46	0.43	0.45	0.47	0.08	0.08
0.21	0.20	0.17	0.18	0.27	0.19	0.13
0.37	0.36	0.33	0.34	0.43	0.20	0.16
0.18	0.16	0.15	0.14	0.41	0.25	0.16
0.46	0.46	0.44	0.45	0.64	0.41	0.30
0.14	0.12	0.11	0.09	0.36	0.20	0.11
0.10	0.09	0.08	0.06	0.31	0.18	0.09
0.34	0.33	0.31	0.31	0.43	0.27	0.19
0.56	0.55	0.52	0.54	0.61	0.29	0.23
0.27	0.26	0.23	0.24	0.33	0.21	0.16
0.16	0.14	0.11	0.11	0.20	0.10	0.06

شکل ۱۴: منحنی رفتار طیفی سوزنی برگان

Fig. 14: Spectral signature of Bergan needle

شماره باند مربوط به باند ۷ و ۵ می‌باشد. بر همین اساس کمترین و بیشترین میزان روشنایی براساس ماه مربوط به ماه ۳ و ۱۰ است. همچنین در جدول (۲) کمترین و بیشترین میزان روشنایی برای هر گونه قابل مشاهده می‌باشد.

همانگونه که در شکل‌ها مشخص است، میزان روشنایی در یک باند و ماه مشخص (پیکسل) برای هر کدام از گونه‌ها متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال میزان روشنایی در باند اول ماه اول برای گونه‌های بلوط، ممرز، راش، سوزنی‌برگان و توسکا به ترتیب برابر با ۰/۱۷، ۰/۲، ۰/۱۳، ۰/۳۲ و ۰/۱۵ می‌باشد. معمولا کمترین و بیشترین میزان روشنایی براساس

جدول ۲: کمترین و بیشترین میزان روشنایی هر گونه

Table 2: The minimum and maximum brightness of each type

گونه Type	مقدار کمترین روشنایی Minimum brightness value	کمترین روشنایی Minimum brightness	مقدار بیشترین روشنایی Maximum brightness value	بیشترین روشنایی Maximum brightness
بلوط	۰/۰۶	باند چهارم ماه پنجم و هشتم	۰/۵۸	باند پنجم ماه دهم
Oak	0.06	Fourth band of fifth and eighth months	0.58	Fifth band of the tenth month
ممرز	۰/۰۵	باند چهارم ماه هشتم	۰/۶۳	باند پنجم ماه‌های ششم و دهم
Hornbeam	0.05	Fourth Band of Eighth Month	0.63	Fifth Band of sixth and tenth Month
راش	۰/۰۱	باند هفتم ماه دوازدهم	۰/۵۸	باند پنجم ماه دهم
Beech	0.01	Seventh Band of twelfth Month	0.58	Fifth band of the tenth month
سوزنی برگان	۰/۰۷	باند هفتم ماه اول	۰/۶۴	باند پنجم ماه ششم
Bergan needle	0.07	Seventh Band of first Month	0.64	Fifth Band of sixth Month
توسکا	۰/۰۴	باند هفتم ماه دوازدهم	۰/۶۲	باند پنجم ماه دهم
Alder	0.04	Seventh Band of twelfth Month	0.62	Fifth band of the tenth month

خشکی، آب و گیاه پرداخته شد. پس از ترسیم نمودار رفتار طیفی با هفت باند، نتیجه گرفته شد که رفتار سه عارضه آب، گیاه و خشکی کاملاً با یکدیگر فرق دارد و قابل تفکیک از یکدیگر می‌باشند. اما تفکیک گونه‌های جنگلی به دلیل شباهت‌های ساختاری با این روش امکان‌پذیر نبود. لذا امضای طیفی زمانی ۵ گونه گیاهی بلوط، ممرز، راش، سوزنی‌برگان و توسکا با ۸۴ باند (۷ باند و ۱۲ ماه) در جنگل تعیین شد. شکل‌های گرافیکی تولید شده نشان می‌دهد که هر کدام از گونه‌ها، امضای طیفی‌زمانی مختص به خود را دارند. با این حال در برخی از پیکسل‌ها امکان یکسان بودن میزان روشنایی باری گونه‌ها وجود دارد. برای برطرف کردن این مشکل نیز می‌توان تعداد باندهای نهایی را افزایش داد. برای افزایش دقت می‌توان دو کار پیشنهاد می‌شود. اولاً تعداد باندهای مورد بررسی که در پژوهش حال حاضر ۷ عدد بوده را افزایش داده و به ۱۱ رساند. ثانیاً بازه زمانی را تغییر داد. بدین معنی که به جای استفاده از ۱۲ ماه، از تعداد تصاویر دریافتی استفاده کرد. از آنجا که تصاویر لندست ۸ معمولاً ۱۶ روزه هستند، در طول سال حدوداً ۲۲ تصویر قابل برداشت است. لذا استفاده از ۱۱ باند و ۲۲ تصویر یک ماتریس ۱۱×۲۲ با ۲۴۲ باند را ایجاد می‌کند. هرچه باندهای بیشتری بررسی شوند، دقت بالاتر خواهد رفت. از طرفی با این تحقیق میزان کمترین و بیشترین روشنایی براساس ماه و باند نیز قابل بررسی می‌باشد که می‌تواند اطلاعات خوبی را برای سازمان‌ها و متخصصان این حوزه فراهم آورد. از آنجا که امضای طیفی برای هر گونه با گونه دیگری تفاوت دارد،

باتوجه به جدول امکان این که کمترین یا بیشترین روشنایی برای چند گونه جنگلی مانند هم باشد، وجود دارد اما تفاوت اصلی بین پیکسل‌های دیگر است. حتی ممکن است چند پیکسل از دو گونه مقدار یکسانی داشته باشند اما تاثیر پیکسل‌های دیگر امضای طیفی زمانی هر گونه را با گونه دیگر متفاوت می‌سازد. با این حال می‌توان نتیجه گرفت که هر چه باندهای بیشتری بررسی شود، تعداد پیکسل‌های متفاوت بیشتر خواهد شد و امضای طیفی زمانی هر گونه منحصر بفردتر شده و دقت عملکرد بیشتر می‌شود.

در انتها نیز عملکرد طبقه‌بندی با روش جنگل تصادفی بوسیله ۷ باند و ۸۴ باند ابداعی سنجیده شد که ضریب کاپا به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۸۵ شد. این موضوع نشان می‌دهد که طبقه‌بندی با استفاده از امضای طیفی زمانی با تعداد باند بیشتر دقت را به طور قابل توجهی بالا می‌برد. لذا در این روش هرچه تعداد باندهای بیشتری مورد استفاده قرار گیرد، نتیجه نهایی بهتر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

شناسایی، تفکیک و طبقه‌بندی عوارض در ابعاد وسیع کار مشکلی است. برای حل این مشکل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند کارآمد باشد. از روش‌های مهم برای طبقه‌بندی بوسیله تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به استفاده از هوش مصنوعی، تعیین شاخص و بررسی امضای طیفی عوارض اشاره کرد. در این مقاله ابتدا به بررسی منحنی رفتار طیفی

[8] Moussaie, L., M. Abbasi, and A. Jafari, Spectral behavior response of ash tree in the traffic area of Imam Khomeini Highway, Isfahan, in First National Conference on Natural Resources and Sustainable Development in Central Zagros. 2016. [In Persian].

[9] Mardaneh, Adel, Amir Aslani, Farshad, Alavi Panah, Seyed Kazem. Wheat stress detection and assessment using satellite images (case study: Moghan Plain). Application of geographic information system and remote sensing in planning. 2020 Aug 22;11(2):7-25. [In Persian].

[10] Rohani N, Moradi Faraj A, Mojaradi B, Rajaee T, Jabbari E. Investigation of land use change in Qom province along with climatic parameters using satellite remote sensing technology. Journal of RS and GIS for Natural Resources. 2021 Dec 22;12(4):28-46.

[11] Khodami, Gina, Pir Bavaqar, Mahtab, Ghazanfari, Hedayat. The effect of sanitary cutting treatment on the change of spectral behavior pattern of oak forests undergoing desiccation. Iranian Forest Journal, 1400; 13(1): 31-42. [In Persian].

[12] Esmizadeh, Landi, Matinfar. Using satellite images and spectral data to estimate soil organic carbon content in the forests of the Middle Zagros in Khuzestan. Environmental Science and Technology. 2023 Mar 21;25(1):95-106. [In Persian].

[13] Rezaei, Aghamohammadi Zanjerabad, Azizi, Vafainejad, Behzadi. Identification of agricultural land types in the Abbas Plain using time series analysis of Sentinel 2 satellite images. Sustainability, Development and Environment. 2023 Dec 22;4(4):1-3. [In Persian].

[14] Jalili Shaida, Murid Saeed, Banakar Ahmad, Namdar Ghanbari Reza. Spectral analysis of the periodic behavior of the time series of water level of Lake Urmia. Soil and Water Conservation Research (Agricultural Sciences and Natural Resources). 2012;19(4):25-46. [In Persian].

[15] Kokabi Fatemeh, Ghasemian Hassan, Keshavarz Ahmad. Presenting a new spatial spectral preprocessor to improve spectral analysis of hyperspectral images. Computational Intelligence in Electrical Engineering (Intelligent Systems in Electrical Engineering). 2016;7(3):97-113. [In Persian].

[16] Mousai Kordshami, Abbasi, Jafari. Study of tree pollution in urban green space based on their spectral behavior using field spectroscopy. Scientific-Research Journal of Spatial Information Technology Engineering. 2018 Sep 10;6(2):125-41. [In Persian].

[17] Ghadimi Mehrnoush, Zare Amin, Moqbel Masoumeh, Sahebi Mahmoud Reza. Evaluation of dust effects on the spectral behavior of plants using remote sensing data. Surveying Sciences and Techniques. 2019;8(4):163-176. [In Persian].

[18] Hashemi Tangestani, Majid, Shayganpour, Samira. Spectral analysis and detection of rock units of the Surian complex, northeastern Fars using data from Aster and Sentinel 2 satellite images. Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 2019; 11(2): 63-78. [In Persian].

می‌توان از این روش برای طبقه‌بندی خودکار در مناطق جنگلی جهت جداسازی آنها از یکدیگر استفاده کرد. این روش در زمان کم قادر به شناسایی و تفکیک گونه‌ها می‌باشد. سازمان‌هایی که مربوط به جنگل هستند، مانند منابع طبیعی و محیط زیست، می‌توانند برای مدیریت بهتر و برنامه‌ریزی‌های آبی خود از این روش بهره بگیرند.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

پژوهش حال حاضر مستخرج شده از پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد می‌باشد. نویسندگان از تمامی افرادی که در گردآوری داده‌ها و پردازش آنها کمک کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Darvish Sefat Ali Asghar, Babaei Kafaki Sasan, Rafiian Omid, Metaji Asadolle. Investigating the capability of UltraCam-D images in identifying tree species using object-based method in mixed-age forestry. Iranian Forest Journal. 2010;2(2):165-176. [In Persian].

[2] Mirakhorloo Khosrow. Preparation of land use and cover map in the forests of the north of the country using Landsat7 ETM+ satellite data. Iranian Forest and Poplar Research. 2003;11(3):325-358. [In Persian].

[3] Rafiian, Omid, Darvish Sefat, Ali Asghar. The role of spatial and radiometric resolution of aerial images in tree species identification using object-based classification. Iranian Forest and Poplar Research, 2014; 22(1): 121-132. [In Persian].

[4] Hashemi Ahmadi Seyed Masoud. Remote sensing studies to highlight iron ore potentials in the Sargdar region (Fars province). Land and Resources. 2011;4(1 (10th issue):63-67 [In Persian].

[5] Abbasi Mojgan, Mousai Leila, Seifi Zahra. Study of tree pollution in urban green space based on their spectral behavior. 2015. [In Persian].

[6] Imani Far Sadra, Hassanloo Mehdi. Studying the effect of spectral sensitivity function in preparing time series of vegetation indices between Landsat and Sentinel-2 satellite sensors. 2016. [In Persian].

[7] Ranjbareslamlou Soghari, Mirzaei Saham, Darvishi Balurani Ali, Mirzapour Fardin, Bahrami Hosseinali, Abbaszadeh Tehrani Nadia. Investigation of spectral reflectance behavior of Iranian oak seedlings under dust stress. 2016. [In Persian].

[30] Mousavi Z, Behzadi S. Introducing an Appropriate Geoportal Structure for Managing Wildlife Location Data. International Journal of Natural Sciences Research. 2019;7(1):32-48.
https://doi.org/10.18488/journal.63.2019.71.32.48

[31] Norouzi E, Behzadi S. The Feasibility of Machine-learning Methods to Extract the Surface Evaporation Quantity using Satellite Imagery. Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI). 2021 Mar 21;9(2):229-38.
https://doi.org/10.22061/jecei.2021.7563.406

[32] Behzadi S, Jalilzadeh A. Introducing a novel digital elevation model using artificial neural network algorithm. Civil Engineering Dimension. 2020 Oct 6;22(2):47-51.
https://doi.org/10.9744/ced.22.2.47-51

[19] Rasoulia, Masoumeh, Safarrad, Taher, Akbari-Nasab, Mohammad, Talebpour, Nadia. Experimental detection of turbid and clear waters using Sentinel-2 satellite images (case study of Sefid Rood Dam catchment). Quarterly Journal of Water Resources Engineering, 2019; 12(43): 87-99. [In Persian].

[20] Kumar S, Shwetank S, Jain K. Development of spectral signature of land cover and feature extraction using artificial neural network model. In 2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS) 2021 Feb 19 (pp. 113-118). IEEE.
https://doi.org/10.1109/ICCCIS51004.2021.9397172

[21] Sharifi O, Asghari Beirami B, Mokhtarzade M. Classification of hyperspectral images by fusion of spectral and spatial features in convolutional neural networks. Engineering Journal of Geospatial Information Technology. 2021 Oct 10;9(2):1-27.
http://dx.doi.org/10.52547/jgit.9.2.1

[22] Vermeulen LM, Munch Z, Palmer A. Fractional vegetation cover estimation in southern African rangelands using spectral mixture analysis and Google Earth Engine. Computers and Electronics in Agriculture. 2021 Mar 1;182:105980.
https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105980

[23] Fassnacht FE, Müllerová J, Conti L, Malavasi M, Schmidlein S. About the link between biodiversity and spectral variation. Applied Vegetation Science. 2022 Jan;25(1):e12643.
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/avsc.12643

[24] Yu R, Huo L, Huang H, Yuan Y, Gao B, Liu Y, Yu L, Li H, Yang L, Ren L, Luo Y. Early detection of pine wilt disease tree candidates using time-series of spectral signatures. Frontiers in Plant Science. 2022 Oct 13;13:1000093.
https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1000093

[25] Zhang L, Gao L, Huang C, Wang N, Wang S, Peng M, Zhang X, Tong Q. Crop classification based on the spectrotemporal signature derived from vegetation indices and accumulated temperature. International Journal of Digital Earth. 2022 Dec 31;15(1):626-52.
https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2022.2036832

[26] Jalilzadeh A, Behzadi S. Machine learning method for predicting the depth of shallow lakes using multi-band remote sensing images. Journal of Soft Computing in Civil Engineering. 2019 Apr 1;3(2):54-64.

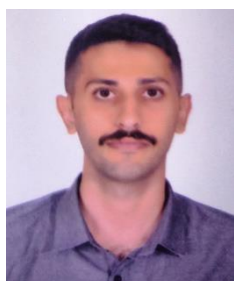
[27] Norouzi E, Behzadi S. Evaluating machine learning methods and satellite images to estimate combined climatic indices. Numerical Methods in Civil Engineering. 2019 Aug 15;4(1):30-8.

[28] Khaledi S, Behzadi S. Monitoring and assessing the changes in the coverage and decline of oak forests in Lorestan province using satellite images and BFAST model. Applied researches in Geographical Sciences. 2020 Jun 10;20(57):265-80.

[29] Mousavi Z, Behzadi S. Geo-Portal Implementation with a Combined Approach of AHP and SWOT. International Journal of Natural Sciences Research. 2019;7(1):22-31.
https://doi.org/10.18488/journal.63.2019.71.22.31

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



پارسا افزلی کردمحل دارای مدرک کارشناسی ارشد مهندسی سیستم اطلاعات مکانی از دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در سال ۱۴۰۳ می‌باشد. همچنین در سال ۱۴۰۰ مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ کرده است. فعالیت‌های پژوهشی اخیر وی در حوزه سیستم اطلاعات مکانی و سنجش از دور بوده است. همچنین تولید الگوریتم و برنامه‌نویسی در پلتفرم گوگل ارث انجین در حوزه محیط زیست جهت پایش سیل، تغییرات اقلیمی، آلودگی هوا و مدیریت جنگل از دیگر سوابق ایشان می‌باشد.

Master student of surveying Engineering department, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University. Tehran, Iran.

✉ Parsa_afzalikord@yahoo.com.com



سعید بهزادی دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی عمران نقشه برداری گرایش سیستم اطلاعات مکانی از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی از تهران می‌باشد. ایشان به عنوان دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شهید بهشتی تهران مشغول به فعالیت می‌باشد.

از سوابق پژوهشی ایشان می‌توان به چاپ بیش از ۱۰۰ مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی اشاره کرد. زمینه‌های تخصصی ایشان شامل هوش مصنوعی، GIS در پزشکی و برنامه‌نویسی در سامانه‌های مختلف مکانی می‌باشد.

 behzadi.saeed@gmail.com

Associate Professor, Department of Surveying Engineering,
Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid
Beheshti University, Tehran, Iran.

Citation (Vancouver): Afzali Kordmahalleh P, Behzadi S. [Presenting a temporal-spectral signature model to identify and distinguish different plant species by using satellite images]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 293-306

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.10992.1068>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Comparison of extracting façade points of urban buildings from points cloud of mobile laser scanner and UAV imaging

M. Heidarimozaffar^{*1}, S.A. Hosseini²¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran² Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Received: 14 September 2024
 Reviewed: 16 October 2024
 Revised: 31 October 2024
 Accepted: 27 November 2024

KEYWORDS:

UAV Photogrammetry
 Mobile Laser Scanner
 Point Cloud Segmentation
 Point Cloud Clustering
 DBSCAN and RANSAC Algorithms
 Plane Extraction

* Corresponding author

✉ m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

☎ (+98912) 5185925

Background and Objectives: In recent decades, geomatics science has made significant progress, and these advances are due to advanced measurement tools and innovative technologies in the field of geometric and spatial data acquisition. In this context, portable laser scanners and UAVs have been introduced as basic and efficient tools that are capable of accurately and quickly measuring various objects and environments, including urban spaces. These devices automatically record all the details of the urban space in the form of point clouds or images. To extract the geometric information of buildings from these details, it is necessary to use machine vision methods. To achieve accurate and reliable models of buildings, a sequence of post-processing operations is implemented when processing point cloud data. One of the most important stages of these processes is the segmentation of the point cloud. These steps transform point cloud data into more conceptual and analyzable information. One of the important issues in processing point cloud data is the ability to extract flat surfaces of building facades (walls). These flat surfaces are of special importance as basic components in modeling and analyzing the condition of buildings. Accuracy in the information related to these flat surfaces allows for a more accurate and complete distinction between different components of buildings. This is important in several applications including urban planning, construction management, and energy consumption analysis of buildings.

Methods: In this article, the combination of MSAC and G-DBSCAN algorithms is used to extract flat surfaces from three-point cloud datasets (point cloud obtained from GeoSLAM ZEB-HORIZON laser scanner devices, point cloud obtained from Phantom 4 Pro drone imaging and hybrid point cloud) has been. These two algorithms are executed sequentially. The area chosen for this purpose is the buildings of the Faculty of Engineering of Bu-Ali Sina University in Hamedan. Because this environment has features such as architectural diversity, the existence of flat facades, and different ways of placing walls in relation to each other with different dimensions.

Findings: This research, with a comprehensive evaluation of three separate data sets, shows an average precision of more than 97%, which guarantees high accuracy in data extraction. In addition, the average recall has reached more than 94%, which covers most of the elements of the facade. The result of this evaluation is the F1 score with an average of 95%, which indicates progress in the field of accurate building data extraction and architectural modeling. However, the algorithm encountered challenges when facing the walls that were perpendicular to the laser scanner's movement path, which reduced the representation rate. Also, the SfM algorithm has difficulty in generating points on window panes, which caused some points related to the space inside the windows to be recognized as wall points. This issue shows that point cloud generation algorithms from images affect the results of this algorithm. On the contrary, the results of the combined data have been very promising, in such a way that these data converged faster than the other two data sets in the first step of the algorithm and had high performance in Precision and Recall.

Conclusion: However, the findings show that the algorithm has generally shown an outstanding performance in extracting building facade information, especially with the use of diverse and varied data. These developments are promising and open new horizons in spatial data analysis and building modeling. This innovative approach can be used in various applications and help to develop modern and data-driven architectural models.



NUMBER OF REFERENCES

47



NUMBER OF FIGURES

15



NUMBER OF TABLES

6

مقاله پژوهشی

مقایسه استخراج نقاط نمای ساختمان‌های شهری از ابر نقاط لیزراسکنر همراه و تصویربرداری پهپاد

مرتضی حیدری مظفر^{۱*}، سید عادل حسینی^۲^۱ گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران^۲ گروه نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: در دهه‌های اخیر، علوم ژئوماتیک پیشرفت چشمگیری کرده و این پیشرفت‌ها ناشی از ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری و تکنولوژی‌های نوآورانه در زمینه اخذ داده‌های هندسی و مکانی است. در این زمینه، لیزراسکنرهای همراه و پهپادها به عنوان ابزاری اساسی و کارآمد معرفی شده‌اند که قابلیت انجام اندازه‌گیری دقیق و سریع اشیاء و محیط‌های مختلف از جمله فضاهای شهری، را دارا هستند. این دستگاه‌ها به شکل خودکار تمامی جزئیات فضای شهری را به شکل ابرنقطه یا تصویر ثبت می‌کنند. برای استخراج اطلاعات هندسی ساختمان‌ها از درون این جزئیات، لازم است از روش‌های بینایی ماشین استفاده شود. در راستای دستیابی به مدل‌های دقیق و قابل اعتماد از ساختمان‌ها، هنگام پردازش داده‌های ابرنقطه، دنباله‌ای از عملیات پس‌پردازش اجرا می‌شود. یکی از مهمترین مراحل این پردازش‌ها، قطعه‌بندی ابرنقاط است. این مراحل انتقال داده‌های ابرنقطه را به اطلاعات مفهومی تر و قابل تحلیل تر تبدیل می‌کنند. یکی از مسائل مهم در پردازش داده‌های ابرنقطه، توانایی استخراج سطوح مسطح نماهای ساختمانی (دیوارها) است. این سطوح مسطح به عنوان اجزاء اساسی در مدل‌سازی و تحلیل وضعیت ساختمان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. دقت در اطلاعات مرتبط با این سطوح مسطح، امکان تمایز دقیق تر و کامل تر بین اجزاء مختلف ساختمان‌ها را فراهم می‌کند. این امر در کاربردهای متعددی از جمله برنامه‌ریزی شهری، مدیریت ساخت و ساز، و تجزیه و تحلیل مصرف انرژی ساختمان‌ها اهمیت دارد.

روش‌ها: در این مقاله، برای استخراج سطوح مسطح از سه مجموعه داده ابرنقطه (ابرنقطه اخذ شده از دستگاه‌های لیزراسکنر همراه GeoSLAM ZEB-HORIZON، ابرنقطه بدست آمده از پردازش تصویربرداری پهپاد Phantom 4 Pro و ابرنقطه ترکیبی) از ترکیب دو الگوریتم MSAC و G-DBSCAN استفاده شده است. این دو الگوریتم به صورت متوالی اجرا می‌شوند. محوطه‌ای که برای این منظور انتخاب شده، ساختمان‌های دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا در همدان می‌باشد. زیرا این محیط ویژگی‌هایی از جمله تنوع معماری، وجود نماهای مسطح و حالت‌های مختلف قرارگیری دیوارها نسبت به هم با ابعاد مختلف را داراست.

یافته‌ها: این تحقیق با ارزیابی جامع سه مجموعه داده مجزا، میانگین دقت (Precision) بیش از ۹۷٪ را نشان می‌دهد که دقت بالا در استخراج داده‌ها را تضمین می‌کند. علاوه بر این، میانگین بازنمایی (Recall) به بیش از ۹۴٪ رسیده است که اغلب عناصر نما را پوشش می‌دهد. نتیجه این ارزیابی، امتیاز F1 (F1 score) با میانگین ۹۵٪ است که نشان‌دهنده پیشرفت در زمینه استخراج دقیق داده‌های ساختمانی و مدل‌سازی معماری است. با این حال، الگوریتم در مواجهه با دیوارهایی که عمود بر مسیر حرکت لیزراسکنر قرار دارند، دچار چالش‌هایی شد که موجب کاهش نرخ بازنمایی گردید. همچنین، الگوریتم SfM در تولید نقاط بر روی شیشه‌های پنجره‌ها مشکل دارد، که باعث شده برخی نقاط مربوط به فضای داخل پنجره‌ها به عنوان نقاط دیوار تشخیص داده شوند. این مسئله نشان می‌دهد که الگوریتم‌های تولید ابرنقطه از تصاویر بر نتایج این الگوریتم تأثیرگذار هستند. در مقابل، نتایج داده‌های ترکیبی بسیار امیدوارکننده بوده است، به گونه‌ای که این داده‌ها در مرحله اول الگوریتم با سرعت بیشتری نسبت به دو مجموعه داده دیگر همگرا شدند و عملکرد بالایی در دقت و نرخ بازنمایی داشتند.

تاریخ دریافت: ۲۴ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۵ مهر ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۰ آبان ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۰۷ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

فتوگرامتری پهپاد
لیزراسکنر همراه
قطعه‌بندی ابرنقطه
خوشه‌بندی ابرنقطه
الگوریتم‌های DBSCAN و RANSAC
استخراج صفحه

* نویسنده مسئول

m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

۰۹۱۲-۵۱۸۵۹۲۵

نتیجه‌گیری: با این حال، یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم به طور کلی عملکرد برجسته‌ای در استخراج اطلاعات نماهای ساختمانی، به‌ویژه با استفاده از داده‌های متنوع و گوناگون، از خود نشان داده است. این پیشرفت‌ها نویدبخش بوده و افق‌های جدیدی را در تحلیل داده‌های مکانی و مدل‌سازی ساختمانی می‌گشاید. این رویکرد نوآورانه می‌تواند در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و به توسعه مدل‌های معماری مدرن و داده‌محور کمک کند.

مقدمه

مدل‌سازی سه‌بعدی خیابان‌ها و ساختمان‌ها، در بصری‌سازی کاربردهای مکان‌مند پیشرفته مانند ناوبری وسایل نقلیه، برنامه‌ریزی شهری و صنعت گردشگری، مورد توجه روزافزون است [۱]. با رشد تکنولوژی گرافیک رایانه‌ای، صنعت سرگرمی و واقعیت مجازی تقاضا برای مدل‌های پیچیده و واقع‌گرایانه نیز افزایش داشته است [۲]. پیچیدگی عوارض ساختمانی بخصوص در مناطق شهری منجر به آن می‌شود که مرحله‌ی مدل‌سازی و استخراج اطلاعات هندسی ساختمان با دقت کافی انجام نشود [۳]. به‌همین دلیل استخراج اطلاعات هندسی و در راس آن مدل‌سازی سه‌بعدی ساختمان‌ها به یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی در فتوگرامتری و بینایی ماشین تبدیل شده است [۴].

داده‌های مدل‌سازی ساختمان عمدتاً با استفاده از سه روش به دست می‌آیند [۵]: فتوگرامتری هوایی، تصویربرداری عمیق و LiDAR. با پیشرفت فناوری LiDAR، ابرنقطه حاصل از برداشت جزئیات، در حال تبدیل شدن به یک منبع اصلی برای مدل‌سازی هندسه ساختمان‌ها است. در دهه ۱۹۹۰، لیزراسکنر هوایی به طور گسترده در دسترس قرار گرفت [۶] و تولید مدل‌های رقمی ارتفاعی از شهرها امکان‌پذیر شد. دقت و تراکم نقاط قابل برداشت توسط این فناوری در حال پیشرفت مداوم است. بعدها لیزراسکنر زمینی و لیزراسکنر همراه، علاوه بر دقت هندسی بیشتر و تراکم بسیار زیاد، اسکن نمای ساختمان‌ها را که در حالت هوایی امکان‌پذیر نبود، میسر کردند [۷]. فرایند مدل‌سازی نمای ساختمان با استفاده از ابرنقطه را می‌توان به سه مرحله اصلی تقسیم کرد [۸]: استخراج نقاط نمای ساختمان، شناسایی ویژگی‌های نمای ساختمان (به عنوان مثال درب، پنجره و غیره) و بازسازی مدل بر اساس یک توپولوژی سه‌بعدی. مرحله اول بسیار مهم است زیرا مراحل بعدی مستقیماً در ادامه نتیجه مرحله اول بدست می‌آیند. اگرچه پردازش ابرنقطه برای استخراج ویژگی‌های نمای ساختمان (مرحله اول) فرایندی زمان‌بر است [۹]. اما با توجه به دقت نسبتاً مناسب نتایج ارائه شده در پردازش ابرنقطه نمی‌توان از اهمیت چنین داده‌ای صرفه‌نظر کرد [۵]. بنابراین بسیاری از پیش‌پردازش‌ها باید قبل از شروع پردازش اجرا شود. از جمله این پیش‌پردازش‌ها، قطعه‌بندی ابرنقطه است یعنی تقسیم تعداد زیادی از نقاط به گروه‌هایی با خصوصیات مشابه که اغلب پیش شرط همه پردازش‌ها است [۱۰].

اغلب تکنیک‌های قطعه‌بندی ابرنقطه بر روی داده‌های لیزراسکنر هوایی توسعه داده شده‌اند [۱۱]، به‌عبارتی تکنیک‌ها روی داده‌های مش یا داده‌های تصویری پیاده‌سازی شده‌اند و به ندرت روی داده‌های سه‌بعدی به طور مستقیم عملیاتی شده‌اند. ابرنقطه‌ای که با لیزراسکنر زمینی/

همراه و یا با تصویربرداری بدست می‌آیند، به خصوص زمانی که از چندین ایستگاه مختلف اخذ و ادغام می‌شوند، یقیناً سه‌بعدی هستند. تبدیل چنین داده‌ای به شبکه دوبعدی باعث از دست رفتن اطلاعات مکانی زیادی خواهد شد [۱۲]. در مقابل، تکنیک‌های قطعه‌بندی سه‌بعدی که به استخراج اشکال ساده همچون صفحه، کره، استوانه از ابرنقطه سروکار دارند، ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه هندسه اکثر نمای ساختمان‌ها را می‌توان با مجموعه‌ای از نماهای مسطح به صورت صفحه توصیف کرد [۸]، استخراج صفحه نسبت به دیگر اشکال هندسی متداول‌تر است. بنابراین با توجه به اهمیت استخراج خودکار صفحه از ابرنقطه [۱۳]، سمپاس و شان [۱۴] صفحه را با استفاده از رویکرد k-means فازی بر اساس سطح نرمال استخراج کردند. صفحه‌ها بر اساس تراکم خوشه و اتصال از هم جدا شدند. ژو و همکاران [۱۵] از گرادیان برای محاسبه موثر پارامترهای صفحه و سپس استخراج نقاط مربوط به آن استفاده کردند. آرنود و همکاران [۱۶] یک الگوریتم استخراج صفحه پویا را پیشنهاد می‌کنند که در آن نقاط به خوشه‌هایی تعلق می‌گیرند که پارامترهای صفحه فرضی یکسان دارند. با این حال، این روش‌ها با توجه به نتایج خوبی که ارائه می‌دهند ولی ممکن است تحت تأثیر عواملی چون تعداد تکرار و حداکثر تعداد خوشه‌های انتخابی قرار گیرند.

فراتر از روش‌های فوق، روش‌های دیگری برای استخراج صفحات ساختمانی پیشنهاد شده است. تعدادی از روش رشد منطقه‌ای [۱۷] به طور گسترده برای استخراج سطوح مسطح و ویژگی‌های نما استفاده کرده‌اند [۱۸-۲۳]. در روش رشد منطقه‌ای، انتخاب نقاط اولیه به عنوان منطقه بذری، نتایج نهایی قطعه‌بندی ابرنقطه را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، در مورد ابرنقطه با نویز زیاد، تصمیم‌گیری در مورد گسترش منطقه دشوار است. در این روش چندین منطقه بذری به طور مستقل رشد می‌کنند و منجر به خوشه‌هایی می‌شوند که به طور بالقوه با هم تداخل دارند. این رویکرد اغلب یک قطعه‌بندی مناسب را نتیجه می‌دهد اما هنگام مواجه شدن با داده‌های با نویز زیاد به مشکل برمی‌خورد [۱۲].

در تحقیقات حوزه بینایی ماشین، دو روش کاملاً شناخته شده دیگر یعنی تبدیل هاف [۲۴] و الگوریتم RANSAC [۲۵] برای استخراج اشکال ساده هندسی استفاده شده‌اند [۲۶-۳۲] برخلاف رشد منطقه‌ای، برای هر دو روش اثبات شده است که در حضور تعداد زیادی از نقاط پرت اشکال ساده هندسی آسان‌تر استخراج می‌شوند [۱۳]. با این حال، روش تبدیل هاف عمدتاً در خصوص داده‌های دوبعدی و زمانی که تعداد پارامترهای مدل بسیار کم است، استفاده می‌شود. تراش‌کردی و همکاران [۱۳] هر دو روش را برای استخراج خودکار صفحه‌های سه‌بعدی

الگوریتم به صورت متوالی اجرا شده‌اند؛ ابتدا با استفاده از MSAC، سطوح مسطح محتمل در فضای مطالعه استخراج شده و سپس با استفاده از G-DBSCAN، دیوارهای نما استخراج شده‌اند. در این تحقیق، یکی از پارامترهای کلیدی، حداکثر ضخامت نویزی صفحه‌ها (MaxDistance) بوده که وابسته به منطقه مورد مطالعه و نوع سنجنده استفاده شده است. این پارامتر براساس برجستگی‌های نوع نما و دقت برداشت نقطه توسط دستگاه یا تولید ابرنقطه توسط الگوریتم‌ها تعیین شده است. به عنوان مثال برای این مطالعه، با توجه به برجستگی‌های نوع نما (در این مطالعه حدود ۲ سانتیمتر) و دقت برداشت یا تولید ابرنقطه، که این مقدار برای لیزراسکنر برابر با ± 3 سانتی‌متر ($\text{MaxDistance} = 8 \text{ cm}$) برای ابرنقطه تولید شده از تصویربرداری پهپاد با روش SfM (Structure from Motion) [۳۶، ۳۷] برابر با ± 1 سانتی‌متر ($\text{MaxDistance} = 4 \text{ cm}$) و برای ابرنقطه ترکیبی ± 3 سانتی‌متر ($\text{MaxDistance} = 8 \text{ cm}$) تعیین شده است. همچنین، پارامتر حداقل فاصله دو دیوار مجاور هم راستا نیز برای مرحله دوم الگوریتم، بدون تغییر، وارد الگوریتم می‌شود ($\text{MinPts} = 50 \text{ cm}$).

- منطقه مورد مطالعه

برای تعیین کارایی و توانایی الگوریتم پیشنهادی، در برابر روش مبتنی بر تولید نقطه، الگوریتم برای یک منطقه مطالعاتی آزمایش شد. در این مطالعه، ساختمان تازه احداث دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، واقع در شهر همدان (همدان-ایران)، برای بررسی و تحقیق انتخاب شد (شکل ۲). از ویژگی‌های بارز این ساختمان دیوارهایی مسطح با ابعاد مختلف است که با زوایه‌های تقریباً عمود بر هم مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند.

- داده

در این تحقیق از سه مجموعه داده استفاده شد. این داده‌ها شامل ابرنقطه اخذ شده از لیزراسکنر همراه، ابرنقطه تولید شده از تصویربرداری نمای ساختمان با پهپاد و ابرنقطه‌ای که از ترکیب این دو داده بدست آمده است. در ادامه هر کدام توضیح داده شده است.

- لیزراسکنر

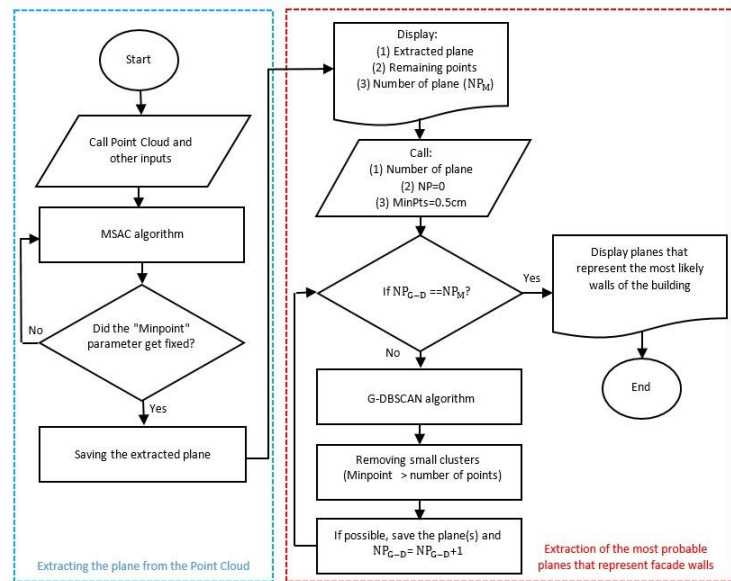
لیزراسکنر همراه، موسوم به موبایل لیدار یا لیزراسکنر زمینی متحرک، که به اختصار آن را MLS گویند معمولاً، بر روی یک وسیله نقلیه سوار و یا توسط یک اپراتور حمل می‌شود. MLS می‌تواند اطلاعات هندسی دقیق محیط اطراف خود را به صورت ابرنقطه ثبت کند. عموماً MLS برای محاسبه دقیق مختصات سه‌بعدی نقاط در سیستم مختصات مرجع از ترکیب سیستم‌های INS و GNSS بهره می‌گیرد. برای کاربردهای با دقت زیاد، اغلب نقاط کنترل دقیق در منطقه مورد نظر ایجاد و یا از یک روش multi-pass adjustment استفاده می‌شود [۳۸، ۳۹].

ساختمان بر روی ابرنقطه ارزیابی کردند. پس از مقایسه تحلیلی، نتایج نشان داده است که الگوریتم RANSAC در قطعه‌بندی ابرنقطه کارآمدتر از روش تبدیل هاف است. بنابراین می‌توان گفت RANSAC در استخراج اشکال ساده بخصوص زمانی که داده از دنیای واقعی اخذ شده (ابرنقطه دارای نویز فراوان باشد) گزینه‌ای مناسب است [۱۲، ۲۶]. مقابل این مزیت‌ها، RANSAC در استخراج اشکال در فضای سه‌بعدی، نسبت به انتخاب صحیح آستانه نویز حساس است به طوری که تعیین می‌کند کدام نقاط داده متناسب با مدل نمونه‌برداری شده (با مجموعه‌ای منحصر بفرد از پارامترها) است. اگر چنین آستانه‌ای خیلی زیاد انتخاب شود، تمام فرضیه‌ها به طور مساوی رتبه‌بندی می‌شوند و ممکن است در استخراج صفحه‌ها چندین صفحه به عنوان یک صفحه استخراج شوند. از سوی دیگر، زمانی که آستانه نویز خیلی کوچک انتخاب شود، پارامترهای تخمین زده شده تمایل به ناپایداری دارند یعنی پس از هر بار اجرای الگوریتم تعداد صفحات استخراج شده متفاوت و بیشتر از تعداد واقعی است. برای جبران بخشی از این اثر نامطلوب، تور و همکاران MSAC را پیشنهاد کردند [۳۳].

اگرچه از نظر دقت و سرعت برای شناسایی نمای ساختمان پیشرفت‌های زیادی حاصل شده است، اما هنوز هم استراتژی‌های فراگیر پردازش برای استخراج خودکار چنین ویژگی‌هایی از محیط‌های ناهمگن شهری نیازمند توسعه هستند. قطعه‌بندی ابرنقطه برای استخراج سطوح مسطح در نمای ساختمان را می‌توان به عنوان گام اصلی در پردازش خودکار ابرنقطه در نظر گرفت [۱۰]. دستیابی سریع به داده‌های سه‌بعدی و همچنین پردازش خودکار داده‌ها، دو وظیفه اصلی در کاربردهای نقشه‌برداری است [۱۳]. با توجه به این ملاحظات در تحقیقات قبلی ما [۳۴]، از الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN [۳۵] به صورت متوالی استفاده شد و نتایج امیدوارکننده‌ای در استخراج دیوارهای نما از ابرنقطه لیزراسکنر ساختمان‌های پیچیده (با سطوح مسطح و غیرمسطح) با سناریوهای مختلف دنیای واقعی به دست آمد. حالا با هدف بررسی عملکرد این الگوریتم‌ها روی داده‌های مختلف، این تحقیق انجام شده است. هدف این تحقیق، استفاده از الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN روی داده‌های متنوع، شامل ابرنقطه تولید شده از تصویربرداری پهپاد، ابرنقطه اخذ شده از لیزراسکنر همراه و ابرنقطه ترکیبی از این دو، به منظور بهبود دقت و قابلیت اعتماد در تشخیص دیوارهای نمای ساختمان است.

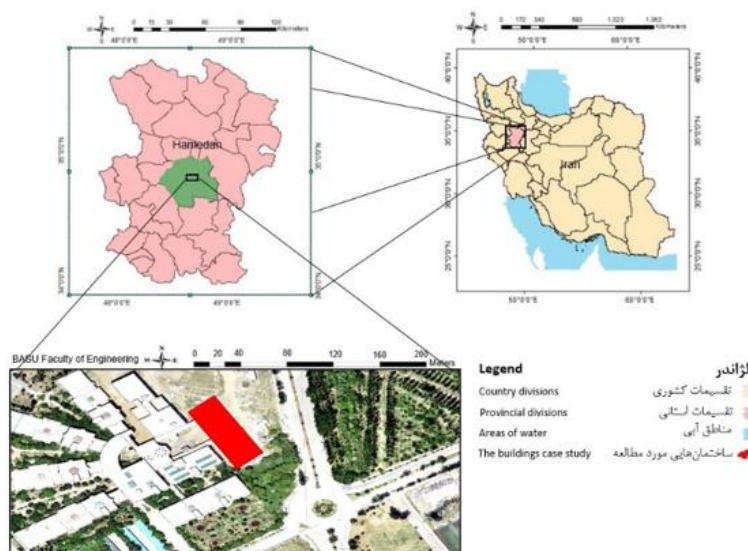
روش تحقیق

در این تحقیق، از دو الگوریتم MSAC و G-DBSCAN برای استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌ها استفاده شده است، که قبلاً در تحقیقات قبلی به آن‌ها اشاره شده بود [۳۴]. سه نوع داده مختلف از یک ساختمان پیچیده شامل ابرنقطه‌های لیزراسکنر، تصویربرداری پهپاد، و ترکیبی از این دو، جهت استخراج نقاط نمای مورد بررسی قرار گرفتند. این دو



شکل ۱: روش استخراج صفحه‌های نمای ساختمان از ابرنقطه [۳۴]

Fig. 1: The method of extracting facades of buildings from point cloud [34]



شکل ۲: موقعیت مکانی ساختمان مورد مطالعه

Fig. 2: Location of the case study building



شکل ۳: لیزراسکنر همراه، GeoSLAM ZEB-HORIZON

Fig. 3: Mobile laser scanner, GeoSLAM ZEB-HORIZON

از دیگر ویژگی‌های MLS می‌توان به اندازه‌گیری شدت و رنگ اشاره نمود، که البته این دو ویژگی در همه سیستم‌های MLS وجود ندارد. قدرت تفکیک مکانی و دقت زیاد داده‌های MLS و محصولات آن (به عنوان مثال، DEM، مدل‌های زیرساختی سه‌بعدی و غیره) موجب شده است تا در سطح جزئیات خاص بیشتر از سایر رویکردها از آن استفاده شود [۴۰]. در این مطالعه از لیزراسکنر همراه GeoSLAM ZEB-HORIZON استفاده شد. این سیستم نرخ جمع‌آوری ۳۰۰۰۰۰ نقطه در ثانیه با دقت ۱-۳ سانتی‌متر و برد ۱۰۰ متر را دارد (جدول ۱). در مجموع تعداد تقریبی ۲ میلیون نقطه از ساختمان مورد مطالعه توسط یک اپراتور باتجربه با این سنجنده اخذ شده است (شکل ۳ و ۴الف).



شکل ۴: پهپاد فانتوم ۴ پرو
Fig. 4: Phantom 4 Pro drone

جدول ۲: اطلاعات سنجنده پرنده فانتوم ۴ پرو
Table 2: Phantom 4 Pro drone sensor information

سنجنده sensor	لنز Lens
CMOS*1	
FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8 - f/11	
11 auto focus at 1 m - ∞	
100 - 3200 (Auto)	میزان حساسیت به نور
100 - 6400 (Manual)	Filming
100 - 3200 (Auto)	تصویربرداری Imaging
100- 12800 (Manual)	The degree of sensitivity to light
	سرعت شاتر
8 - 1/2000 s	الکترونیکی Electronic shutter speed
	سرعت شاتر
8 - 1/8000 s	مکانیکی Mechanical shutter speed

پروازها به صورت دستی، توسط یک اپراتور پهپاد با تجربه انجام شده است. تصاویر از پهپاد به صورت هم‌زمان، به اپراتور منتقل شده و از هم‌پوشانی قابل توجه تصاویر اطمینان حاصل شد. پرواز با این پرنده در ارتفاع‌های مختلف انجام شد. در مجموع تعداد ۲۰۲ تصویر با هم‌پوشانی ۸۰ درصد همراه با اطلاعات مراکز تصویر به دست آمده از PPK، با استفاده از این سنجنده، با فاصله تقریبی ۶ m از نمای ساختمان اخذ شد (جدول ۳). برای ارزیابی دقت عملیات پرواز و اخذ تصویر از ۱۰ نقطه کنترل و ۴ نقطه چک با مختصات معلوم روی ناحیه مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۵، جدول ۴). تمام تصاویر اطلاعات مربوط به توجیه داخلی و خارجی را دارا می‌باشند. در مجموع با استفاده از روش SfM تعداد تقریبی ۱۰,۰۰۰,۰۰۰ نقطه از نمای بیرونی ساختمان مورد مطالعه با قدرت تفکیک ۱ نقطه به ازای هر پیکسل به دست آمده است. با توجه به هدف مطرح شده در این تحقیق (توان‌سنجی و مقایسه داده‌های دو سنجنده ذکر شده) ناگزیر این نقطه به دست آمده از روش تصویربرداری متناسب با ابرنقطه لیزراسکنر همراه نمونه‌برداری شد. سرانجام تعداد تقریبی ۲,۰۰۰,۰۰۰ نقطه، با استفاده از این روش اخذ شد (شکل ۶ب).

جدول ۱: مشخصات لیزراسکنر همراه، GeoSLAM ZEB-HORIZON
Table 1: Specifications of the portable laser scanner, GeoSLAM ZEB-HORIZON

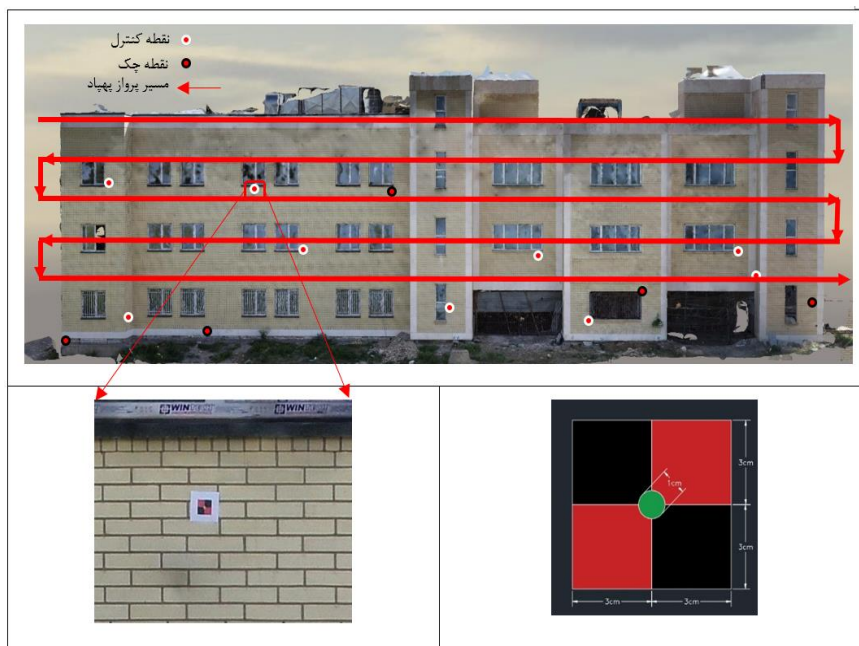
پارامتر Parameter	مقدار Value
برد Range	100m
کلاس حفاظت Protection Class	IP54
وزن سنجنده Scanner Weight	1.3kg
تعداد نقطه اخذ در ثانیه Points per Second	300,000
نرخ دقت Relative Accuracy	1 - 3cm
حجم فایل داده خام Raw Data File Size	100-200MB a minute
پردازش Processing	Post Processing
عمر باتری Battery Life	3.5hrs

- تصویربرداری پهپاد

تصاویر به صورت دستی یا نصب بر روی یک سکو، قابل اخذ هستند. گزینه دوم می‌تواند بسیار مفید باشد، به ویژه در هنگام ثبت ساختمان‌های بلند و سقف‌ها، به طوری که استفاده از پهپاد می‌تواند تنها امکان مستندنگاری با فتوگرامتری به جز استفاده از جرثقیل باشد. پهپاد یا UAV (Unmanned Aerial Vehicle) به عنوان طرحی از یک هواپیما که خلبان انسانی در آن کار نمی‌کند و می‌تواند از دور، کاملاً مستقل یا ترکیبی هدایت شود تعریف می‌کنند [۴۱].

دو نوع پهپاد از نظر ساخت وجود دارد: بال ثابت و عمودپرواز. برخلاف مدل‌های بال ثابت، سیستم‌های عمودپرواز قادر به پرواز در هر جهت، به صورت افقی و عمودی، و همچنین شناور ماندن در یک موقعیت ثابت هستند. این امر آن‌ها را به ابزاری مناسب برای کار بازرسی دقیق یا نقشه‌برداری از مناطق مختلف از جمله مستندنگاری ساختمان تبدیل می‌کند [۴۲].

در این تحقیق از پهپاد چهار موتور فانتوم ۴ پرو، مجهز به PPK (Post Processing Kinematic) به منظور تصویربرداری نمای سایت استفاده شد (شکل ۴). این سیستم مجهز به سنجنده CMOS 1" با میدان دید ۸۴ درجه است. حجم تصاویر تقریباً ۲۰ مگابایت و از فوکوس خودکار پشتیبانی کرده و گشودگی دیافراگم آن نیز بین F/2.8 و F/11 متغیر است. حداقل فاصله لازم برای فوکوس در این دوربین ۱ m و حداکثر ۳۰ m خواهد بود. سیستم فانتوم ۴ پرو، وزنی تقریباً ۱/۳۸ کیلوگرم دارد؛ حداکثر زمان پرواز برای هر منبع تغذیه، ۲۸ دقیقه است و امکان شناور ماندن یا جمع‌آوری تصاویر به صورت عمودی و مایل را فراهم می‌کند. این پهپاد می‌تواند تصاویر را فقط در باندهای RGB ثبت کند و هیچ گونه سنجنده دیگری مانند NIR که روی آن نصب شده باشد، ندارد (جدول ۲).



شکل ۵: موقعیت و تصویر نقاط کنترل و چک همراه با مسیر پرواز پهپاد که روی نمای مدل ساختمان مورد مطالعه نمایش داده شده‌اند (نقاط با عدد و حروف انگلیسی نام گذاری شده‌اند به‌طوری که، از سمت چپ به راست از P1 شروع و با P14 خاتمه می‌یابند)

Fig. 5: The position and image of control points along with the flight path of the UAV shown on the model of the building case study (the points are named with numbers and English letters so that, from left to right, they start from P1 and end with P14)

جدول ۳: مشخصات نقاط کنترل و چک پس از مثلث‌بندی (حداکثر خطا هر نقطه کمتر از ۰/۰۱ cm است)

Table 4: Specifications of control and check points after triangulation (the maximum error of each point is less than 0.01 cm)					
نام نقطه point name	نوع نقطه هدف Target point type	تعداد تصویر کالیبره شده Number of calibrated images	خطای بازتبدیل RMS [پیکسل] RMS conversion error [pixels]	خطای سه‌بعدی [متر] 3D error [m]	
P1	چک Czech	۴ (از ۴ تصویر Image)	۰/۸۸	۰/۰۰۱۲۴	
P2	کنترل Control	۴ (از ۵ تصویر Image)	۰/۷۳	۰/۰۰۱۲۰	
P3	کنترل Control	۴ (از ۵ تصویر Image)	۰/۷۶	۰/۰۰۱۲۲	
P4	چک Czech	۶ (از ۶ تصویر Image)	۰/۹۱	۰/۰۰۲۳۱	
P5	کنترل Control	۱۶ (از ۱۹ تصویر Image)	۰/۲۳	۰/۰۰۲۵۱	
P6	کنترل Control	۱۴ (از ۱۵ تصویر Image)	۰/۹۹	۰/۰۰۱۷۶	
P7	چک Czech	۱۵ (از ۲۰ تصویر Image)	۱/۷۵	۰/۰۰۳۲۱	
P8	کنترل Control	۲۰ (از ۲۳ تصویر Image)	۱/۳۶	۰/۰۰۲۴۳	
P9	کنترل Control	۱۷ (از ۱۸ تصویر Image)	۱/۰۳	۰/۰۰۱۸۶	
P10	کنترل Control	۱۵ (از ۱۵ تصویر Image)	۱/۱۵	۰/۰۰۲۰۰	
P11	چک Czech	۲۲ (از ۲۵ تصویر Image)	۱/۲۸	۰/۰۰۲۳۵	
P12	کنترل Control	۱۷ (از ۱۷ تصویر Image)	۰/۵۷	۰/۰۰۱۱۰	
P13	کنترل Control	۱۵ (از ۱۸ تصویر Image)	۱/۶۹	۰/۰۰۲۸۹	
P14	چک Czech	۶ (از ۶ تصویر Image)	۰/۷۹	۰/۰۰۱۱۹	

- ابرنقطه ترکیبی

با توجه به اینکه دو ابرنقطه به‌دست آمده از لیزراسکنر همراه و فتوگرامتری پهپادی هر دو در یک سیستم مختصات مرجع (WGS84) قرار داشته‌اند، پس از وارد نمودن آن‌ها به محیط نرم‌افزار CloudCompare، به‌طورکامل این دو داده با دقت تناظریابی $RMS = 0.035$ به ازای ۵۰,۰۰۰ نقطه روی یکدیگر قرار گرفت. با توجه به هدف تحقیق (مقایسه داده‌های مختلف)، این داده نیز به صورت رندم نمونه‌برداری شد و به مقدار تقریبی ۲,۰۰۰,۰۰۰ نقطه رسید (شکل ۶ج).

جدول ۴: خلاصه پروژه پرواز با پرندۀ فانتوم ۴ پرو

Table 3: Summary of the Phantom 4 Pro flight project

مساحت منطقه پوشش / coverage area	۱۴۸۶/۵۶ متر مربع
تعداد تصاویر / Number of images	۲۰۲ تصویر
مدل دوربین / Camera model	DJI FC6310
ابعاد تصویر / Image dimensions	۳۶۴۸ × ۵۴۷۲ پیکسل
فاصله دو مسیر پرواز متوالی The distance between two consecutive flight paths	۲ متر

درستی بازیابی شده‌اند. اولی به وجود نقاطی که به اشتباه به عنوان صفحه استخراج شده‌اند حساس است، در حالی که دومی به وجود نقاطی که در مرجع به عنوان صفحه هستند و توسط الگوریتم صفحه شناسایی نمی‌شوند حساس است. در نهایت، امتیاز F1، دقت و بازنمایی را متعادل می‌کند و معمولاً به عنوان یک اندازه‌گیری منحصر به فرد از اثربخشی کلی یک الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۳] بنابراین استفاده از معیارهای سه جانبه دقت، بازنمایی و امتیاز F1 وسیله‌ای موثر برای ارزیابی استخراج اشیا در ابرنقطه است که با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۱)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۲)$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{precision \cdot recall}{precision + recall} \quad (۳)$$

که در آن TP تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که به طور صحیح به صفحه‌ای که بخشی از آن صفحه در مرجع است اختصاص داده شده است، و FP تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که به اشتباه به صفحه‌ای که بخشی از آن صفحه در مرجع است اختصاص داده نشده است. FN تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که به اشتباه به صفحه‌ای اختصاص داده شده است که بخشی از آن صفحه در مرجع نیست.

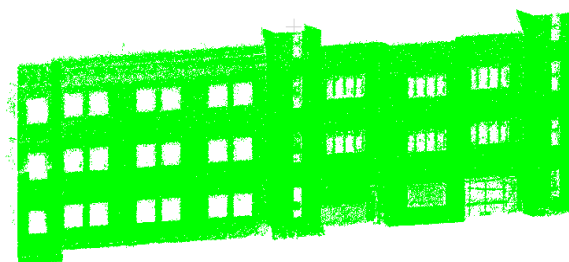
- تولید داده مرجع

برای تأیید نتایج روش روی داده‌ها، داده‌های مرجع به صورت دستی قطعه‌بندی شدند. ساختمان‌های مورد مطالعه به طور مستقل توسط دو دانشجوی دکتری که در پردازش LiDAR کار می‌کنند، قطعه‌بندی شدند (جدول ۱، ۲ و ۳). هر دو قبلاً با فرآیند قطعه‌بندی سطوح آشنا بودند. هر نتیجه با اشتراک دو داده قطعه‌بندی شده دستی (مرجع) مقایسه می‌شود. این مقادیر Precision، Recall و F1 score را تولید می‌کند. مقایسه با مجموعه داده مرجع به عنوان شاخص کیفیت نهایی برای نتیجه قطعه‌بندی استفاده می‌شود.

ابرنقاط قطعه‌بندی شده دستی برای ارزیابی در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. سازگاری کلی بین دو ابرنقطه قطعه‌بندی شده دستی، با وجود ناسازگاری‌های کوچک، واضح است. در اینجا ناسازگاری یعنی اختلاف بین تعداد نقاط متعلق به هر صفحه قطعه‌بندی شده دستی در دو ابرنقطه یکسان که سرانجام اشتراک دو ابرنقطه قطعه‌بندی شده دستی به عنوان داده مرجع در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

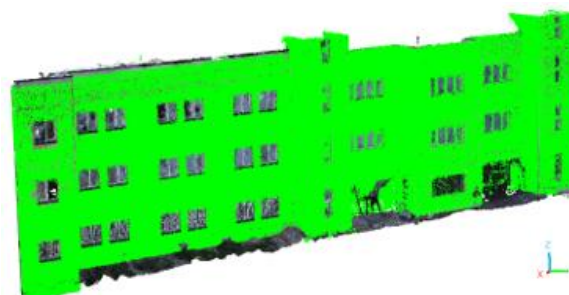
الگوریتم معرفی شده بر روی سه داده از ساختمان مورد نظر اعمال شد. نتایج حاصل از این تحقیق، در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار خواهند گرفت.



الف (a)



ب (b)



ج (c)

شکل ۶: تصویر داده‌های مختلف اخذ شده که به ترتیب، الف: ابرنقطه اخذ شده با لیزراسکنر GeoSLAM ZEB-HORIZON ب: ابرنقطه تولید شده با فتوگرامتری پهپادی.

ج: ابرنقطه ترکیبی

Fig. 6: The image of different data obtained, respectively, a: point cloud obtained by GeoSLAM ZEB-HORIZON laser scanner b: point cloud produced by UAV photogrammetry. c: Hybrid point cloud

- ارزیابی دقت

دقت ابرنقطه قطعه‌بندی شده را می‌توان با مقایسه نتایج آن در برابر داده‌های مرجع که احتمالاً دستی تولید شده، اندازه‌گیری کرد [۴۳]. سطح سازگاری بین یک نتیجه خودکار و یک نتیجه دستی، نشان‌دهنده کیفیت روش خودکار است.

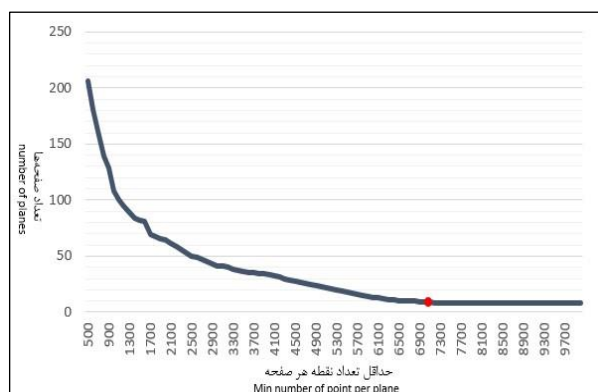
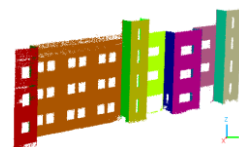
- معیارهای ارزیابی

تعدادی روش در دسترس وجود دارد که سازگاری بین دو مجموعه داده قطعه‌بندی شده را اندازه‌گیری می‌کنند (به عنوان مثال: [۴۴-۴۷]). اما به طور کلی در زمینه بازیابی اطلاعات، مفاهیم دقت (Precision)، بازنمایی (Recall) و امتیاز F1 (F1 score) معرفی شده‌اند که معیارهای رایج و اساسی برای ارزیابی اثربخشی یک الگوریتم هستند [۴۵]. دقت، نشان‌دهنده درصد عناصر بازیابی شده درست توسط الگوریتم است، در حالی که بازنمایی، درصدی از داده‌های مرجع را نشان می‌دهد که به

جدول ۵: اطلاعات ابرنقطه قطعه‌بندی شده دستی (مساحت مؤثر: مساحت هر دیوار منهای مساحت عوارض روی آن چون درب و پنجره)

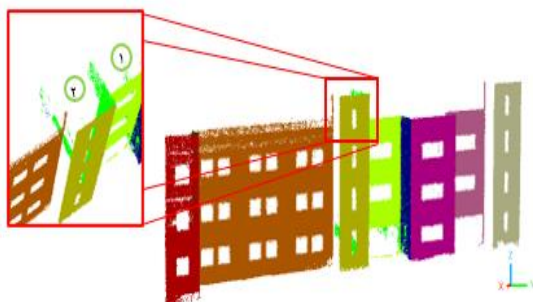
Table 5: Manually segmented point cloud data (effective area: the area of each wall minus the area of features on it such as doors and windows)

رنگ Color	مساحت مؤثر [مترمربع] Effective area [m ²]	تعداد نقاط Number of points					
		لیزر اسکنر همراه Mobile laser scanner			تصویربرداری پهپاد UAV imaging		
		مرجع ۱ Ref.1	مرجع ۲ Ref.2	اشتراک Intersect	مرجع ۱ Ref.1	مرجع ۲ Ref.2	اشتراک Intersect
صفحه ۱	19.21	117103	120940	113395	108512	106527	107327
صفحه ۲	11.20	18328	18202	16918	58262	58784	58452
صفحه ۳	69.64	386689	378896	375303	348683	349213	348999
صفحه ۴	12.34	52489	52087	51512	61284	61521	61368
صفحه ۵	23.05	161621	163439	159834	115100	114961	115112
صفحه ۶	12.40	19617	20186	18564	62311	61819	62004
صفحه ۷	17.43	104380	104686	102340	104177	104657	104357
صفحه ۸	11.12	53872	56108	53333	54366	54716	54589
صفحه ۹	24.40	208812	206608	203132	135958	136751	136534
صفحه ۱۰	11.00	12231	12166	11682	54299	54532	54403
صفحه ۱۱	17.60	88444	92155	88248	103777	104277	103921
صفحه ۱۲	13.30	52236	55583	51977	63327	63463	63401
صفحه ۱۳	23.15	144522	157356	141949	115722	115271	115332



شکل ۸: نمایش چگونگی تعیین مقدار Minpoint برای ابرنقطه لیزر اسکنر همراه. این مقدار برای این ساختمان ۷۰۰۰ نقطه است که تعداد ۵ صفحه را استخراج کرده است

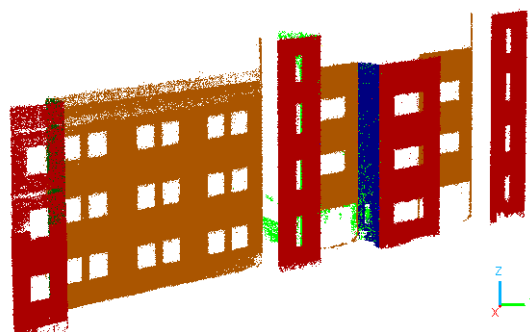
Fig. 8: Show how to determine the Minpoint value for the point cloud of the mobile laser scanner. This value for this building is 7000 points, which has extracted 5 planes



شکل ۹: نتایج مرحله دوم الگوریتم برای ابرنقطه لیزر اسکنر همراه (کادر قرمز: دو صفحه که به اشتباه توسط الگوریتم به عنوان دیوار نما استخراج شده‌اند را نشان می‌دهد)

Fig. 9: The results of the second step of the algorithm for the point cloud of the mobile laser scanner (red box: shows the two planes that were wrongly extracted by the algorithm as wall facades)

نتایج برای داده لیزر اسکنر همراه پس از اجرای مرحله اول الگوریتم بر روی ابرنقطه ساختمان اول، تغییراتی در تعداد صفحات استخراج شده مشاهده شد. پس از رسیدن به عدد تقریبی ۷۰۰۰ نقطه به عنوان حداقل تعداد نقاط متعلق به هر صفحه، تغییرات تعداد صفحات استخراج شده به ثبات رسید و مقدار ثابت ۷ صفحه به عنوان حداقل تعداد صفحات استخراج شده تایید شد (برای مشاهده این تغییرات به شکل‌های ۷ و ۸ مراجعه شود). در مرحله دوم الگوریتم، پس از عبور ۷ صفحه استخراج شده، ۱۲ صفحه به عنوان محتمل‌ترین صفحات نمای ساختمان استخراج شد. از این تعداد، ۱۰ صفحه به درستی به عنوان دیوارهای بیرونی نمای ساختمان شناخته شدند و ۳ صفحه استخراج نشده است. این در حالی است که ۲ صفحه نیز به اشتباه از دیوارهای محیط داخل ساختمان استخراج شدند. این خطاها ناشی از عبور نقاط لیزر به داخل ساختمان بوده‌اند (شکل ۹).



شکل ۷: نتایج مرحله اول الگوریتم برای ابرنقطه لیزر اسکنر همراه
Fig. 7: Results of the first step of the algorithm for the point cloud of the mobile laser scanner.

در مورد داده دوم که از تصویربرداری پهپاد روی نمای ساختمان بدست آمده بود، الگوریتم عملکرد قابل قبولی داشت. تمام ۱۳ دیوار نما با موفقیت استخراج شدند، که این منجر به دستیابی به یک دقت (Precision) بالغ بر ۹۹٪ شد که نشان‌دهنده سطح بالای اطمینان در دیوارهای استخراج شده است. ارزیابی نتایج نشان داد که، الگوریتم تمامی دیوارهایی را استخراج کرد که به عنوان نما شناخته می‌شوند. این مقدار دقت به توانایی روش تصویربرداری در تولید ابرنقطه کم نویز باز می‌گردد. با این حال، عملکرد کلی الگوریتم با نرخ بازنمایی (Recall) بالای ۹۹٪ بسیار مناسب بود، که نشان‌دهنده آن است که تقریباً تمام موارد مثبت واقعی را به طور مؤثر شناسایی می‌کند. F1 score برابر ۹۹٪ بوده و این الگوریتم توانایی ایجاد تعادل میان دقت و بازنمایی را نشان می‌دهد و قابلیت اطمینان آن را برای کاربردهای استخراج نما تقویت می‌کند (جدول ۶).



شکل ۱۲: نتایج مرحله دوم الگوریتم برای ابرنقطه تصویربرداری پهپاد (کادر قرمز): نمونه‌ای از عدم توانایی تولید نقطه الگوریتم SfM از محیط داخل پنجره‌ها (شیشه) در تصاویر که به اشتباه به عنوان دیوار در نتایج الگوریتم پیشنهادی استخراج شده‌اند
Fig. 12: The results of the second stage of the algorithm for the UAV imaging point cloud (red box): an example of the inability of the SfM algorithm to generate points from the environment inside the windows (glass) in the images that are mistakenly extracted as walls in the results of the proposed algorithm

برخلاف داده اول، مشکلات مرتبط با دیوارهای عمود بر مسیر حرکت اسکندر ایجاد نشده است. این امر فرآیند استخراج را ساده‌تر می‌کند و امکان به دست آوردن نرخ بازنمایی بالا را بدون کاهش در دقت فراهم می‌کند.

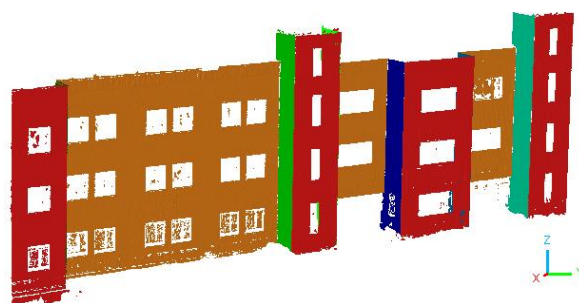
بنابراین، الگوریتم با دقت بالا در استخراج دیوارهای نما از یک ساختمان با نماهای مسطح عمل کرده و توانایی دقت و بازنمایی بسیار بالا را نشان داده است. نادرستی‌های جزئی (عدم رسیدن به مقدار ۱۰۰٪ در دقت و بازنمایی) به دلیل اختلاف حداقلی بین داده‌هایی که به عنوان مرجع با نتیجه الگوریتم مقایسه شده‌اند، است. بیشتر این اختلاف در چگونگی انتخاب نقاط لبه دیوارها توسط الگوریتم و انسان اتفاق افتاده است. البته باید این نکته را در نظر داشت که الگوریتم SfM در تولید نقاط روی شیشه‌ی پنجره‌ها دچار مشکل شده است و این باعث شده که بخشی از نقاط مربوط به فضای داخل پنجره‌ها به عنوان نقاط دیوار استخراج شوند (کادر قرمز رنگ شکل ۱۲). با این حال، موفقیت نشان می‌دهد که زمانیکه داده‌ها ابرنقطه از تصویربرداری باشند، الگوریتم برای کاربردهایی که استخراج دقیق نما از اهمیت بسیاری برخوردار است، مناسب است.

الگوریتم با موفقیت توانست ۱۰ از ۱۳ دیوار بیرونی ساختمان شماره ۱ را با دقت بالایی استخراج کند. میزان دقت (Precision) در این عملیات بالای ۹۳٪ بوده که نشان از دقت بسیار خوبی در استخراج دیوارها دارد. با این حال، در مواردی که الگوریتم با دیوارهای عمود بر حرکت لیزر اسکندر برخورد می‌کند، با چالش‌هایی مواجه می‌شود که نتیجه می‌دهد نرخ بازنمایی (Recall) به ۸۶٪ کاهش یابد. مقدار F1 score نیز حدود ۸۹٪ بوده که نشان‌دهنده عملکرد متوازی است و الگوریتم را به عنوان یک ابزار مؤثر و امیدوارکننده برای اکثر کاربردهای استخراج نما تبدیل می‌کند (جدول ۶).

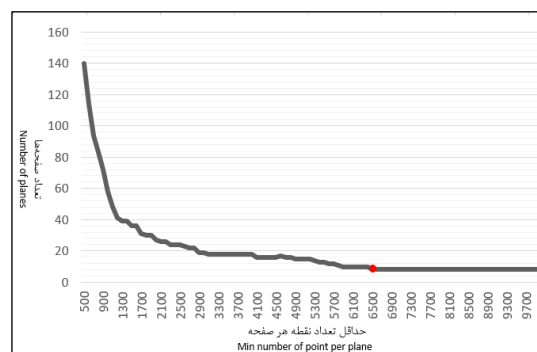
نتایج برای داده تصویربرداری پهپاد:

پس از اجرای مرحله اول الگوریتم بر روی ابرنقطه تصویربرداری پهپاد و ترسیم هیستوگرام، تغییرات در تعداد صفحات استخراج شده مشاهده شد. تعداد صفحات استخراج شده به مقدار تقریبی ۶۵۰۰ نقطه به عنوان حداقل تعداد نقاط متعلق به هر صفحه کاهش یافت و پس از آن تغییرات تعداد صفحات استخراج شده ثابت ماند و مقدار آن به ۸ صفحه رسید (شکل ۱۱ و ۱۲).

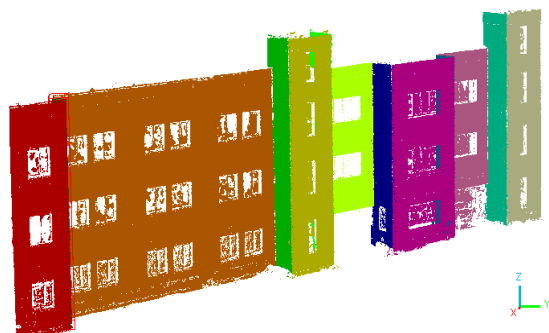
پس از عبور از مرحله دوم الگوریتم، ۱۳ صفحه به عنوان محتمل‌ترین صفحات نما ساختمان استخراج شدند. تمامی ۱۳ صفحه مربوط به نمای بیرونی ساختمان به درستی استخراج شدند (شکل ۱۳).



شکل ۱۰: نتایج مرحله اول الگوریتم برای ابرنقطه تصویربرداری پهپاد
Fig. 10: The results of the first step of the algorithm for the UAV imaging point cloud



شکل ۱۱: نمایش چگونگی تعیین مقدار Minpoint برای ابرنقطه تصویربرداری پهپاد.
این مقدار برای ساختمان ۶۵۰۰ نقطه است که تعداد ۸ صفحه را استخراج کرده است
Fig. 11: Show how to determine Minpoint value for UAV imaging point cloud. This value for the building is 6500 points, which has extracted the number of 8 planes



شکل ۱۵: نتایج مرحله دوم الگوریتم برای ابرنقطه ترکیبی

Fig. 15: The results of the second step of the algorithm for the hybrid point cloud

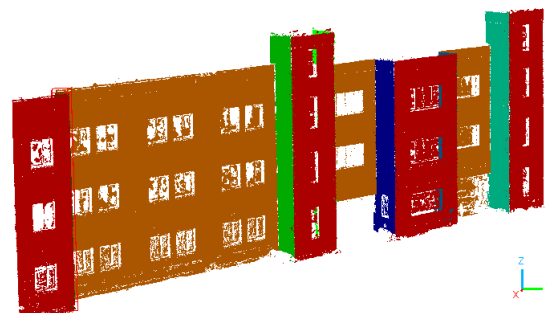
در مورد داده سوم که ترکیب از دو داده دیگر (ابرنقطه لیزراسکتر همراه و ابرنقطه تهیه شده از تصویربرداری پهپاد) بود، الگوریتم با یک سناریو پیچیده‌تر روبرو شد. با موفقیت ۱۳ دیوار را با دقت استخراج کرد، که به دستیابی به دقتی (Precision) بالغ بر ۹۹٪ منجر شد. با این حال، یک چالش مهم در این داده به وقوع پیوست. همچون ابرنقطه تهیه شده از تصویربرداری پهپاد، نقاط داخل محیط درب‌ها و پنجره‌ها نیز توسط الگوریتم در این داده نیز به عنوان نقاط دیوار استخراج شده‌اند. همانطور که گفته شد، این مشکل ناشی از عدم توانایی الگوریتم SfM در تولید نقطه از تصویر شیشه است.

با وجود پیچیدگی‌های ذکر شده، الگوریتم توانسته است با دقت بالایی دیوارهای نما از یک ساختمان را استخراج نماید. دقت بالای الگوریتم و نرخ بازنمایی (Recall) ۹۹٪ دوباره توانایی آن در وظایف استخراج نما را تأیید می‌کند. F1 score نیز بالای ۹۹٪ بوده و این الگوریتم توانایی ایجاد تعادل میان دقت و بازنمایی را به نمایش می‌گذارد. این توانایی به ویژه در مواجهه با چالش‌ها و مشکلاتی که در این سناریوهای چالش‌برانگیز به وقوع می‌پیوندد، از اهمیت بالایی برخوردار است (جدول ۶).

به طور کلی، عملکرد الگوریتم در استخراج دیوارهای نما از یک ساختمان با نماهای مسطح و صفحات عمودی قابل تحسین بوده و این نشان می‌دهد که این الگوریتم به عنوان یک ابزار ارزشمند و قابل اطمینان برای وظایف استخراج نما برای داده‌ها مختلف ارزیابی می‌شود.

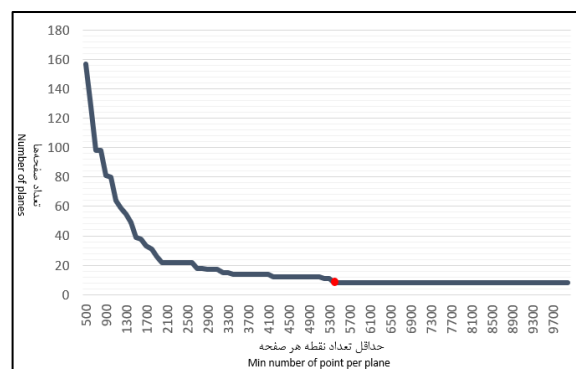
نتایج برای داده ترکیبی

پس از پیاده‌سازی مرحله اول الگوریتم روی ابرنقطه ترکیبی و ترسیم هیستوگرام، مشاهده می‌شود که تعداد صفحات استخراج شده کاهشی نسبت به ورودی اولیه داشته و پس از مقدار تقریبی ۵۵۰۰ نقطه بعنوان حداقل تعداد نقاط متعلق به هر صفحه، تعداد صفحات استخراج شده ثابت و مقدار آن برابر ۸ است. این داده نسب به دو داده دیگر سریع‌تر همگرا شده است (شکل ۱۳ و ۱۴). پس از عبور از مرحله دوم الگوریتم، تمام ۱۳ صفحه به عنوان دیوارهای نمای ساختمان استخراج شدند.



شکل ۱۳: نتایج مرحله اول الگوریتم برای ابرنقطه ترکیبی

Fig. 13: Results of the first step of the algorithm for the hybrid point cloud



شکل ۱۴: نمایش چگونگی تعیین مقدار Minpoint برای ابرنقطه ترکیبی. این مقدار برای ساختمان ۵۵۰۰ نقطه است که تعداد ۸ صفحه را استخراج کرده است

Fig. 14: Show how to determine the Minpoint value for the composite point cloud. This value for the building is 5500 points, which has extracted the number of 8 planes

جدول ۶: نتایج و ارزیابی بدست آمده پس از اجرای الگوریتم
Table 6: Results and evaluation obtained after running the algorithm

	تعداد کل صفحه‌ها	تعداد صفحه‌های استخراج شده	تعداد صفحه‌های استخراج شده (درست)	تعداد صفحه‌های استخراج شده (اشتباه)	تعداد صفحه‌های استخراج نشده	دقت (%)	بازنمایی (%)	F1 امتیاز (%)
	total number of planes	Number of extracted planes	Number of extracted planes(true)	Number of extracted planes(false)	Number of unextracted planes	Precision (%)	Recall (%)	F1score (%)
Data1	13	12	10	2	3	93	86	89
Data2	13	13	13	0	0	99	99	99
Data3	13	13	13	0	0	99	99	99

نتیجه گیری

تحقیق حاضر با بررسی عملکرد الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN در استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌های متنوع با تنوع معماری مختلف، به نتایجی مهم دست یافت. مقایسه عملکرد این الگوریتم‌ها بر روی سه دسته داده مختلف، اطلاعات مفیدی ارائه کرده است: ۱. استفاده از داده ترکیبی از ابرنقطه لیزراسکنر همراه و ابرنقطه تصویربرداری پهپاد، امکان پوشش دادن نقاط ضعف هر دو دسته داده را فراهم می‌آورد. این تنوع در داده‌ها منجر به بهبود کیفیت و دقت نتایج نهایی می‌شود. ۲. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که داده ترکیبی سریع‌تر از دو دسته داده دیگر در مرحله اول الگوریتم همگرا می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در سازگاری با تنوع داده‌ها و افزایش کارایی الگوریتم است. ۳. عملکرد الگوریتم در تشخیص و استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌ها با دقت و بازنمایی بالا را نشان می‌دهد. این امر نشان از قابلیت اعتماد و اثبات عملکرد الگوریتم در مواجهه با داده‌های مختلف دارد. با توجه به این نتایج، الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN به عنوان ابزارهای قدرتمند و قابل اعتماد برای استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌های با تنوع معماری مختلف شناخته شده‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها می‌توانند به خوبی بر روی داده‌های مختلف اجرا شوند و در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

مشارکت نویسندگان

مرتضی حیدری مظفر ایده اولیه کار را مطرح و با ایجاد شرایط لازم برای انجام کار تحقیقاتی، آقای سید عادل حسینی را در جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل، برنامه‌نویسی و پردازش داده‌ها و جمع‌بندی نتایج و نگارش مقاله راهنمایی کردند.

تشکر و قدردانی

مقاله‌ی ارسالی، بخشی از کار پایان‌نامه کارشناسی ارشدی است که در دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از همین رو، از گروه عمران دانشکده مهندسی که شرایط را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع و مآخذ

- [4] La Russa FM, Grilli E, Remondino F, Santagati C, Intelisano M. Advanced 3D Parametric Historic City Block Modeling Combining 3D Surveying, AI and VPL. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023 Jun 24;48:903-10. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-903-2023>
- [5] Su Z, Gao Z, Zhou G, Li S, Song L, Lu X, Kang N. Building plane segmentation based on point clouds. Remote Sensing. 2021 Dec 25;14(1):95. <https://doi.org/10.3390/rs14010095>
- [6] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T, Studnicka N. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2006 Apr 1;60(2):100-12. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001>
- [7] Vosselman G, Maas HG. Airborne and terrestrial laser scanning. CRC Press (Taylor & Francis); 2010.
- [8] Arachchige NH, Maas HG. Automatic Building Facade Detection in Mobile Laser Scanner point Clouds. Publ. Der. Dtsch. Für. Photogramm. Fernerkund. Und. Geoinf. EV. 2012;21:347-54.
- [9] Hu D, Gan VJ, Yin C. Robot-assisted mobile scanning for automated 3D reconstruction and point cloud semantic segmentation of building interiors. Automation in Construction. 2023 Aug 1;152:104949. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104949>
- [10] Arachchige NH, Perera SN, Maas HG. Automatic processing of mobile laser scanner point clouds for building facade detection. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012 Jul 27;39:187-92. <https://doi.org/10.5194/isprsjprs-XXXIX-B5-187-2012>, 2012.
- [11] Treccani D, Adami A. Single Building Point Cloud Segmentation: Towards Urban Data Modeling and Management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023 May 25;48:511-6. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-511-2023>
- [12] Boulaassal H, Landes T, Grussenmeyer P. Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. International Journal of Architectural Computing. 2009 Jan;7(1):1-20. <https://doi.org/10.1260/147807709788549411>
- [13] Tarsha-Kurdi F, Landes T, Grussenmeyer P. Hough-transform and extended ransac algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from lidar data. In: ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007 2007 (Vol. 36, pp. 407-412).
- [14] Sampath A, Shan J. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial lidar point clouds. IEEE

[1] Cornelis N, Leibe B, Cornelis K, Van Gool L. 3d urban scene modeling integrating recognition and reconstruction. International Journal of Computer Vision. 2008 Jul;78:121-41. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0081-9>

[2] Becker S. Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2009 Nov 1;64(6):640-53. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.002>

[3] Abreu N, Pinto A, Matos A, Pires M. Procedural point cloud modelling in scan-to-BIM and scan-vs-BIM applications: a review. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023 Jun 30;12(7):260. <https://doi.org/10.3390/ijgi12070260>

- [26] Deschaud JE, Goulette F. A fast and accurate plane detection algorithm for large noisy point clouds using filtered normals and voxel growing. In 3DPVT 2010 May 17.
- [27] Thomson C, Boehm J. Automatic geometry generation from point clouds for BIM. Remote Sensing. 2015 Sep 14;7(9):11753-75. <https://doi.org/10.3390/rs70911753>
- [28] Qu J, Li S, Li Y, Liu L. Research on railway obstacle detection method based on developed Euclidean clustering. Electronics. 2023 Feb 28;12(5):1175. <https://doi.org/10.3390/electronics12051175>
- [29] Hulik R, Spanel M, Smrz P, Materna Z. Continuous plane detection in point-cloud data based on 3D Hough Transform. Journal of visual communication and image representation. 2014 Jan 1;25(1):86-97. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.04.001>
- [30] Awwad TM, Zhu Q, Du Z, Zhang Y. An improved segmentation approach for planar surfaces from unstructured 3D point clouds. The Photogrammetric Record. 2010 Mar;25(129):5-23. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2009.00564.x>
- [31] Xu B, Jiang W, Shan J, Zhang J, Li L. Investigation on the weighted ransac approaches for building roof plane segmentation from lidar point clouds. Remote Sensing. 2015 Dec 23;8(1):5. <https://doi.org/10.3390/rs8010005>
- [32] Li L, Yang F, Zhu H, Li D, Li Y, Tang L. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells. Remote Sensing. 2017 May 3;9(5):433. <https://doi.org/10.3390/rs9050433>
- [33] Torr PH, Zisserman A. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry. Computer vision and image understanding. 2000 Apr 1;78(1):138-56. <https://doi.org/10.1006/cviu.1999.0832>
- [34] Heydari Mozafar, Hosseini. Extracting Façade Points of Urban Buildings from Mobile Laser Scanner Point Clouds. 2023 Jun 22;1(2):163-76. <https://doi.org/10.22061/jrsg.2023.1990>
- [35] Andrade G, Ramos G, Madeira D, Sachetto R, Ferreira R, Rocha L. G-dbscan: A gpu accelerated algorithm for density-based clustering. Procedia Computer Science. 2013 Jan 1;18:369-78. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.200>
- [36] Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012 Dec 15;179:300-14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- [37] Snavely N, Seitz SM, Szeliski R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. In ACM siggraph 2006 papers 2006 Jul 1 (pp. 835-846). <https://doi.org/10.1145/1179352.1141964>
- [38] Nolan J, Eckels R, Evers M, Singh R, Olsen MJ. Multi-pass approach for mobile terrestrial laser scanning. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015 Aug 19;2:105-12.
- Transactions on geoscience and remote sensing. 2009 Nov 3;48(3):1554-67. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030180>
- [15] Zhou G, Cao S, Zhou J. Planar segmentation using range images from terrestrial laser scanning. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2016 Jan 6;13(2):257-61. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2508505>
- [16] Arnaud A, Gouiffès M, Ammi M. On the fly plane detection and time consistency for indoor building wall recognition using a tablet equipped with a depth sensor. IEEE Access. 2018 Mar 21;6: 17643-52. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2817838>
- [17] Weinmann M, Jutzi B, Hinz S, Mallet C. Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015 Jul 1;105:286-304. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.016>
- [18] Lerma JL, Biosca JM. Segmentation and filtering of laser scanner data for cultural heritage. In CIPA 2005 XX international symposium 2005 Sep 26 (Vol. 26, p. 6).
- [19] Stamos I, Yu G, Wolberg G, Zokai S. 3D modeling using planar segments and mesh elements. In Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06) 2006 Jun 14 (pp. 599-606). IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DPVT.2006.5>
- [20] Dold C, Brenner C. Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006 Sep 25;36(5):78-83. <https://doi.org/10.15488/3750>
- [21] Xiao J, Zhang J, Adler B, Zhang H, Zhang J. Three-dimensional point cloud plane segmentation in both structured and unstructured environments. Robotics and Autonomous Systems. 2013 Dec 1;61(12):1641-52. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.07.001>
- [22] Jochem A, Höfle B, Wichmann V, Rutzinger M, Zipf A. Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds. Computers, Environment and Urban Systems. 2012 Jan 1;36(1):54-64. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurb.2011.05.001>
- [23] Kwak E, Al-Durgham M, Habib A. Automatic 3D building model generation from lidar and image data using sequential minimum bounding rectangle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012 Jul 31;39:285-90. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XXXIX-B3-285-2012>
- [24] Hough PV, inventor. Method and means for recognizing complex patterns. United States patent US 3,069,654. 1962 Dec 18.
- [25] Fischler MA, Bolles RC. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM. 1981 Jun 1;24(6):381-95. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>

Control, Automation, Robotics and Vision 2008 Dec 17 (pp. 623-629). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICARCV.2008.4795590>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مرتضی حیدری مظفر در سال ۱۳۹۵، دوره دکتری مهندسی عمران - نقشه‌برداری خود را در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی با موفقیت به اتمام رساند. ایشان از سال ۱۳۹۶ با عنوان استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا مشغول تدریس

و پژوهش هستند. نتایج تحقیقات ایشان در قالب ده‌ها مقاله علمی در نشریات و کنفرانسهای مختلف ارائه شده است. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، هوش مصنوعی، کاربردهای سنجش از دور در مدیریت بلایای طبیعی، پردازش داده‌های لیزر اسکنرهای زمینی و همراه، GIS در صنعت آب و برق.

Heidarimozaffar, M. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

✉ m.heidarimozaffar@basu.ac.ir



سید عادل حسینی دانشجوی دکتری تخصصی دانشکده مهندسی عمران و حمل‌ونقل دانشگاه اصفهان می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی مهندسی عمران - نقشه‌برداری را در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه زنجان و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی

عمران - نقشه‌برداری گرایش سنجش از دور را در سال ۱۴۰۱ از دانشگاه بوعلی سینا همدان دریافت نمودند. در مهر ماه ۱۴۰۱ به عنوان دانشجوی دکتری در این رشته پذیرفته شد. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: قطعه‌بندی و طبقه‌بندی ابرنقطه، مدلسازی مبتنی بر ابرنقطه و تصویر، بارزسازی تصاویر با یادگیری عمیق.

Hosseini, S.A. Student, Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

✉ a.hosseini@trn.ui.ac.ir

<https://doi.org/10.5194/ISPRSANNALS-II-3-W5-105-2015>

[39] Nolan J, Eckels R, Olsen MJ, Yen KS, Lasky TA, Ravani B. Analysis of the multipass approach for collection and processing of mobile laser scan data. *Journal of Surveying Engineering*. 2017 Aug 1;143(3):04017004.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000224](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000224)

[40] Oliveira A, Oliveira JF, Pereira JM, De Araújo BR, Boavida J. 3D modelling of laser scanned and photogrammetric data for digital documentation: the Mosteiro da Batalha case study. *Journal of real-time image processing*. 2014 Dec;9:673-88.
<https://doi.org/10.1007/s11554-012-0242-0>

[41] *International Civil Aviation Authority. Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS). International Civil Aviation Organization; 2015.*

[42] M. Faltýnová, E. Matoušková, J. Šedina, and K. Pavelka, "Building facade documentation using laser scanning and photogrammetry and data implementation into BIM," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 41, no. July, pp. 215–220, 2016,
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B3-215-2016>

[43] Vo AV, Truong-Hong L, Laefer DF, Bertolotto M. Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015 Jun 1;104:88-100. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.011>

[44] Polak M, Zhang H, Pi M. An evaluation metric for image segmentation of multiple objects. *Image and Vision Computing*. 2009 Jul 2;27(8):1223-7.
<https://doi.org/10.1016/j.imavis.2008.09.008>

[45] Yan J, Shan J, Jiang W. A global optimization approach to roof segmentation from airborne lidar point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2014 Aug 1;94:183-93. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.022>

[46] Martin D, Fowlkes C, Tal D, Malik J. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics. In *Proceedings eighth IEEE international conference on computer vision. ICCV 2001* 2001 Jul 7 (Vol. 2, pp. 416-423). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2001.937655>

[47] Saeedi P, Zwick H. Automatic building detection in aerial and satellite images. In *2008 10th International Conference on*

Citation (Vancouver): Heidarimozaffar M, Hosseini S.A. [Comparison of extracting façade points of urban buildings from points cloud of mobile laser scanner and UAV imaging]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 307-320

<https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11266.1084>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluation of the impact of construction in urban areas on air pollution in the troposphere using remote sensing data

A. Amini*, Z. Azargoshayesh, P. Nouri

Department of surveying Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 02 August 2024
 Reviewed: 07 September 2024
 Revised: 23 September 2024
 Accepted: 01 November 2024

KEYWORDS:

Air Pollution
 Sentinel-5
 Construction
 Google Earth Engine

* Corresponding author

✉ sh_aminia@azad.ac.ir

☎ (0+9821) 88833211

Background and Objectives: Today, air pollution is considered as one of the most important problems of human societies. The expansion of urbanization, the development of cities, the increase in population, the increase in construction, the development of industrial activities and the increase in the consumption of fossil fuels, the lack of an efficient public transportation system, the low quality of fuel and the traffic density have caused a large amount of pollutants incompatible with natural mechanisms to be released into the air daily. Air pollution has harmful effects on the environment and human health. The distribution of gases and pollutants in different layers of the atmosphere is not equal. So that some pollutants such as carbon monoxide and sulfur dioxide have a very high concentration in the troposphere layer compared to other layers. Along with other factors that increase pollutants, the construction industry is also one of the major sources of environmental pollution, responsible for about 4% of the production of greenhouse gases, particles and more water pollution than any other industry. Today, due to the excessive growth of the population and the need for housing, it has required that tall buildings rise every day from all corners of the city. Now this issue causes the production of pollutants to increase in cities. Because the increase in population causes an increase in single-passenger cars and issues in this regard. The increase in population and the desire to seek profit through construction replaces the beautiful and natural landscapes of our country with urban areas every year. Population growth causes an increase in construction in an area, and this problem causes the physical development of urban areas over time. In this research, the aim is to investigate the impact of construction on air pollution in the troposphere and also how the concentration of pollutants changes in different seasons of the year.

Methods: The area studied in this research is District 22 of the municipality located in the northwest of Tehran, one of the new areas of Tehran, which was built in order to solve the lack of services in the western area of Tehran and to relocate part of the population living in the dilapidated tissues of central Tehran, and the amount of construction in this area is growing. has been selected and to investigate the construction changes in the study area, the maximum likelihood classification method was used using Sentinel-2 satellite images, and for monitoring carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, tropospheric ozone and aerosol pollutants, Sentinel 5 satellite images were used in the Google Earth Engine system.

Findings: The findings include calculating the amount of construction in the years 2018 to 2022 and providing maps of changes in the concentration of carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, tropospheric ozone and aerosol pollutants per unit of time and space.

Conclusion: The results of this research show that from 2018 to 2022, about 33.12 hectares were added to the construction areas of Tehran's 22nd district, and these construction changes did not affect all gases, and only carbon monoxide and carbon dioxide pollutants had a growing trend. Also, the concentration of mentioned pollutants was higher in winter than other seasons.



NUMBER OF REFERENCES

31



NUMBER OF FIGURES

15



NUMBER OF TABLES

6

مقاله پژوهشی

ارزیابی تاثیر ساخت و ساز در مناطق شهری بر آلودگی هوا در لایه تروپوسفر با استفاده از داده های سنجنش از دور

امیرشاهرخ امینی^{*}، زهرا آذرگشایش، پانیند نوری

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: آلودگی هوا امروزه به عنوان یکی از مهم ترین مشکل جوامع بشری مطرح می باشد. گسترش شهرنشینی، توسعه شهرها، افزایش جمعیت، افزایش ساخت و ساز، توسعه فعالیت های صنعتی و افزایش مصرف سوخت های فسیلی، کمبود سیستم حمل و نقل عمومی کارا، کیفیت کم سوخت و تراکم ترافیک باعث شده که روزانه حجم وسیعی از آلاینده های غیرسازگار با مکانیسم های طبیعی در هوا تخلیه گردد. آلودگی هوا پیامدهای زیان باری بر محیط زیست و سلامتی انسان ها دارد. کیفیت هوا به طور روزانه در تغییر است. حتی در مواقعی که مقدار ورود آلاینده ها به هوا ثابت است عوامل تعیین کننده تغییرات آب وهوایی مانند سرعت باد، جهت باد، نیمرخ حرارتی توده های هوا، مقدار انرژی خورشیدی به منظور انجام واکنش های فتوشیمیایی، مدت زمان دوام باد یا بارندگی به طور ویژه ای کیفیت هوا را تغییر می دهند. توزیع گازها و آلاینده ها در لایه های مختلف اتمسفر به صورت نابرابر است. به طوری که برخی از آلاینده ها مانند منواکسیدکربن و سولفور دی اکسید از تراکم بسیار زیادی در لایه تروپوسفر در مقایسه با سایر لایه ها برخوردار هستند. در کنار دیگر عوامل افزایش آلاینده ها، صنعت ساخت و ساز نیز یکی از منابع عمده آلودگی محیط زیست، مسئول حدود ۴ درصد از تولید گازهای گلخانه ای، ذرات و بیشتر آلودگی آب بیش از هر صنعت دیگری است. امروزه به دلیل رشد بی رویه جمعیت و نیاز به سکونت، ایجاد کرده است که ساختمان های بلند هر روز از گوشه و کنار شهر سر به فلک زنند. حال این مسئله باعث می شود که تولید آلاینده ها در شهرها افزایش یابد. چرا که افزایش جمعیت باعث افزایش خودروهای تک سرنشین و مسابلی در این باب می شود. افزایش جمعیت و تمایل به سودجویی با ساخت و ساز، هرساله مناطق شهری را جایگزین مناظر زیبا و طبیعی کشورمان می نماید. رشد جمعیت موجب افزایش ساخت و ساز در یک ناحیه می شود و این مسئله با گذشت زمان توسعه فیزیکی نواحی شهری را موجب می گردد. در این پژوهش هدف بررسی میزان تاثیر ساخت و ساز بر آلودگی هوا در لایه تروپوسفر و همچنین چگونگی تغییرات غلظت آلاینده ها در فصول مختلف سال می باشد.

روش ها: منطقه مورد مطالعه در این تحقیق منطقه ۲۲ شهرداری واقع در شمال غربی تهران، از مناطق نوساز تهران می باشد که به جهت رفع کمبودهای خدماتی حوزه غرب تهران و جابه جایی بخشی از جمعیت ساکن در بافت های فرسوده تهران مرکزی ساخته شده و میزان ساخت و ساز در این منطقه روند روبه رشدی داشته است. برای بررسی تغییرات ساخت و ساز در منطقه مورد مطالعه از روش طبقه بندی ماکزیم احتمال با بکار بردن تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و برای پایش آلاینده های منوکسید کربن، دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن، ازن تروپوسفری و آئروسول از تصاویر ماهواره سنتینل ۵ در سامانه گوگل ارث انجین بکار برده شده است.

یافته ها: یافته ها شامل محاسبه میزان ساخت و ساز در سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ و ارائه نقشه های تغییرات غلظت آلاینده های منوکسیدکربن، دی اکسید گوگرد، دی اکسید نیتروژن، ازن تروپوسفری و آئروسول در واحد زمان و مکان می باشد.

نتیجه گیری: نتایج این تحقیق نشان می دهد که از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۲ چیزی حدود ۳۳.۱۲ هکتار به مناطق ساخت و ساز منطقه ۲۲ تهران اضافه شده و این تغییرات ساخت و ساز بر روی تمامی گازها تاثیر گذار نبوده و تنها آلاینده های منوکسیدکربن و دی اکسید گوگرد روند رو به رشدی را داشته اند. و همچنین غلظت آلاینده های عنوان شده در فصل زمستان نسبت به سایر فصول بیشتر بوده است.

واژگان کلیدی:

آلودگی هوا

ساخت و ساز

تصاویر سنتینل-۵

گوگل ارث انجین

^{*} نویسنده مسئول

✉ sh_aminia@azad.ac.ir

① ۰۲۱-۸۸۸۳۳۲۱۱

مقدمه

بستگی به غلظت مواد شیمیایی موجود در هوا و همچنین میزان قرار گرفتن افراد در معرض هوای آلوده دارد. بیماری های ناشی از آلودگی های جوی می تواند بسیار پرهزینه باشند به طوری که هزینه های درمانی، کاهش بهره وری در محل کار می تواند سالیانه میلیاردها

امروزه آلودگی هوا به یکی از معضلات اصلی کشورهای در حال توسعه تبدیل شده است. آلودگی هوا به طرق گوناگونی آثار زیانبار دراز مدت و کوتاه مدتی بر سلامت انسان ها می گذارند. معمولاً میزان این آسیب ها

می‌رود به ۵ میلیارد تا سال ۲۰۲۵ افزایش یابد و این افزایش سبب تغییر در ماهیت انواع زمین و سطح زمین می‌گردد. این تغییرات، سبب ایجاد تغییراتی در تنظیمات شهری مطابق با نیازهای مردم می‌شود [۴].

با پیدایش ابر شهرها، بافت شهرها بر اوضاع اقلیمی پیرامون خود اثر گذاشته‌اند و تغییرات خرد اقلیمی به وجود آورده‌اند. خرد اقلیمهای شهری تحت تأثیر افزایش تراکم شهرها، فقدان فضاهای سبز، گرمای ناشی از فعالیت انسانها و آلودگیهای شهری به سمت گرم شدن و پایین آمدن کیفیت هوای شهرها حرکت کرده‌اند. در شهرهای متراکم آلودگی هوا تأثیر زیادی بر سلامت جامعه دارد، که قسمتی از آلودگی هوا در اثر راکد شدن هوا در خیابانهای دره شکل به علت وجود ساختمانهای بلند است. نحوه توزیع ساختمانها نقش تعیین‌کننده‌ای بر میزان جذب انرژی خورشیدی و نوع جریان هوا در شهر دارند. با توجه به میزان تابش خورشید و جریان هوا بین ساختمانها، نقش محیط در پراکندن آلودگیهای جوی و ذرات معلق تعیین‌کننده است [۵].

امروزه به دلیل رشد بی‌رویه جمعیت و نیاز به سکونت، ایجاد کرده است که ساختمانهای بلند هر روز از گوشه و کنار شهر سر به فلک زنند. حال این مسئله باعث می‌شود که تولید آلاینده‌ها در شهرها افزایش یابد. چراکه افزایش جمعیت باعث افزایش خودروهای تک‌سرنشین و مسایلی در این باب می‌شود. افزایش جمعیت و تمایل به سودجویی با ساخت‌وساز، هرساله مناطق شهری را جایگزین مناظر زیبا و طبیعی کشورمان می‌نماید. رشد جمعیت موجب افزایش ساخت‌وساز در یک ناحیه می‌شود و این مسئله با گذشت زمان توسعه فیزیکی نواحی شهری را موجب می‌گردد. تصاویر Sentinel-2 به طور گسترده‌ای برای تشخیص تغییرات شهری و پایش ساخت‌وسازهای شهری استفاده می‌شود.

آلاینده‌ها از لحاظ حالت فیزیکی (جامد، مایع و گاز)، منبع انتشار (سیار، ثابت، طبیعی، انسان‌ساخت) طبقه‌بندی می‌شوند و از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا می‌توان مونوکسیدکربن (CO)، دی‌اکسیدکربن (CO₂)، دی‌اکسیدگوگرد (SO₂)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، متان (CH₄)، ازن تروپوسفری (O₃) و کربن‌های آلی ناپایدار، کلروفلوئورکربنها (CFC) و ذرات معلق یا همان آئروسولها (AI) را نام برد [۶]. که هر کدام دارای اثرات متعددی بر سلامت انسان و محیط زیست هستند. مونوکسیدکربن از طریق احتراق ناقص سوخت‌های حاوی کربن مانند چوب، زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و نفت سفید تولید می‌شود. صنایع و وسایل نقلیه موتوری به عنوان مهمترین منابع برای آلودگی اتمسفری مونوکسیدکربن در محیط‌های شهری شناخته می‌شوند. مواجهه با این آلاینده منجر به اثر بر روی سیستم قلبی-عروقی، ریه‌ها، سیستم اعصاب مرکزی و هموگلوبین خون خواهد شد. دی‌اکسیدگوگرد، گازی بی‌رنگ و با بویی بسیار تند است. این آلاینده با سوزاندن سوخت‌های حاوی گوگرد، مثل زغال سنگ و بخشی از روغن‌ها تولید می‌شود. در واقع وسایل نقلیه، نیروگاه‌های برق و گرمایش عوامل اصلی تولید این آلاینده

دلارهزینه بر جامعه تحمیل کنند [۱]. رفع آلودگی‌های زیست محیطی امروزه به یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های بشر تبدیل شده است. کیفیت هوا در شهرها بستگی به شرایط جوی و میزان تولید آلاینده‌ها دارد. امروزه آلودگی هوا یکی از پیچیده‌ترین معضلات جوامع بشری می‌باشد که تأثیرات منفی بسیاری بر سلامت موجودات زنده و به خصوص انسان بر جای گذاشته است. آلودگی هوا و تأثیرات ناشی از آن، یکی از منابع تهدیدکننده سلامت انسان، حیوان و گیاهان است. مشکلات آلودگی هوا می‌تواند از سطح کوچک، بیماری‌های خطرناک تا سطح بزرگ و جهانی، بارش اسیدی، لایه ازن و پدیده گرمایش جهانی را شامل شود. منشاء آلودگی هوا در اوایل انقلاب صنعتی، مربوط به صنایع و سوخت زغال سنگ بوده است، درحالی که در قرن حاضر بیشترین علل ایجاد آلودگی هوا در شهرها مربوط به حمل و نقل درون شهری است. با توجه به خطراتی که آلودگی هوا برای سلامت انسانها و سایر اجزاء محیط زیست دارد، شناخت جوانب مختلف این آلودگی از اهمیت زیادی برخوردار است و تنها با آگاهی و شناخت از این مسئله، امکان جلوگیری و کاهش خطرات آن وجود دارد [۲].

صنعت ساخت‌وساز یکی از منابع عمده آلودگی محیط زیست، مسئول حدود ۴ درصد از تولید گازهای گلخانه‌ای، ذرات و بیشتر آلودگی آب بیش از هر صنعت دیگری و هزاران شکایت از سروصدای ناشی از ساخت در هر سال است. آلودگیهای اصلی ناشی از ساخت‌وساز در شهرها عبارتند از آلودگی هوا، آب و آلودگی صوتی. افزایش حجم ساخت و ساز همزمان با افزایش تعمیرات و آواربرداری از ساختمانهای فرسوده، کنگرنی و غیره نیز به این آلودگی افزوده است. با دقت در این موضوع می‌توان به یک نتیجه مستقیم دیگر نیز رسید و آن افزایش آلودگیهای زیست محیطی ناشی از ساخت‌وساز است. ساختمان‌های بلند، امروزه نقش بسزایی در اسکان دادن جمعیت شهرها و پیشبرد فعالیت‌های شهری داشته و البته تأثیر وسیعی بر محیط اطراف خود دارند. این تأثیرات شامل موضوعات متنوعی همچون وضعیت ترافیک، عبور و مرور معابر اطراف، محیط زیست، وضع سایه‌اندازی و همچنین برخی تأثیرات اقلیمی مانند وضعیت جریان هوا می‌باشند. در شرایط کنونی، با توجه به ساخت بناهای بلند در کلان شهرهایی چون تهران، موضوع تأثیر مثبت یا منفی این بناها بر وضعیت جریان هوا مورد مناقشه قرار گرفته است. به عقیده برخی، این بناها در بعضی مناطق مانند سدی در برابر جریان هوا عمل کرده و تأثیر منفی داشته است، اما از سوی دیگر برخی به تأثیر مثبت آن‌ها بر جریان هوا و رفع آلودگی اعتقاد دارند [۳].

بعد از انقلاب صنعتی و استفاده بی‌رویه انسان‌ها بسیاری از مناطق با پوشش طبیعی جای خود را به پوشش انسان ساخت داده است و باعث تشدید آلودگی هوا شده است. در کلان شهرهایی مانند تهران این نرخ رشد بیشتر بوده است. شهرها تقریباً ۲ درصد سطح زمین را اشغال می‌کنند در حالی که ساکنین شهرها بالای ۷۵ درصد منابع انرژی جهان را مصرف می‌نمایند. جمعیت شهرنشینی در ۱۰۰ سال گذشته از ۱۶۰ میلیون نفر به ۳ میلیارد افزایش یافته است. این رقم انتظار

تحولات سریع علم و صنعت طی صد سال اخیر سبب تولید حجم زیادی کربن و سایر گازهای آلاینده در سطح جهانی شده است. امروزه نتایج آن را می‌توان در ایجاد حفره در لایه محافظ زمین (ازن) در قطب جنوب، شکل‌گیری گازهای شیمیایی متعدد، نامساعد شدن هوای محیط زیست، تشدید حالت گلخانه‌ای و در نتیجه گرم شدن بیش از حد کره زمین مشاهده کرد. پایداری این وضعیت، سلامت کلیه موجودات کره زمین را تهدید می‌کند [۱۲]. کاربرد سنجش از دور در مطالعات آلودگی هوا بیش از سه دهه است که مورد بررسی قرار گرفته و از قدمت بالایی برخوردار است. از زمان استفاده از نخستین ماهواره سنجش از دوری که برای اندازه‌گیری آلاینده‌ها طراحی شد (MAPS بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۹ میلادی) با استفاده از باندهای مادون قرمز برای شناسایی و پایش تغییرات منوکسیدکربن ناشی از آتش‌سوزی‌های پوشش گیاهی با فاصله زمانی ۸ تا ۱۰ روز در مقیاس جهانی استفاده شده است. از آن زمان تاکنون، ماهواره‌ها و سنجنده‌های متفاوتی با طول موج‌ها و مقیاس مشابه برای پایش آلودگی استفاده شده است و در کنار باندهای مادون قرمز، باندهای مرئی و ماورا بنفش نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

امروزه داده‌های اخذ شده از ماهواره‌ها، امکان اندازه‌گیری تغییرات و غلظت گازها و آلاینده‌های مختلف در جو را در مقیاس جهانی، ملی و محلی برای کشورها و در سطح شهرهای مختلف فراهم ساخته است. مدل‌های هواشناسی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای به صورت ساعتی و روزانه وضعیت آلاینده‌ها را ثبت و گزارش کرده و بدین طریق کانون‌ها و الگوهای آلاینده‌ها تعیین و مشخص می‌شود. بنابراین فناوری سنجش از دور برای شناسایی منابع و مراکز آلودگی هوا، غلظت و شدت آلودگی، حرکت و تغییر مکان آلاینده‌ها کاربردهای متعددی دارد. با کمک این فناوری می‌توان در راستای کاهش آلودگی هوا و داشتن هوای پاک و سالم در سیاره زمین تصمیمات مناسب و کارشناسی اتخاذ کرد [۱۴].

مروری مختصری بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد محققان در خارج کشور از تصاویر سنتینل-۵ برای پایش دی‌اکسیدگوگرد [۱۵]، دی‌اکسید نیتروژن [۱۶، ۱۷]، منوکسیدکربن [۱۸]، ازن [۱۹]، آئروسول [۲۰] و غیره بهره برده‌اند و در داخل کشورمان نیز محققان به پایشی جامع بر اساس مقادیر برخی از مهمترین آلاینده‌های هوا از جمله دی‌اکسید نیتروژن، دی‌اکسید گوگرد، منواکسید کربن و ذرات معلق، برای ۲۰ شهر بزرگ و صنعتی ایران در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ [۲۱] و شناسایی کانونهای آلاینده‌های هوا، منوکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، دی‌اکسیدنیتروژن، ازن و آئروسول در ایران [۲۲] و بررسی آلودگی دی‌اکسید نیتروژن به صورت زمانی-مکانی در استان خوزستان [۲۳]، بررسی میزان تغییرات آلاینده‌های هوا در دوره انتشار ویروس کووید-۱۹ که به تغییرات زمانی و مکانی میزان آلاینده‌های جوی در فروردین ماه ۱۳۹۹ همزمان با انتشار ویروس کووید-۱۹ برای کشور ایران تعیین شده و با مقادیر دوره مشابه در سال ۹۸ مقایسه شده [۲۴] و بررسی اثرات توسعه شهری بر کیفیت هوا [۲۵]، که از داده‌های سنتینل-۵ بهره برده شده است.

هستند. این آلاینده می‌تواند در مسافت‌های طولانی جا به جا شده و به تولید ازن هم کمک کند یکی از آلاینده‌های اصلی و محرک دستگاه تنفسی است که میزان انتشار آن به دلایل رشد اقتصادی و استفاده بی‌رویه انرژی در حال افزایش است و از منابع زیادی از جمله نیروگاه‌ها، مخازن ذوب فلزات، صنایع سنگین و ترافیک شهری وارد هوا شده و منجر به برخی ناراحتی‌های قلبی-عروقی و هم چنین افزایش میزان ابتلاء و مرگ و میر می‌گردد [۷]. ازن یکی از آلاینده‌های بسیار مهم دیگری است که به خصوص در فصل تابستان غلظت‌های بالاتری از آن وجود دارد و در این فصل دارای اثرات بیش‌تری است. ذرات معلق شامل سولفات، نیترات، کربن ارگانیک، کربن عنصری، ریزگرد و نمک دریایی است.

نیتروژن دی‌اکسید یک آلاینده گازی است و به عنوان یکی از بزرگترین مقصرهای آلودگی شهرها شناخته می‌شود. حجم بزرگی از این آلاینده منشا انسانی دارد. وسایل نقلیه و نیروگاه‌ها از منابع اصلی تولید نیتروژن دی‌اکسید هستند. مقادیر زیاد این آلاینده می‌تواند مخاط مجاری تنفسی شما را تحریک و ملتهب کند و در نهایت باعث سرفه‌های متعدد در کوتاه‌مدت و بیماری‌هایی مثل آسم و آلرژی در بلند مدت شود [۸]. ازن یک آلاینده گازی است که از ۳ اتم اکسیژن تشکیل می‌شود. در سطح بالای جو زمین، این گاز تاثیر مثبتی دارد و اشعه ماورای بنفش نور خورشید را جذب می‌کند. اما در نزدیکی سطح زمین، ازن با واکنش شیمیایی که بین اشعه خورشید و گازهای آلی و اکسیدهای نیتروژن ساطع شده توسط اتومبیل‌ها، نیروگاه‌ها، گیاهان و سایر منابع به وجود می‌آید، تولید می‌شود [۹].

استفاده از سنجنده‌های ماهواره‌ای در پایش آلودگی هوا و ذرات معلق مزایای زیادی را نسبت به ایستگاه‌های زمینی سنجش آلودگی به همراه دارد. از این رو مدهاست که کاربرد این سنجنده‌ها برای سنجش آلودگی هوا و به خصوص ذرات معلق غبار مورد توجه متخصصین و مدیران شهری قرار گرفته است. سنجنده‌های گوناگون با طول موج‌ها و دقت‌های متفاوت برای این منظور در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که از این میان می‌توان به سنجنده TOMS و MODIS اشاره کرد.

از سوی دیگر از میان ماهواره‌هایی که امکان ثبت داده‌های مربوط به آلودگی هوا را ممکن می‌سازد، ماهواره سنتینل-۵ و سنجنده سوار بر آن (TROPOMI)، که صرفاً برای پایش و کنترل آلاینده‌های هوا به فضا ارسال شده، قابلیت بالایی در شناسایی و پایش گازهای ازن، فرمالدئید، دی‌اکسیدگوگرد، متان، منوکسیدکربن، دی‌اکسیدنیتروژن و آئروسول را دارد [۱۰]. سنجنده TROPOMI به صورت روزانه نقشه‌های آلودگی هوا را تهیه می‌کند و می‌توان بصورت مستقیم اطلاعات را دریافت کرد [۱۱]. پیش‌بینی و بررسی آلودگی هوا یکی از راه کارهای مدیریتی برای جلوگیری و یا کاهش پیامدهای مخرب آن است که استفاده از داده‌های سنجش از دوری را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.

شمال غربی تهران، از مناطق نوساز تهران می‌باشد که به جهت رفع کمبودهای خدماتی حوزه غرب تهران و جابه‌جایی بخشی از جمعیت ساکن در بافت‌های فرسوده تهران مرکزی ساخته شده است. این منطقه از سمت شمال به کوهستان البرز، از سمت شرق به حریم رودخانه کن، از سمت جنوب به آزاد راه تهران-کرج و از سمت غرب به جنگل‌های دست کاشت وردآورد محدود می‌شود. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه مشخص شده است. تغییرات ساخت‌وساز برای سال‌های ۲۰۱۸ و تا اوایل ۲۰۲۲ محاسبه شده و میزان تغییرات غلظت آلاینده‌های دی‌اکسیدنیترژن، دی‌اکسیدگوگرد، منوکسیدکربن و ذرات معلق برای سال‌های ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۲۱ پایش خواهد شد.

داده‌های مورد مطالعه

در این پژوهش از داده‌های سنتینل-۲ برای بررسی تغییرات میزان ساخت‌وساز در منطقه مورد مطالعه و از داده‌های سنتینل-۵ برای پایش آلاینده‌های منواکسیدکربن، دی‌اکسیدنیترژن، دی‌اکسیدگوگرد و آئروسول استفاده شده است. برای بررسی تغییرات و میزان ساخت‌وساز در داخل منطقه مورد مطالعه نیاز به تهیه نقشه کاربری اراضی می‌باشد. نقشه‌های کاربری اراضی برای بسیاری از فعالیت‌های مدیریتی، هیدرولوژی و بررسی وضعیت فرسایش خاک ضروری می‌باشند. داده‌های سنجش از دور از پتانسیل بالایی برای تهیه نقشه‌های به‌روز کاربری و پوشش اراضی برخوردارند. یکی از مهمترین روش‌های استخراج اطلاعات از تصاویر سنجش از دور، طبقه‌بندی است که به کاربران امکان تولید انواع اطلاعات مختلف از قبیل نقشه‌های پوششی، نقشه‌های کاربری و نقشه تغییرات را می‌دهد. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی و از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال برای فرایند طبقه‌بندی استفاده شده است.

از آنجا که در پژوهش حاضر از تصاویر سنتینل-۲ برای پایش تغییرات ساخت‌وساز منطقه ۲۲ تهران استفاده شده است، از این رو به مرور مختصری از مطالعات گذشته در باب قابلیت تصاویر سنتینل-۲ پرداخته می‌شود.

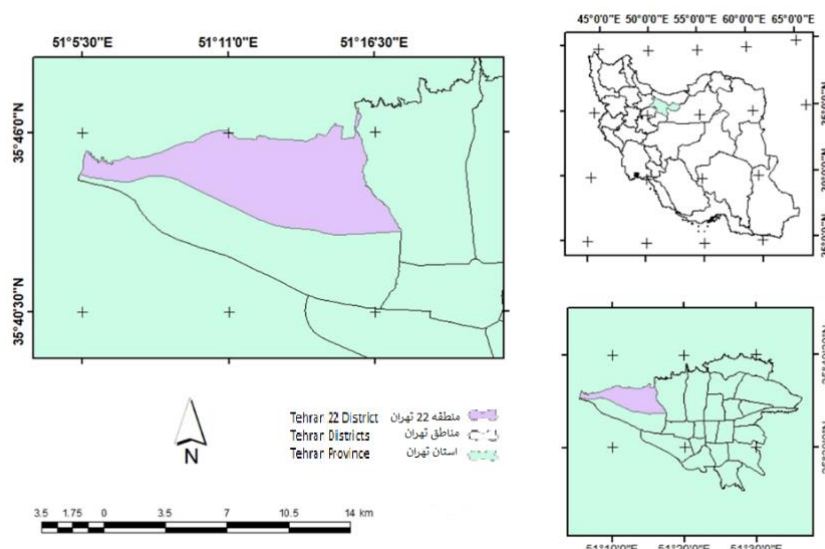
پایش مناطق شهری برای تهیه نقشه‌های دقیق‌تر و مطمئن‌تر [۲۶] و برای پایش و تهیه نقشه مناطق شهری و تاثیر دو شاخص NDBI و NDI بر توسعه شهری و آلودگی هوا [۲۷] و برای تشخیص ساختمان‌ها با استفاده از الگوریتم SVM [۲۸] از تصاویر سنتینل-۲ بهره برده‌اند. در داخل کشور نیز محققان با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ در قزوین به بررسی تغییرات مناطق شهری بدلیل رشد سریع جمعیت و افزایش شهرنشینی [۲۹] و استخراج مناطق ساخته شده محدوده شهر سیرجان [۳۰] پرداختند.

با توجه به اهمیت پایش آلودگی هوا و شناخت عوامل ایجاد کننده آن در مناطق شهری در حال توسعه و نیز توانمندی و قابلیت‌های بالای استفاده از سنجش از دور و ماهواره سنتینل-۵، در این پژوهش منطقه ۲۲ تهران بدلیل توسعه و افزایش ساخت‌وساز در طی سالهای مورد مطالعه به عنوان منطقه مورد مطالعاتی انتخاب شده است. در این پژوهش هدف بررسی میزان تاثیر ساخت و ساز بر آلودگی هوا در لایه تروپوسفر و همچنین چگونگی تغییر غلظت آلاینده‌ها در فصول مختلف سال می‌باشد. در ادامه، ابتدا منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده معرفی شده، سپس نتایج پایش صورت گرفته مورد بحث واقع می‌شود و در انتها مطالب این پژوهش جمع‌بندی می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق منطقه ۲۲ شهرداری واقع در



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig. 1: Location of study area

قرمز با طول موج کوتاه پشتیبانی می‌کند، در ارتفاع ۸۲۴ کیلومتری قرار دارد و به نحو قابل قبولی در شناسایی گازهای ازن، متان، فرمالدئید، آژرسل، منوکسیدکربن، دی‌اکسیدنیتروژن، دی‌اکسیدگوگرد می‌تواند مفید واقع شود. پاره‌ای از مهمترین مشخصات ماهواره سنتینل-۵ را در جدول ۲ ارائه شده است.

به منظور پایش آلودگی هوا در سراسر دنیا از سامانه گوگل ارث انجین استفاده شده است [۳۱]. سامانه گوگل ارث انجین یک سامانه ابری است که کاربران می‌توانند در مقیاس محلی تا جهانی از دیتاهای آن استفاده کنند. (Engine 2021)

یافته‌ها

برای اینکه تاثیر ساخت‌وساز بر آلودگی هوا مشخص شود ابتدا لازم است که بررسی تغییرات از نظر سطح انسان ساخت (Impervious Surface) صورت بگیرد. بعد از بررسی تغییرات بین سالهای ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ نمودار تغییرات آلاینده‌های گفته شده ارائه و تاثیر این ساخت و ساز بر میزان هر کدام از این آلاینده‌ها در واحد زمان و فصل‌های مختلف مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

دومین سری از ماهواره‌های Sentinel در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ ماموریت خود را آغاز کرد. ماهواره دارای مدار قطبی است که ماموریت آن اخذ تصاویر با وضوح بالا برای پایش منابع زمینی می‌باشد. این ماهواره دارای ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه است. این سنجنده دارای توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری، قدرت تفکیک رادیومتری ۱۲ بیت و عرض باند ۴۴۳-۲۱۹۰ نانومتر می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات باندهای ماهواره سنتینل-۲ ارائه شده است.

ماهواره سنتینل-۲ دارای کاربردهای زیادی در علوم طبیعی است. شاید بتوان گفت مهمترین کاربرد آن در مطالعات پوشش گیاهی و علوم طبیعی است. این سنجنده در مباحث مربوط به کاربری اراضی، مخاطرات طبیعی و شاخص گیاهی، آب و خاک کاربردهای زیادی دارد. برای پایش آلاینده‌ها در این پژوهش از تصاویر سنجنده TROPOMI ماهواره سنتینل-۵ استفاده شده است که اولین ماموریت برنامه کوپرنیکوس برای کنترل آلودگی هوا می‌باشد. به صورت کلی هدف از این ماهواره اندازه‌گیری کیفیت هوا، پایش ازن استراتوسفر، اندازه‌گیری اشعه خورشیدی و نظارت بر وضعیت آب و هوا می‌باشد. این سنجنده که از باندهای ماورابنفش، باندهای مرئی، مادون قرمز کوتاه و مادون

جدول ۱: مشخصات باندهای ماهواره سنتینل-۲

Table 1: Characteristics of Sentinel-2 satellite bands

Sentinel-2 bands	Sentinel-2A		sentinel-2B		
باندهای سنتینل-۲	Central wavelength(nm)	Bandwidth(nm)	Central wavelength(nm)	Bandwidth(nm)	Spatial resolution
		طول موج میانی		طول موج میانی	قدرت تفکیک مکانی
Band 1 – Coastal aerosol	442.7	21	442.2	21	60
Band 2 – Blu	492.4	66	492.1	66	10
Band 3 – Green	559.8	36	559.0	36	10
Band 4 – Red	664.6	31	664.9	31	10
Band 5 - Vegetation red edge	704.1	15	703.8	16	20
Band 6 - Vegetation red edge	740.5	15	739.1	15	20
Band 7 – Vegetation red edge	782.8	20	779.7	20	20
Band 8 - NIR	832.8	106	832.9	106	10
Band 8A – Narrow NIR	864.7	21	864.0	22	20
Band 9 – Water vapour	945.1	20	943.2	21	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
Band 11 – SWIR	1613.7	91	1610.4	94	20
Band 12 – SWIR	2202.4	175	2185.7	185	20

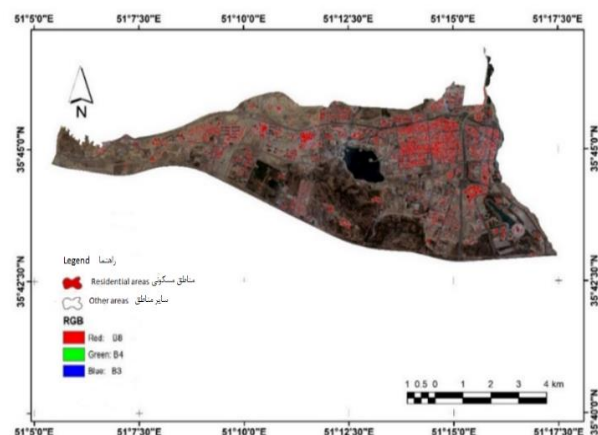
جدول ۲: مشخصات ماهواره سنتینل-۵

Table 2: Characteristics of Sentinel-5 satellite

Property مشخصات	Info اطلاعات
Spatial resolution قدرت تفکیک مکانی	Up to 5.5km×3.5km.
Sensor سنسور	Tropospheric monitoring instrument (TROPOMI), a spectrometer measuring ultraviolet and visible (270-495 nm), near infrared (675-775 nm) and shortwave infrared (2305-2385 nm) light.
Revisit time زمان گذر	Less than one day.
Spatial coverage پوشش مکانی	Global coverage.
Data availability دسترسی داده‌ها	Since April 2018.
Common usage/purpose کاربرد رایج/ هدف	To provide global information on a multitude of atmospheric trace gases, aerosols and cloud distributions affecting air quality and climate.

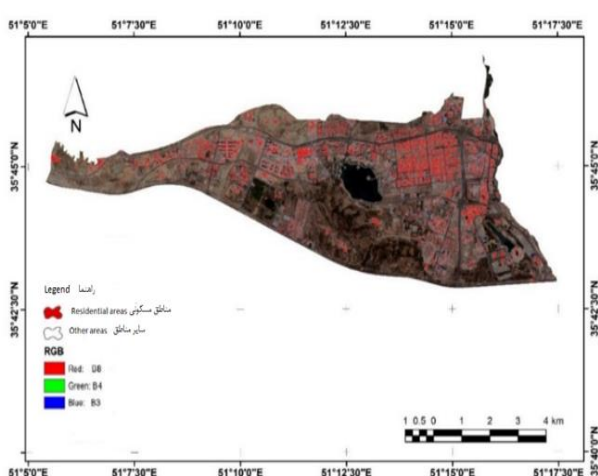
بررسی تغییرات ساخت‌وساز

به منظور بررسی تغییرات ساخت‌وساز از تصاویر ماهواره‌ای سری سنتینل-۲ و شناسایی ساخت‌وساز از الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال استفاده شده است. روش حداکثر احتمال از روش‌های نظارت شده پارامتریک می‌باشد که از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. در این روش احتمال اینکه یک پیکسل به تمامی کلاس‌ها تعلق داشته باشد محاسبه شده و به کلاس با بیشترین احتمال تعلق می‌گیرد. به این منظور فرض بر این گذاشته می‌شود که داده‌های نمونه تعلیمی، توزیع نرمال دارند. و تغییرات ساخت‌وساز پایش شده است. در شکل ۲ و شکل ۳ تصاویر سنتینل-۲ برای سال ۲۰۱۸ و سال ۲۰۲۲ نمایش داده شده است.



شکل ۴: نقشه مناطق ساخت و ساز در سال ۲۰۱۸

Fig. 4: Map of construction areas in 2018



شکل ۵: نقشه مناطق ساخت‌وساز در سال ۲۰۲۲

Fig. 5: Map of construction areas in 2022

جدول ۳: نتایج صحت طبقه‌بندی به روش حداکثر احتمال

Table 3: Classification accuracy results by maximum likelihood method

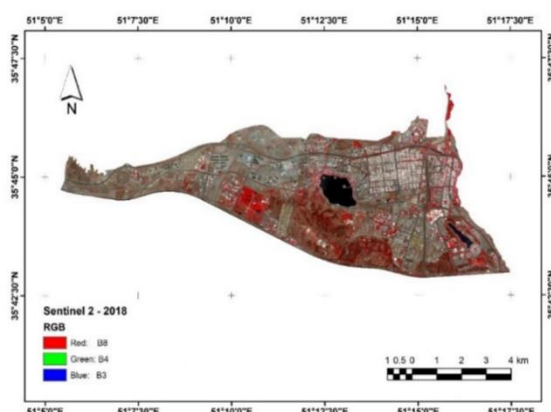
سال Year	دقت کلی Overall Accuracy	kappa ضریب کاپا coefficient
2018	0.91	0.84
2022	0.93	0.86

بر اساس نتایج بدست آمده بین این زمانها چیزی حدود ۳۳ هکتار به مساحت مناطق ساخت‌وساز اضافه شده است. در جدول ۴ مساحت ساخت‌وساز و اختلاف آنها به تفکیک ارائه شده است. بر اساس نتایج، مساحت مناطق ساخت‌وساز در سال ۲۰۱۸ معادل ۳۴۸ هکتار و برای سال ۲۰۲۲ معادل ۳۸۲ هکتار می‌باشد.

جدول ۴: نتایج تغییرات مساحت مناطق ساخت‌وساز در منطقه ۲۲ تهران

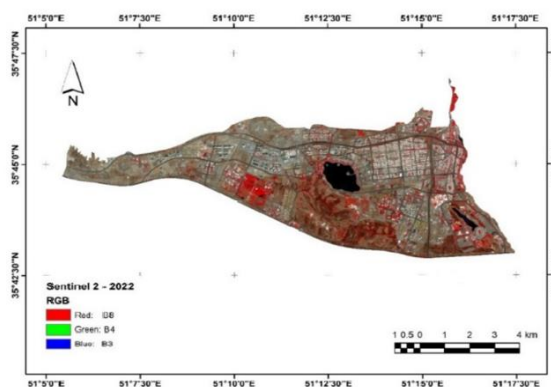
Table 4: The results of changes in the construction areas in the 22 district of Tehran

سال Year	مساحت به هکتار Area in hectares
2018	348.88
2022	382
The area difference between two time periods	
اختلاف مساحت بین دو دوره زمانی	
	33.12



شکل ۲: تصویر سنتینل-۲ منطقه ۲۲ تهران سال ۲۰۱۸

Fig. 2: Sentinel-2 images of 22 district of Tehran in 2018



شکل ۳: تصویر سنتینل-۲ منطقه ۲۲ تهران سال ۲۰۲۲

Fig. 3: Sentinel-2 images of 22 district of Tehran in 2022

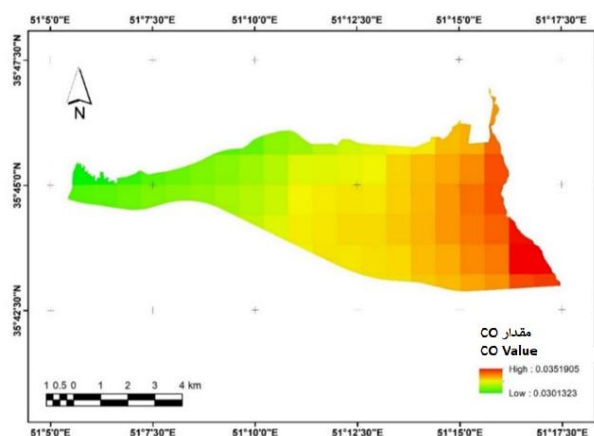
سپس بر اساس روش طبقه‌بندی مناطق ساخت‌وساز در بین این بازه زمانی شناسایی شده و بر روی نقشه شکل‌های ۴ و ۵ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده بین این ۴ سال تغییراتی در ساخت و ساز منطقه صورت گرفته است. در جدول ۳ نتایج صحت کلی و ضریب کاپا بر اساس تصاویر گوگل ارث بدست آمده و نتایج آن نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده طبقه‌بندی حداکثر احتمال دارای ضریب کاپا میانگین ۰.۸۶ بوده است.

بررسی آلاینده‌های هوا

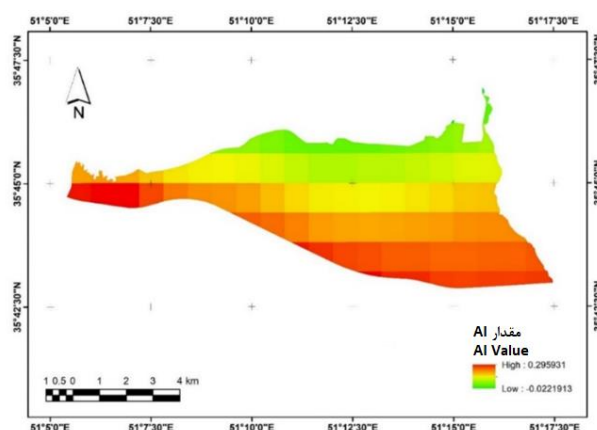
بعد از بررسی تغییرات ساخت‌وساز نوبت به بررسی تغییرات غلظت آلاینده‌های مختلف در واحد زمان و مکان می‌باشد. در زیر نتایج بطور جداگانه ارائه شده است.

بررسی آتروسول (AI)

در شکل ۶ میانگین مقدار AI ارائه شده است. بر اساس این نقشه در قسمتهای شمالی غربی و قسمتهای جنوبی منطقه غلظت این گاز بیشتر بوده است.



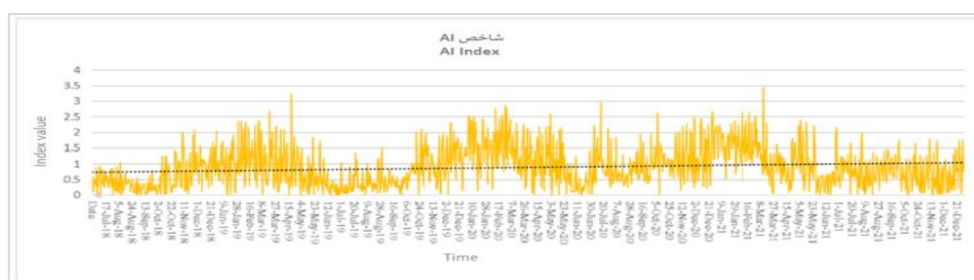
شکل ۸: روند تغییرات شاخص CO در واحد مکان
Fig. 8: The trend of spatial changes of the CO index



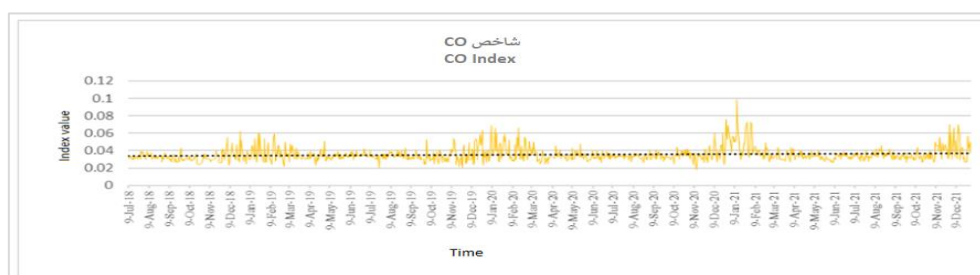
شکل ۶: نقشه تغییرات مکانی شاخص AI
Fig. 6: AI index spatial changes map

همانگونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است مقدار این آلاینده در بخش‌های شرقی که ساخت‌وساز بیشتر است مقدار بالاتری به نسبت سایر مناطق دارد. این افزایش مقدار می‌تواند ناشی از ساخت‌وسازهای بیشتر در بخش‌های شرقی منطقه ۲۲ تهران باشد. در شکل ۹ نمودار تغییرات آلاینده منوکسیدکربن در واحد زمان نمایش داده شده است. بر اساس نتایج می‌توان مشاهده کرد که از سال ۲۰۲۰ شدت این گاز در هوا بیشتر شده و نقاط پیک بالاتری را تجربه کرده است.

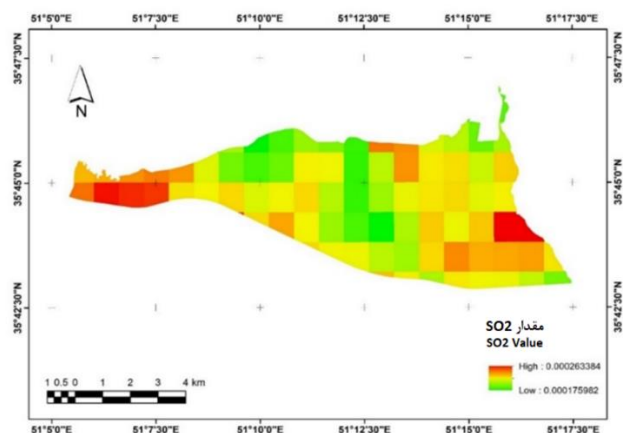
همچنین در شکل ۷ روند تغییرات زمانی شاخص AI در واحد زمان ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مقدار این آلاینده در طول این بازه زمانی روند رشد زیادی نداشته است و می‌توان گفت که ساخت‌وساز



شکل ۷: روند تغییرات شاخص AI در واحد زمان
Fig. 7: The trend of temporal changes of the AI index



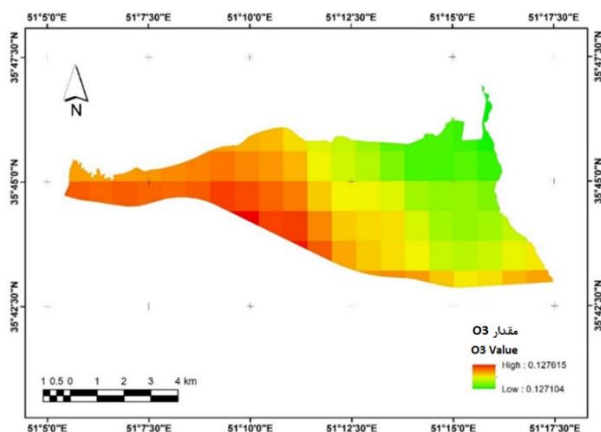
شکل ۹: روند تغییرات شاخص CO در واحد زمان
Fig. 9: The trend of temporal changes of the CO index



شکل ۱۲: روند تغییرات شاخص SO2 در واحد مکان
Fig. 12: The trend of spatial changes of the SO2 index

ازن (O3)

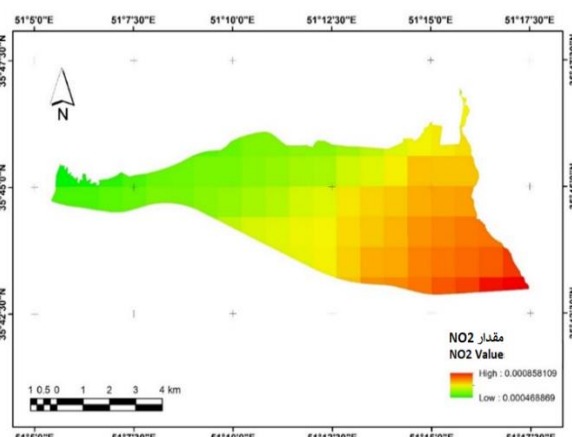
در شکل ۱۴ روند تغییرات مکانی این آلاینده نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده غلظت این آلاینده در بخش‌های غربی و جنوب‌غربی شدت بیشتری داشته است. در شکل ۱۵ روند تغییرات زمانی این آلاینده نمایش داده شده است. بر اساس این نمودار روند معناداری بین افزایش ساخت‌وساز و لایه ازن مشاهده نشده است.



شکل ۱۴: روند تغییرات شاخص O3 در واحد مکان
Fig. 14: The trend of spatial changes of the O3 index

بررسی دی‌اکسیدنیترژن

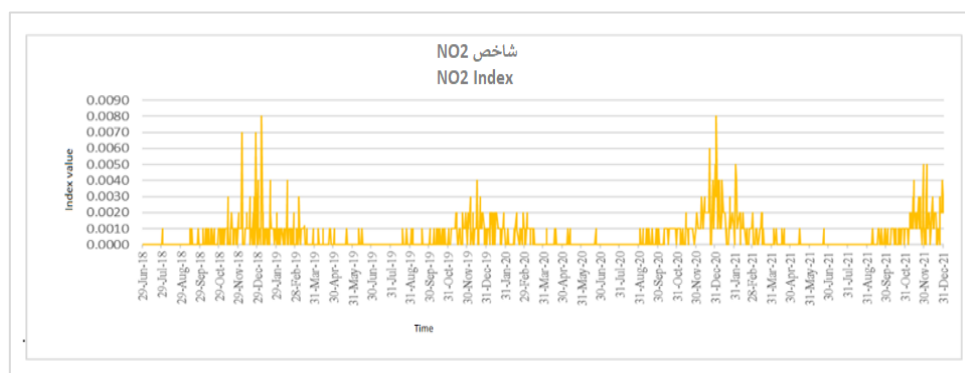
در شکل ۱۰ روند تغییرات گاز دی‌اکسیدنیترژن به صورت مکانی نمایش داده شده است. بر اساس نقشه بدست آمده در قسمت‌های شرقی مخصوصاً جنوب شرقی غلظت این گازها بسیار زیاد بوده است. که با توجه به وجود سازه‌های بیشتر در این نقاط می‌تواند طبیعی باشد. همچنین در شکل ۱۱ روند تغییرات زمانی این آلاینده نمایش داده شده است. بر اساس نتایج روند خاصی بین تغییرات این آلاینده با افزایش ساخت‌وساز وجود ندارد.



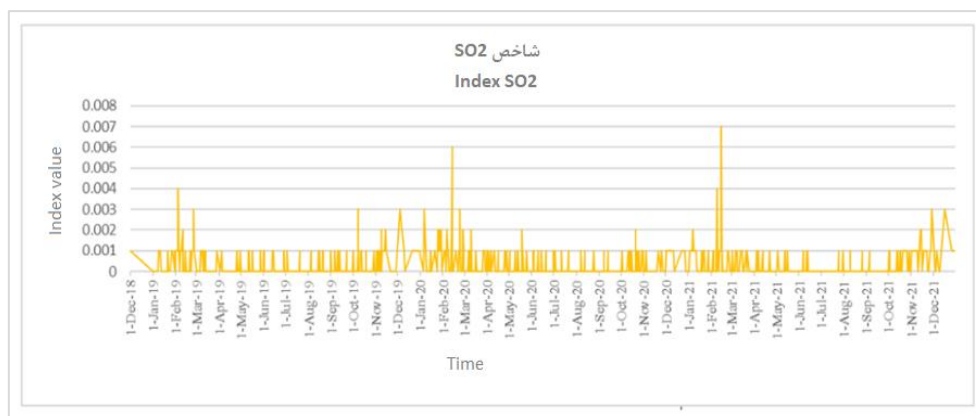
شکل ۱۰: روند تغییرات شاخص NO2 در واحد مکان
Fig. 10: The trend of spatial changes of the NO2 index

بررسی گوگرددی‌اکسید

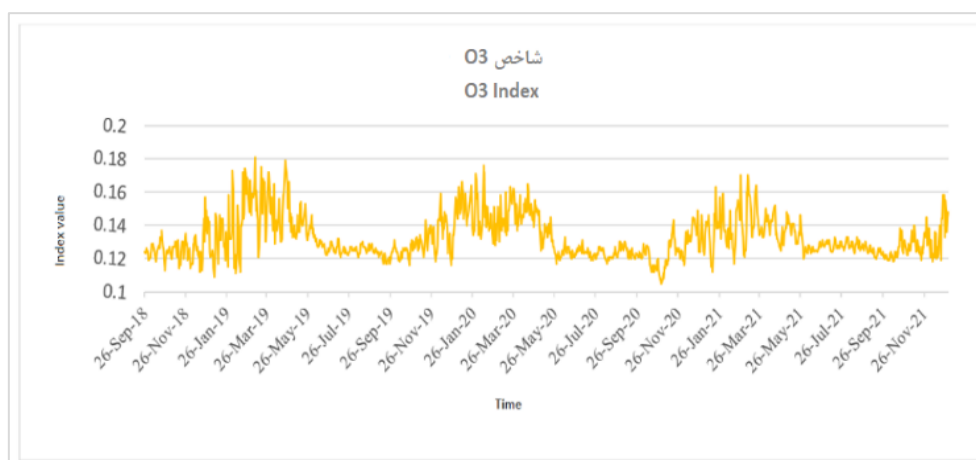
در شکل ۱۲ روند تغییرات این آلاینده به صورت مکانی نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در قسمت‌های شرقی و غربی شاهد افزایش چشمگیر این آلاینده هستیم. همچنین در شکل ۱۳ نمودار تغییرات این آلاینده در واحد زمان نمایش داده شده است. بر اساس تغییرات زمانی از سال ۲۰۲۱ روند روبه رشدی از این گاز را در داخل منطقه شاهد هستیم.



شکل ۱۱: روند تغییرات شاخص NO2 در واحد زمان
Fig. 11: The trend of temporal changes of the NO2 index



شکل ۱۳: روند تغییرات شاخص SO₂ در واحد زمان
Fig. 13: The trend of temporal changes of the SO₂ index



شکل ۱۵: روند تغییرات شاخص O₃ در واحد زمان
Fig. 15: The trend of temporal changes of the O₃ index

آئروسل نیز در فصول مختلف در طول سال‌های مختلف روند روبه رشدی مشاهده می‌شود. جدول ۶ شامل داده‌های درخواست شده از شرکت کنترل کیفیت هوا برای ایستگاه شهرداری منطقه ۲۲ تهران (<https://airnow.tehran.ir/archive/request.aspx>) می‌باشد که برای مقایسه با داده‌های بدست آمده از سنتینل ۵- استفاده شده است. مطابق با داده‌های جدول ۶ نیز شاهد روند افزایشی برای منوکسیدکربن و دی‌اکسیدگوگرد هستیم.

بررسی تغییرات فصلی آلاینده‌ها

روند تغییرات فصلی برای ۴ سال در جدول ۵ نمایش داده شده است. برای گاز منوکسیدکربن در طول تمام فصل روند روبه رشد از این آلاینده مشاهده می‌شود. برای گاز دی‌اکسیدگوگرد روند منطقی و قابل چشمگیری مشاهده نمی‌شود. برای آلاینده دی‌اکسیدنیتروژن روند روبه رشدی در غلظت این گاز در تمامی فصلها با افزایش ساخت‌وساز مشاهده می‌شود. برای گاز ازن نیز روند منطقی مشاهده نشده است. از نظر میزان

جدول ۵: تغییرات فصلی آلاینده‌های هوا
Table 5: Seasonal changes of air pollutants

	2018	2019	2020	2021
CO				
بهار Spring		0.033963	0.034625	0.0338
تابستان Summer	0.032966	0.034516	0.032941	0.034103
پاییز Fall	0.031458	0.032406	0.033988	0.035472
زمستان Winter	0.03704	0.038291	0.042483	0.044744
So ₂				
بهار Spring		0.000133	0.00012	0.000102

	2018	2019	2020	2021
تابستان Summer		0.000113	9.91E-05	6.25E-05
پاییز Fall		0.00031	0.000153	0.00033
زمستان Winter	0.001	0.00054	0.000804	0.000564
No2				
بهار Spring		0.00035	0.000198	0.000188
تابستان Summer	1.25E-05	3.48E-05	8.93E-06	8.62E-06
پاییز Fall	0.000391	0.000398	0.000549	0.000752
زمستان Winter	0.001263	0.000959	0.001079	0.001595
O3				
بهار Spring		0.14783	0.142895	0.13893
تابستان Summer		0.126765	0.123158	0.127397
پاییز Fall	0.124851	0.125737	0.121868	0.125667
زمستان Winter	0.129969	0.13641	0.142965	0.135324
AI				
بهار Spring		0.88007	1.086904	1.063826
تابستان Summer	0.279925	0.324678	0.652886	0.167759
پاییز Fall	0.454324	0.722061	1.062167	0.349596
زمستان Winter	0.905526	1.131429	1.494769	1.193955

جدول ۶: تغییرات فصلی آلاینده‌های هوای ایستگاه زمینی واقع در شهرداری منطقه ۲۲
Table 6: Seasonal changes of air pollutants of the ground station located in the municipality of 22 district

2019				
	SO2 ppb	NO2 ppb	CO ppm	O3 ppb
بهار Spring	3.1	31.8	1.2	33.97
تابستان Summer	4.5	42.9	1.3	34
پاییز Fall	4.57	46.4	1.63	14.87
زمستان Winter	5.53	45.33	1.27	16.1
2020				
	SO2 ppb	NO2 ppb	CO ppm	O3 ppb
بهار Spring	3.3	39.2	0.8	34.63
تابستان Summer	4.3	37.97	1.23	33.1
پاییز Fall	4.47	46.5	1.37	14.73
زمستان Winter	6.47	47.27	1.47	13.37
2021				
	SO2 ppb	NO2 ppb	CO ppm	O3 ppb
بهار Spring	4.1	29.63	0.7	31.3
تابستان Summer	3.87	38	1.1	30.67
پاییز Fall	5.77	46.47	1.7	11.7
زمستان Winter	6.93	46.47	1.43	5.6

نتیجه‌گیری

قدیمی که باعث افزایش آلودگی هوا می‌شود. پس شناخت عوامل تاثیرگذار در روند افزایش آلودگی هوا یک ضرورت محسوب می‌شود و در این راستا بکار بردن روش‌ها و فناوری‌های مبتنی بر سنجش از دور به دلیل ماهیت تولید داده‌های پیوسته زمانی و مکانی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد پیرو این ضرورت در این پژوهش از داده‌های در

امروزه آلودگی هوا به یکی از مهمترین چالش کشورمان تبدیل شده است. که نقش عمده‌ای در تغییرات اقلیم کشورمان دارد و عامل‌های متنوعی نظیر رشد جمعیت که رشد ساخت و ساز را به همراه داشته و افزایش حمل و نقل و افزایش تقاضا برای مصرف انرژی‌ها و صنایع اغلب

[4] Esfandeh S, Danehkar A, Salmanmahiny A, Sadeghi SM, Marcu MV. Climate change risk of urban growth and land use/land cover conversion: An in-depth review of the recent research in Iran. *Sustainability* 2022, 14(1), 338. <https://doi.org/10.3390/su14010338>.

[5] Huang Y, Lei C, Liu CH, Perez P, Forehead H, Kong S, Zhou JL. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons. *Environmental Pollution*. 2021 Jul 1; 280:116971.

[6] Saxena P, Naik V. Air pollution: sources, impacts and controls. *Methods for the measurement of air pollutions*. 2018. CABI, Nosworthy, Wallingford, Oxfordshire, OX108DE, UK, 55-78.

[7] Popp D. International innovation and diffusion of air pollution control technologies: the effects of NOX and SO2 regulation in the US, Japan, and Germany. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2006 Jan 1;51(1):46-71.

[8] Copat et al. The role of air pollution (PM and NO2) in COVID-19 spread and lethality: a systematic review. *Environmental research*. 2020 Dec 1;191:110129.

[9] Li et al. Regional air pollution characteristics simulation of O3 and PM10 over Yangtze River Delta Region. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*. 2008 Jan 1;29(1):237-45.

[10] Magro et al. Severe COVID-19: A multifaceted viral vasculopathy syndrome. *Annals of Diagnostic Pathology*, Volume 50, 2021, 151645, ISSN 1092-9134, <https://doi.org/10.1016/j.anndiagpath.2020.151645>.

[11] Lorente, A., Boersma, K.F., Eskes, H.J., Veeffkind, J.P., Van Geffen, J.H.G.M., De Zeeuw, M.B., van der Gon, H.D., Beirle, S. and Krol, M.C., 2019. Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI.

[12] Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*. 2008 Jan 1;151(2):362-7.

[13] Somvanshi SS, Vashisht A, Chandra U, Kaushik G. Delhi air pollution modeling using remote sensing technique. *Handbook of environmental materials management*. 2019:1-27.

[14] Emeis S, Schäfer K. Remote sensing methods to investigate boundary-layer structures relevant to air pollution in cities. *Boundary-layer meteorology*. 2006 Nov;121(2):377-85.

[15] Wang Y, Yuan Q, Li T, Tan S, Zhang L. Full-coverage spatiotemporal mapping of ambient PM2.5 and PM10 over China from Sentinel-5P and assimilated datasets: Considering the precursors and chemical compositions. *Science of The Total Environment*. 1 November 2021, 148535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148535>.

[16] Shikwambana L, Sivakumar V, Xongo K. Tracking the Transport of SO₂ and Sulphate Aerosols from the Tonga Volcanic Eruption to South Africa. *Atmosphere*. 2023; 14(10):1556. <https://doi.org/10.3390/atmos14101556>.

دسترس ماهواره سنتینل-۲ برای بررسی تغییرات ساخت‌وساز در منطقه ۲۲ تهران در سالهای ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲ استفاده شده که بر اساس بررسی تغییرات بدست آمده برای ساخت‌وساز در سال ۲۰۱۸ معادل با ۳۴۸.۸۸ هکتار بوده است و در سال ۲۰۲۲ مقدار مساحت آن معادل با ۳۸۲ هکتار بوده است. در طول این چهار سال ۳۳ هکتار به ساخت‌وساز منطقه اضافه شده است. و برای پایش آلاینده‌های منوکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، دی‌اکسیدنیتروژن و آئروسول از داده‌های سنتینل-۵ استفاده شده است که با بررسی تغییرات مکانی آلاینده‌ها گویای این امر می‌باشد که با افزایش ساخت و ساز، مقدار آلاینده‌ها نیز بیشتر شده است. اما برای همه گازها از نظر زمانی تغییرات خاصی مشاهده نشده است. برای آلاینده AI تغییرات خاصی در داخل منطقه مشاهده نشده است. برای آلاینده‌های منوکسیدکربن و دی‌اکسیدگوگرد روند رو به رشدی مشاهده گردید و برای آلاینده دی‌اکسیدنیتروژن در این بازه زمانی، رشدی مشاهده نشد.

بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش میزان ساخت‌وساز در داخل منطقه تمامی آلاینده‌های عنوان شده افزایش پیدا نکرده و آلاینده‌های منوکسیدکربن و دی‌اکسیدگوگرد افزایش پیدا کرده است. همچنین بررسی تغییرات فصلی آلاینده‌های ذکر شده، گویای این امر می‌باشد که در فصل زمستان غلظت این آلاینده‌ها بیشتر از سایر فصول بوده است.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش مقاله بطور مساوی است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان فضایی اروپا برای دسترسی رایگان به تصاویر سنتینل ۲ و سنتینل ۵ قدردانی می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Javaheri H, Bayat M. Air pollution, its effects, consequences and new control method. The first national conference on environmental pollution and its control methods: 2013: Sanandaj, Iran. [In Persian]

[2] Hosseini A, Zare M. Recognizing and controlling the global effects of air pollution on humans and the environment. The first national conference of applied researches in the preservation of the environment, water and natural resources: 2014: Arak. Iran. [In Persian]

[3] Alagmandan M, Barazande F, Ardakani A. The role of tall buildings on air flow and pollution in the city (the effect of building height on increasing the speed of air flow and consequently reducing air pollution). The third conference on tall buildings: 2015: Qarchak. Iran. [In Persian]

Environmental Engineering, Warsaw, Poland; 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W2-43-2019>.

[28] Krupiński M, Lewiński S, Malinowski R. One class SVM for building detection on Sentinel-2 images. Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 1117635 (6 November 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2535547>

[29] Asgari O, Attarchi S, Nissani Samani N. Evaluation of the effectiveness of voluntary geographic information in the classification of Sentinel-2 images with the aim of identifying changes in urban areas (case study: Qazvin city). Geographical researches of urban planning, winter 8, 2019, number 4. <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2021.314285.1411>

[30] Ezzatabadipour H, Najafi Targhee M. Extraction of built-up urban areas using Sentinel-2 satellite images (case study: Sirjan city). Faculty of Civil Engineering, Sirjan University of Technology; 2019.

[31] Ghasempour F, Sekertekin A, Kutoglu S.H. Google Earth Engine based spatio-temporal analysis of air pollutants before and during the first wave COVID-19 outbreak over Turkey via remote sensing. Journal of Cleaner Production, Volume 319, 2021, 128599, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128599>.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



امیرشاهرخ امینی استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد تهران واحد جنوب می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی‌ارشد و دکتری خود را در مهندسی نقشه‌برداری-فتوگرامتری به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۳ از دانشگاه

صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی دریافت کردند. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از فتوگرامتری، سنجش از دور و کاربردهای سنجش از دور در مدیریت بلایای طبیعی است.

Amini, A. Assistant Professor at Department of surveying Engineering, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran

✉ sh_aminini@azad.ac.ir



زهرا آذرگشایش دارای تحصیلات کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نقشه‌برداری- سنس از دور از دانشگاه امیرکبیر و دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۴۰۱ می‌باشند. زمینه‌های تخصصی ایشان سنجش از دور و کاربردهای سنجش از دور در مدیریت بلایای طبیعی است.

[17] Vîrghileanu et al. Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak, Faculty of Geography, University of Bucharest, 010041 Bucharest, Romania;2020.

[18] Safarianzengir V, Sobhani B, Yazdani M.H, Kianian M.K. Monitoring, analysis and spatial and temporal zoning of air pollution (carbon monoxide) using Sentinel-5 satellite data for health management in Iran, located in the Middle East. Air Quality, Atmosphere & Health. 2020; 13, 709-719.

[19] Quesada et al. Benefit of ozone observations from Sentinel-5P and future Sentinel-4 missions on tropospheric composition, Atmos. Meas. Tech., 13, 131–152, <https://doi.org/10.5194/amt-13-131-2020>, 2020.

[20] Broomandi P, Karaca F, Nikfal A, Jahanbakhshi A, Tamjidi M, Kim J.R. (). Impact of COVID-19 Event on the Air Quality in Iran. Aerosol Air Qual. 2020; Res. 20: 1793–1804. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0205>.

[21] Qanadi M.A, Shahri M, Moradi A. Air pollution monitoring using Sentinel-5 satellite images (case study: large industrial cities of Iran). Environmental Science Quarterly. 1401; 20(2): 81-98. doi: 10.52547/envs.2022.1026

[22] Shayeste K, Gharibi S. The use of Sentinel-5 satellite images in identifying air pollutant centers in Iran, land evaluation and preparation. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Malayer University; 2018.

[23] Rangzen K. Kabolizade M, Mohamadi S. Temporal-spatial survey of nitrogen dioxide pollution in Khuzestan province using TROPOMI sensor. Department of remote sensing and GIS, faculty of earth sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz , Iran; 2019.

[24] Shami S, Khoshlahjeh M, Ghorbani Z, Moghimi A, Mohammadzadeh A, Sabetghadam S. Investigating the amount of changes in air pollutants during the spread of the Covid-19 virus in Iran using Sentinel 5 satellite data. Scientific Research Journal of Mapping Sciences and Techniques. 2019;10(3):146-135.

[25] Pour Majid A, Sakhawat Jo M.S, Hosseini Hashemi A. Investigating the effects of urban development on air quality using GIS (case study: District 22 of Tehran Municipality). Faculty of Environment, Islamic Azad University, Science and Research Unit; 2016.

[26] Lefebvre A, Sannier C, Corpetti T. Monitoring Urban Areas with Sentinel-2A Data: Application to the Update of the Copernicus High Resolution Layer Imperviousness Degree. Remote Sensing. 2016; 8(7):606. <https://doi.org/10.3390/rs8070606>.

[27] Chormański J, Kuc G. SENTINEL-2 IMAGERY FOR MAPPING AND MONITORING IMPERVIOUSNESS IN URBAN AREAS. Warsaw University of Life Sciences, Faculty of Civil and



ایشان سنجش از دور و کاربردهای سنجش از دور در مدیریت بلایای طبیعی است.

Nouri, P. Graduated from Department of Surveying Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

✉ paniznouri97@yahoo.com

Azargoshayesh, Z. Graduated from Department of Surveying Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

✉ z.azar8699@gmail.com

پانیز نوری دارای تحصیلات کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نقشهبرداری- سنجش از دور از دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ می‌باشند. زمینه‌های تخصصی

Citation (Vancouver): Amini A, Azargoshayesh Z, Nouri P. [Evaluation of the impact of construction in urban areas on air pollution in the troposphere using remote sensing data]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 321-334

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11101.1080>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Detection of Secondary Roads in Soil and Vegetation areas Based on Deep Learning Model

A. Gholamian, F. Tabib Mahmoudi*

Department of Surveying and Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 25 August 2024
Reviewed: 10 October 2024
Revised: 10 November 2024
Accepted: 30 November 2024

KEYWORDS:

Road detection
Deep Learning
Semantic Segmentation
Remote Sensing

* Corresponding author

fmahmoudi@sru.ac.ir

① (+9821) 22970021

Background and Objectives: Roads are known as vital and essential elements in the development of cities, because they play a very important role in communication and transportation and represent the extent of urban development and growth. In order to increase accuracy and efficiency in road detection and classification, researchers have designed and used automatic methods based on deep learning algorithms. These approaches, due to their superior capabilities in recognizing patterns and complex features of images, have effectively replaced traditional methods and have significantly improved the accuracy and speed of road detection.

Methods: In this paper, an improved UNet3+ encoder-decoder model has been used for road detection from remote sensing images. In this proposed model, pyramid pooling and spatial and channel attention modules are used to improve road detection results. The spatial attention module is used in the proposed network architecture to improve the network's focus on important locations in feature maps. The channel attention module also allows the network to more focus on important information and perform better at tasks such as feature detection and classification. The pyramid pooling module is designed to receive multi-scale information. This module helps the network to understand different spatial scales by applying averaging at different levels and then resizing the averaged features to the size of the original feature map.

Findings: The evaluation of the capabilities of the proposed network in detecting secondary roads in areas with less residential density and with soil and vegetation cover shows the superiority of this network over the original version of UNet3+. The improved network proposed in this paper was able to detect roads more accurately. This shows the power of the network in detecting roads in conditions where there is less environmental interference. Quantitative results obtained from this network show the fact that the use of spatial and channel attention modules and pyramid pooling module has been able to increase the accuracy, recall, F1 score and IOU measures by 6, 15.6, 8.3 and 17.4, respectively, compared to the original version of the UNet3+ network.

Conclusion: The challenges raised in the automatic roads detection from remote sensing images, including the effect of shadows and obstruction of the road with buildings and vegetation cover, and the similarity of the secondary roads with the soil background can lead to a decrease in the accuracy of recognizing roads from remote sensing images. The use of improved UNet3+ encoder-decoder architecture capabilities in this research was able to reduce some of these challenges and increase the accuracy of the detection results of secondary roads in areas with soil and vegetation.



NUMBER OF REFERENCES
24



NUMBER OF FIGURES
5



NUMBER OF TABLES
1

مقاله پژوهشی

تشخیص جاده‌های فرعی در زمین‌های خاکی و مناطق پوشش گیاهی مبتنی بر روش یادگیری عمیق

امیرحسین غلامیان، فاطمه طبیب محمودی*

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: جاده‌ها به عنوان عناصر حیاتی و اساسی در توسعه و پیشرفت شهرها شناخته می‌شوند، زیرا نقش بسیار مهمی در ارتباطات و حمل و نقل دارند و نمایانگر میزان توسعه و رشد شهری می‌باشند. به منظور افزایش دقت و کارایی در تشخیص و طبقه‌بندی جاده‌ها، محققان به طراحی و استفاده از روش‌های خودکار مبتنی بر پردازش تصویر و یادگیری عمیق پرداخته‌اند. این رویکردها، به دلیل قابلیت‌های برترشان در تشخیص الگوها و ویژگی‌های پیچیده تصاویر، به طور موثری جایگزین روش‌های سنتی شده‌اند و بهبود چشمگیری در دقت و سرعت تشخیص جاده‌ها ایجاد کرده‌اند.

روش‌ها: در این تحقیق از یک مدل بهبودیافته رمزگذار-رمزگشای UNet3+ برای تشخیص جاده از تصاویر سنجنش از دور استفاده شده است. در این مدل پیشنهادی از ماژول‌های تجمیع هرمی، توجه مکانی و توجه کانال برای بهبود نتایج تشخیصی استفاده شده است. ماژول توجه مکانی در معماری شبکه پیشنهادی برای بهبود تمرکز شبکه بر روی مکان‌های مهم در نقشه‌های ویژگی استفاده می‌شود. ماژول توجه کانال نیز به شبکه اجازه می‌دهد تا روی اطلاعات مهم تمرکز بیشتری داشته باشد و در کارهایی مانند تشخیص ویژگی و طبقه‌بندی بهتر عمل کند. ماژول تجمیع هرمی برای دریافت اطلاعات چند مقیاسی طراحی شده است. این ماژول به شبکه کمک می‌کند تا مقیاس‌های مکانی مختلف را با اعمال میانگین‌گیری در سطوح مختلف و سپس تغییر اندازه ویژگی‌های متوسط به اندازه نقشه ویژگی اصلی، درک کند.

یافته‌ها: ارزیابی قابلیت اجرایی شبکه پیشنهادی در تشخیص جاده‌های فرعی در مناطقی که تراکم مسکونی کمتری دارند و دارای پوشش خاکی و گیاهی هستند، نشان دهنده برتری این شبکه نسبت به نسخه اصلی UNet3+ است. شبکه بهبود یافته پیشنهادی در این مقاله توانست جاده‌ها را با دقت بیشتری تشخیص دهد. این امر نشان دهنده قدرت شبکه در تشخیص جاده‌ها در شرایطی است که تداخلات محیطی کمتری وجود دارد. نتایج کمی به‌دست‌آمده از این شبکه نمایانگر این واقعیت است که استفاده از ماژول‌های توجه مکانی و کانال و ماژول تجمیع هرمی توانسته است معیارهای دقت، بازخوانی، امتیاز F1 و IOU را به ترتیب ۶، ۱۵، ۶، ۸، ۳ و ۱۷، ۴ نسبت به نسخه اصلی شبکه UNet3+ افزایش دهد.

نتیجه‌گیری: چالش‌های مطرح در تشخیص خودکار جاده‌ها از تصاویر سنجنش از دور اعم از تاثیر سایه و انسداد جاده با ساختمان‌ها و پوشش گیاهی و شباهت جاده با پس‌زمینه می‌تواند منجر به کاهش دقت تشخیص جاده‌ها از تصاویر سنجنش از دور گردد. استفاده از قابلیت‌های معماری رمزگذار-رمزگشای بهبودیافته UNet3+ در این تحقیق توانست بخشی از این چالش‌ها را کاهش داده و دقت نتایج تشخیص جاده‌های فرعی در مناطق دارای زمینه خاکی و پوشش گیاهی را افزایش دهد.

تاریخ دریافت: ۰۴ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۱۹ مهر ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۲۰ آبان ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۰ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

تشخیص جاده
یادگیری عمیق
قطعه بندی معنایی
سنجنش از دور

* نویسنده مسئول

fmahmoudi@sru.ac.ir

۰۲۱-۲۲۹۷۰۰۲۱

مقدمه

بدلیل زمان بر بودن و هزینه بالای انجام عملیات میدانی، برای به روز کردن اطلاعات و نقشه شبکه‌های جاده‌ها از داده‌های سنجنش از دور استفاده می‌شود که هم از نظر زمانی و هم هزینه‌ای بصره تر است. جاده‌ها از مهم‌ترین عناصر شهری هستند و شناسایی آنها از داده‌های سنجنش از دور با استفاده از روش‌های سنتی مبتنی بر تعیین دستی ویژگی‌ها و یا استخراج خودکار ویژگی امکان‌پذیر است. از روش‌های سنتی استخراج جاده‌ها می‌توان به تحلیل بافت، تشخیص لبه‌ها و رویکردهای مبتنی بر شکل اشاره کرد. این روش‌ها می‌توانند به طور جداگانه یا ترکیبی استفاده شوند تا اطلاعات دقیق‌تری از جاده‌ها در تصاویر ماهواره‌ای استخراج شود [۹ و ۱۰].

امروزه جاده‌ها نه تنها به عنوان شبکه‌های اصلی ارتباطی در شهرها عمل می‌کنند، بلکه نقش حیاتی در ساختار کلی شهری و عملکرد آن دارند. این فضاها سطح وسیعی از شهر را به خود اختصاص داده و به عنوان عناصر اصلی در شکل‌دهی به شهر و نظم‌دهی به جریان ترافیک و حرکت مردم ایفای نقش می‌کنند [۱ و ۲]. به روز رسانی نقشه‌های جاده‌ای موجود به جهت رشد و توسعه شهری، برنامه ریزی برای کنترل ترافیک، تصمیم‌گیری در شرایط بحران و... الزامی است [۳-۷]. در کاربردهایی اعم از امدادرسانی در زمان‌های بحرانی و وقوع حوادث طبیعی، موجود بودن جزییات و اطلاعات به هنگام از جاده‌ها امکان ارزیابی و مسیریابی را فراهم می‌نماید [۸].

بسیاری از محققین قرار گرفته است [۲۰]. در زمینه تحقیقاتی تشخیص جاده، Lu و همکاران از یک مدل پیشنهادی برای استخراج جاده‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک خیلی زیاد استفاده نمودند. این مدل با استفاده از شبکه Global-Aware deep Network (GAN) و اضافه نمودن ماژول‌های توجه مکانی و کانال توانست در تصاویری که انسداد جاده‌ها توسط سایه درختان، ساختمان‌ها و عوارض دیگر اتفاق افتاده بود عملکرد خوبی را داشته باشد. این مدل پیشنهادی با استفاده از مجموعه داده DeepGlobe ارزیابی شد [۲۱]. Fan و همکاران از DlinkNet تغییر یافته برای استخراج جاده از مجموعه داده ماساچوست استفاده کردند [۲۲]. Yerram و همکاران از شبکه Unet++ استفاده کردند که در آن از بلوک‌های ResNeXt به عنوان رمزگذار و رمزگشا استفاده می‌شود. آنها برای ارزیابی شبکه پیشنهادی از مجموعه داده ماساچوست در استخراج جاده‌ها استفاده کردند [۲۳].

استفاده از یادگیری عمیق برای استخراج جاده در سنجش از دور مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی دارد. این موارد شامل دقت بالاتر به دلیل توانایی یادگیری الگوهای پیچیده از داده‌ها، استحکام در مقابل تغییرات ظاهری جاده بدون تنظیم دستی پارامترها، و یادگیری خودکار ویژگی است که نیاز به مهندسی ویژگی‌های دستی را از بین می‌برد. یادگیری عمیق امکان یادگیری سراسری را فراهم می‌کند، فرآیند استخراج را ساده می‌کند و امکان مقیاس‌پذیری را برای مدیریت کارآمد مجموعه داده‌های بزرگ فراهم می‌نماید. علاوه بر این، یادگیری عمیق اطلاعات معنایی در مورد سازه‌های جاده را ضبط می‌کند و قابلیت استفاده از داده‌های استخراج شده را برای کاربردهای مختلف افزایش می‌دهد. به طور کلی، یادگیری عمیق یک رویکرد قدرتمند و امیدوارکننده برای استخراج جاده از تصاویر سنجش از دور است [۲۴]. روش پیشنهادی در این تحقیق مبتنی بر استفاده از شبکه یادگیری عمیق رمزگذار-رمزگشای Unet3+ بهبود یافته است که در آن از قابلیت ماژول‌های تجمیع هرمی، توجه مکانی و توجه کانال استفاده شده است. مهمترین نوآوری‌های این تحقیق در زمینه بهبود نتایج تشخیص جاده‌های فرعی عبارتند از:

- ارزیابی قابلیت ماژول‌های توجه مکانی و کانال به ترتیب برای شناسایی مناطق مهم و کاهش مناطق نامربوط در نقشه‌های ویژگی و تأکید بر کانال‌های آموزنده و در عین حال سرکوب کانال‌های کمتر مرتبط، به منظور تمرکز بر وابستگی‌های بین کانالی می‌باشد.
- ارزیابی قابلیت ماژول تجمیع هرمی در قطعه‌بندی معنایی و استخراج جاده‌ها در مقیاس‌های مختلف از تصویر. این ماژول با ترکیب ویژگی‌ها از چندین مقیاس مختلف، به شبکه امکان می‌دهد تا به اطلاعات زمینه محلی و جهانی به طور همزمان توجه کند.

روش تحقیق

داده مورد استفاده

در این تحقیق برای ارزیابی نتایج شبکه پیشنهادی از مجموعه داده‌های جاده Deepglobe استفاده شده است. مجموعه داده تشخیص جاده

Courtrai و همکاران روشی را پیشنهاد داده‌اند که در آن از دو فیلتر مورفولوژیکی استفاده می‌شود: opening برای حذف نویزهای کوچک و closing برای پر کردن شکاف‌های کوچک در مرزهای شیء و حذف حفره‌های کوچک داخل شیء [۱۱]. در تحقیق دیگری ادغام فیلترهای جهت دار برای تشخیص لبه‌های جاده و فیلترهای طولی مورفولوژیک برای اطمینان از این که تنها جاده‌های واقعی و بلند در تصویر باقی بمانند و سایر اشیاء کوچک و نویزها حذف شوند مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

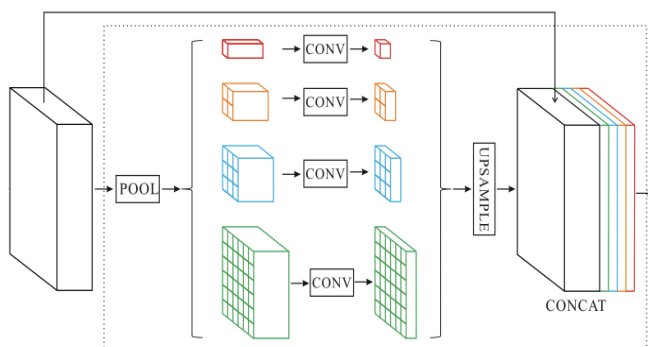
روش پیشنهادی Grinias و همکاران برای استخراج جاده از تصاویر سنجش از دور با وضوح بالا، یک روش بدون نظارت است که از ویژگی‌های شکل استفاده کرده و این ویژگی‌ها با مدل میدان تصادفی مارکوف و روش جنگل تصادفی ترکیب می‌شوند تا احتمالات جاده را خوشه‌بندی کنند [۱۳]. Liu و همکاران از تبدیل هاف تعمیم یافته برای شناسایی و استخراج الگوهای منحنی استفاده کردند [۱۴]. از روش‌های سنتی دیگر در تشخیص جاده‌ها، می‌توان به فضای مقیاس و مدل‌های Snakes اشاره کرد که فضای مقیاس تصاویر را به مقیاس‌های مختلف تجزیه می‌کند تا ویژگی‌های مهم مانند لبه‌ها و خطوط را برجسته کند. [۱۵]

روش‌های سنتی برای تشخیص جاده در تصاویر سنجش از دور از معایب متعددی رنج می‌برند. اولاً، این روش‌ها تنها تا حد محدودی می‌توانند با تغییرات محیطی سازگار شوند. این تغییرات می‌تواند شامل تغییرات در نوری، شرایط آب و هوایی یا انواع مواد تشکیل دهنده سطح جاده باشد. این عدم توانایی در سازگاری با تغییرات، در نهایت می‌تواند منجر به کاهش دقت در تشخیص و تجزیه و تحلیل جاده‌ها شود. ثانیاً، این روش‌ها در تشخیص دقیق جاده‌ها در محیط‌های پیچیده با پوشش گیاهی متراکم، انسداد و به هم ریختگی شهری با مشکلاتی مواجه هستند که می‌تواند نویز و ابهام را در فرآیند تشخیص ایجاد نماید. علاوه بر این، بسیاری از روش‌های سنتی نیاز به تنظیم دستی پارامتر دارند که زمان‌بر و ذهنی است و مانع از توانایی دستیابی به نتایج ثابت در سناریوهای مختلف می‌شود. در نهایت، این روش‌ها اغلب بر ویژگی‌ها یا قوانین دست‌ساز تکیه می‌کنند که ممکن است به خوبی به مجموعه داده‌های متنوع تعمیم داده نشوند و سازگاری با محیط‌های جدید یا انواع جاده‌ای که در داده‌های آموزشی نشان داده نشده‌اند، چالش برانگیز است [۱۶]. با ایجاد فرآیند خودکار برای استخراج جاده‌ها، می‌توان علاوه بر کاهش هزینه و اشتباهات نیروی انسانی، دقت و پیوستگی نتایج را نیز افزایش داد.

یکی از روش‌های موثر و جدیدی که اخیراً در استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای به صورت خودکار استفاده می‌شود، بهره‌گیری از روش‌های یادگیری عمیق است [۱۷ و ۱۸]. استفاده از روش‌های یادگیری عمیق با استفاده از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی زیاد و خیلی زیاد در تشخیص جاده‌ها دارای پتانسیل بالایی می‌باشد [۱۹] و به همین علت در سال‌های اخیر در جامعه سنجش از دور، این موضوع مورد توجه

در عملکرد رمزگذار شبکه، ابتدا داده‌های ورودی به اولین بلوک کانولوشنی وارد می‌شوند که شامل دو لایه کانولوشن و توجه مکانی است. پس از پردازش در اولین بلوک، داده‌ها به بلوک دوم منتقل می‌شوند که علاوه بر لایه‌های کانولوشنی و توجه مکانی، شامل لایه تجمیع هرمی نیز می‌باشد. ماژول تجمیع هرمی ویژگی‌های چندمقیاسی را استخراج می‌کند (شکل ۲).

این فرایند برای بلوک‌های سوم، چهارم و پنجم نیز تکرار می‌شود، با این تفاوت که تعداد فیلترها در هر بلوک افزایش می‌یابد تا ویژگی‌های پیچیده‌تری استخراج شوند.



شکل ۲: ساختار ماژول تجمیع هرمی
Fig. 2: Structure of the pyramid pooling module

بخش رمزگشا در شبکه پیشنهادی UNet3+ بهبودیافته، به منظور بازسازی تصویر نهایی پس از استخراج ویژگی‌ها در بخش رمزگذار طراحی شده است. این بخش شامل چهار بلوک متوالی است که هر کدام به تدریج ابعاد تصویر را افزایش می‌دهند و ویژگی‌های مکانی را بهبود می‌بخشند.

در ابتدا، داده‌های پردازش شده از بخش رمزگذار به اولین بلوک رمزگشا وارد می‌شوند. این بلوک شامل لایه‌های افزایش ابعاد است که ابعاد ویژگی‌ها را به تدریج به اندازه‌های بزرگتر بازمی‌گرداند. سپس، ویژگی‌های استخراج شده از بخش رمزگذار با داده‌های پردازش شده در این بلوک ترکیب می‌شوند تا اطلاعات مکانی دقیق‌تر و جزئی‌تر حفظ شود.

در بلوک دوم، ابعاد ویژگی‌ها بیشتر افزایش می‌یابد و عملیات افزایش ابعاد به ابعاد بزرگتر ادامه می‌یابد. در این مرحله، ویژگی‌های استخراج شده از سطح دوم رمزگذار با ویژگی‌های بازسازی شده ترکیب می‌شوند تا اطلاعات مهم مکانی در این سطح حفظ شود. این فرایند برای بلوک‌های سوم و چهارم نیز تکرار می‌شود. در هر بلوک، لایه‌های کانولوشنی و توجه مکانی برای پردازش و تقویت ویژگی‌ها به کار می‌روند. عملیات افزایش ابعاد و ادغام ویژگی‌ها به تدریج ابعاد تصویر را به اندازه اصلی خود بازمی‌گرداند و جزئیات مکانی دقیق را بازسازی می‌کند.

در پایان، پس از پردازش داده‌ها در چهار بلوک متوالی، خروجی نهایی شامل یک بلوک توجه کانال است که ویژگی‌های مهم در

DeepGlobe یکی از منابع کلیدی در حوزه تشخیص و استخراج جاده‌ها از تصاویر ماهواره‌ای است که در سال ۲۰۱۸ ارائه شد. این مجموعه داده شامل تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا از ماهواره WorldView-3 است. تصاویر این مجموعه داده با وضوح ۵۰ سانتی‌متر در هر پیکسل ارائه می‌شوند که به تحلیل دقیق و شناسایی جزئیات جاده‌ها کمک می‌کند. این مجموعه داده شامل بیش از ۸,۰۰۰ کیلومتر جاده برچسب‌گذاری شده است و تصاویر از مناطق مختلف جغرافیایی و فرهنگی، از جمله مناطق شهری، نیمه‌شهری، روستایی و کشاورزی در کشورهای مختلف جهان نظیر ایالات متحده (شیکاگو و لس آنجلس)، آلمان (برلین و مونیخ) و ژاپن (توکیو و اوزاکا) جمع‌آوری شده است.

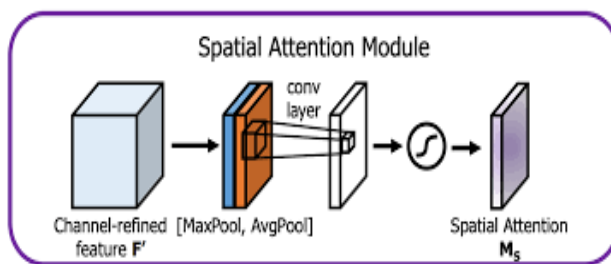
تصاویر این مجموعه داده به صورت قطعه‌های 1024×1024 پیکسل تقسیم شده‌اند که فرایند آموزش مدل‌های یادگیری عمیق را ساده‌تر و موثرتر می‌کند. این تقسیم‌بندی کمک می‌کند تا مدل‌ها به صورت متمرکزتر بر روی بخش‌های مختلف تصاویر تمرکز کنند و دقت تشخیص را افزایش دهند.

فرایند ایجاد ماسک‌های جاده‌ای در این مجموعه داده با استفاده از برچسب‌گذاری دستی دقیق و با کمک نرم‌افزارهای GIS و پردازش تصویر انجام شده است. این فرایند شامل شناسایی و ترسیم دقیق خطوط جاده‌ها بر روی تصاویر ماهواره‌ای است که به دستیابی به دقت بالا در تشخیص و استخراج جاده‌ها کمک می‌کند. کارشناسان با تجربه با استفاده از این ابزارها، داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی با کیفیت بالا را برای مدل‌های یادگیری عمیق فراهم کرده‌اند. در این تحقیق، از مجموعه داده‌های جاده فرعی در مناطق خاکی و دارای پوشش گیاهی استفاده شده است.

روش شناسی

روش پیشنهادی تشخیص جاده در این تحقیق مبتنی بر شبکه رمزگذار-رمزگشای بهبودیافته UNet3+ مشتمل بر ماژول‌های تجمیع هرمی، توجه مکانی و توجه کانال می‌باشد.

رمزگذار شبکه UNet3+ پیشنهادی شامل پنج بلوک متوالی است که هر کدام وظیفه استخراج ویژگی‌های تصویر ورودی را بر عهده دارند. هر بلوک شامل چندین لایه کانولوشنی 3×3 ، نرمال‌سازی دسته‌ای، و فعال‌سازی ReLU است. علاوه بر این، در هر بلوک از ماژول توجه مکانی برای تقویت ویژگی‌های مهم مکانی استفاده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: ساختار ماژول توجه مکانی
Fig. 1: Structure of the spatial attention module

انجام گرفته است. مقادیر پیکسل‌ها قبل از آموزش از محدوده [۰، ۲۵۵] به محدوده [۰، ۱] نرمال شده‌اند. مجموعه داده که از ۶۲۲۶ تصویر تشکیل شده است را بطور تصادفی به سه قسمت آموزش، اعتبار سنجی و تست تقسیم کردیم. مقدار ۸۵٪ برای آموزش، ۱۰٪ برای اعتبار سنجی و ۵٪ برای تست شبکه در نظر گرفته شد.

بهینه‌سازی مدل با استفاده از بهینه‌ساز Adam با نرخ یادگیری اولیه ۰.۰۰۰۱ صورت گرفته است. بهینه‌ساز الگوریتمی است که از طریق به‌روزرسانی وزن‌های مدل باعث کاهش مقدار خروجی تابع ضرر می‌شود. برای بهبود عملکرد مدل و جلوگیری از بیش‌برازش، از EarlyStopping و ReduceLROnPlateau استفاده شده است.

ReduceLROnPlateau به‌طور خودکار نرخ یادگیری را زمانی که معیار عملکرد در مجموعه اعتبارسنجی (مانند خطا یا ضرر) برای چند دوره بهبود نمی‌یابد، کاهش می‌دهد. این فرآیند می‌تواند به شبکه کمک کند تا از ایستایی محلی در فضای جستجو خارج شود و دقت و همگرایی مدل را افزایش دهد.

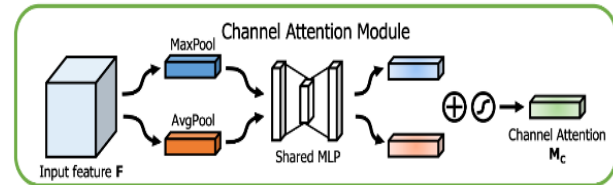
همچنین، از EarlyStopping برای متوقف کردن آموزش در صورت عدم بهبود اعتبارسنجی پس از ۱۰ دوره استفاده شده است. EarlyStopping یک روش برای جلوگیری از بیش‌برازش مدل به داده‌های آموزشی است و به‌طور خودکار انتخاب بهینه‌ترین مدل را براساس عملکرد آن روی داده‌های اعتبارسنجی تضمین می‌کند. در نهایت، مدل در ۶۰ اپک آموزش داده می‌شود.

نتایج اجرای شبکه

در این بخش به منظور ارزیابی قابلیت مدل پیشنهادی بهبودیافته در تشخیص جاده‌های فرعی در مناطق دارای زمینه خاکی و پوشش گیاهی، نتایج حاصل از اجرای این مدل با نسخه اصلی UNet3+ مقایسه شده است. در این مناطق، به دلیل شباهت زیاد جاده‌های فرعی با پس‌زمینه طبیعی خاک، تشخیص درست جاده‌ها چالش‌برانگیز است. جاده‌های فرعی معمولاً خاکی بوده و رنگ و بافت مشابهی با محیط اطراف دارند و نسخه اصلی شبکه UNet3+ ممکن است در شناسایی صحیح آن‌ها دچار خطا شود و عملکرد ضعیفی داشته باشد (شکل ۴). تداخل پوشش گیاهی با جاده‌ها باعث می‌شود که شبکه نتواند به‌درستی الگوهای جاده‌ای را شناسایی کند و منجر به بروز خطا در تشخیص محل تقاطع‌ها و دیگر ویژگی‌های جاده‌ای شود. همچنین سایه‌های ناشی از پوشش گیاهی یا سازه‌های بزرگ، می‌توانند جاده‌ها را از دید شبکه پنهان کنند و منجر به افزایش خطا در تشخیص شوند. در تقاطع‌ها وجود پوشش گیاهی متراکم می‌تواند باعث پنهان شدن جاده‌ها و تقاطع‌های آن‌ها شود. سایه‌های ایجاد شده توسط درختان و گیاهان دیگر نیز منجر به ایجاد نویز و اختلال در فرآیند تشخیص می‌شود.

افزودن ماژول‌های تجمیع هرمی، توجه مکانی و توجه کانال به معماری UNet3+ در مدل پیشنهادی این مقاله توانسته دقت تشخیص جاده‌ها را بهبود بخشد. این ماژول‌ها به شبکه کمک می‌کنند تا با تمرکز بر

سطح کانال را تقویت می‌کند. این بلوک با استفاده از لایه‌های GlobalAveragePooling2D و کانولوشن دوبعدی، ویژگی‌های مهم را برجسته کرده و به شبکه کمک می‌کند تا نقشه نهایی قطعه‌بندی را با دقت بیشتری تولید کند (شکل ۳).



شکل ۳: ساختار ماژول توجه کانال
Fig. 3: Structure of the channel attention module

نتایج تحقیق

معیارهای ارزیابی

ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق به کمک معیارهای مختلفی انجام می‌شود تا بتوان دقت، کارایی، و قابلیت تعمیم مدل‌ها را در وظایف مختلف بررسی کرد. در این تحقیق از معیارهای بازخوانی، امتیاز F1، دقت و IOU استفاده شده است.

○ معیار بازخوانی نسبت پیکسل‌هایی که به درستی به عنوان جاده شناسایی شده‌اند را به تعداد کل پیکسل‌های واقعی جاده در تصویر بدست می‌آورد. این معیار نشان می‌دهد که مدل تا چه حد توانسته است همه پیکسل‌های مربوط به جاده را شناسایی کند.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{FN + TP} \quad (1)$$

○ معیار دقت نشان‌دهنده نسبت پیکسل‌هایی است که به‌درستی به عنوان جاده شناسایی شده‌اند به تمام پیکسل‌هایی که مدل به عنوان جاده دسته‌بندی کرده است.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{FP + TP} \quad (2)$$

○ معیار امتیاز F1 میانگین هارمونیک بین دقت و بازخوانی است. این معیار با برقراری توازن بین دقت و بازخوانی، زمانی که یک معیار زیاد و دیگری کم باشد، کاهش می‌یابد.

$$F1 - \text{Score} = \frac{\text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} * 2 \quad (3)$$

○ معیار IOU، یک معیار ارزیابی متداول برای اندازه‌گیری دقت یک مدل تشخیص شیء در بینایی کامپیوتری است. در حوزه قطعه‌بندی معنایی، IOU میزان همپوشانی بین ناحیه‌های قطعه‌بندی شده پیش‌بینی شده و واقعیت‌زمینی را اندازه‌گیری می‌کند.

$$IOU = \frac{TP}{FP + TP + FN} \quad (4)$$

جزئیات اجرای

در این مقاله، برای اجرای مدل‌ها از TensorFlow و Keras استفاده شده است. اجرای مدل‌ها در Google Colaboratory با استفاده از A4 GPU

جاده‌ها به دلیل عرض کم و پیچ‌وخم‌های زیاد، ممکن است به راحتی با سایر عناصر شهری اشتباه گرفته شوند.

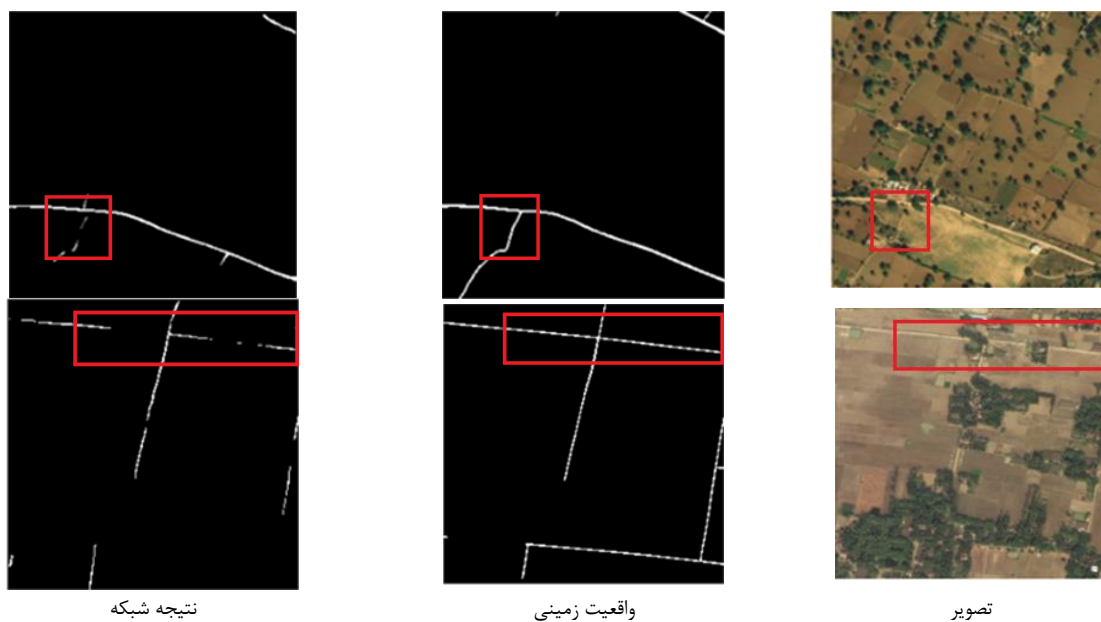
ویژگی‌های مختلف تصویر، دقت و وضوح بهتری در تشخیص جاده‌ها داشته باشد.

در مناطق دارای پوشش گیاهی و زمینه خاکی، استفاده از ماژول‌های توجه مکانی و کانال و ماژول تجمیع هرمی می‌تواند به بهبود تشخیص جاده‌ها کمک کند. با این حال، همانطور که در شکل ۵ مشخص است، همچنان در برخی موارد شبکه نتوانسته خطوط جاده‌ای را به طور پیوسته تشخیص دهد و این منجر به منقطع شدن خطوط شناسایی شده گردیده است. جاده‌های باریک و پیچیده، که اغلب در مناطق غیرمترکم شهری یافت می‌شوند، می‌توانند باعث افزایش خطاهای تشخیصی شوند. این

جدول ۱: ارزیابی کمی نتایج مدل پیشنهادی

Table 1: Quantitative evaluation of the proposed model

network	Precision	Recall	F1 – score	IOU
UNet3+	78.7	69.4	76.3	56.1
UNet3+ with PPM, SAM, CAM	80.4	71.5	76.8	61.2



شکل ۴: نتایج تشخیص جاده‌های فرعی در نسخه اصلی شبکه UNet3+
Fig. 4: Secondary roads detection results in UNet3+ main model



شکل ۵: نتایج تشخیص جاده‌های فرعی در شبکه بهبودیافته پیشنهادی UNet3+
Fig. 5: Secondary roads detection results in proposed modified UNet3+ model

پیچیده را به طور خودکار استخراج کنند و دقت بالاتری در تشخیص جاده‌ها فراهم آورند. به دلیل شباهت زیاد جاده‌های فرعی با پس‌زمینه طبیعی خاک، تشخیص درست این جاده‌ها چالش‌برانگیز است. همچنین، تداخل پوشش گیاهی و سایه‌های آن با جاده‌ها باعث می‌شود که شبکه نتواند به‌درستی الگوهای جاده‌ای را شناسایی کند و منجر به بروز خطا در تشخیص محل تقاطع‌ها و دیگر ویژگی‌های جاده‌ای شود.

در این تحقیق، برای حل مشکلات و چالش‌های ذکر شده، از معماری UNet3+ بهبودیافته استفاده شده است. این معماری با بهره‌گیری از ماژول‌های توجه مکانی و کانال و تجمیع هرمی طراحی شده تا بتواند تأثیرات چالش‌های فوق‌الذکر را کاهش دهد. یکی از ویژگی‌های برجسته این تحقیق، بهبود معماری UNet3+ از طریق افزودن ماژول‌های توجه مکانی و توجه کانال است. ماژول توجه مکانی به شبکه امکان می‌دهد تا با تمرکز بر نواحی مکانی خاص، به‌طور دقیق‌تری عوارض جاده‌ای را تشخیص دهد. این ماژول با تحلیل مکانی تصاویر و شناسایی بخش‌های مهم و مرتبط، به بهبود دقت و کارایی مدل کمک می‌کند. همچنین، ماژول توجه کانال امکان تمرکز بیشتر بر کانال‌های اطلاعاتی مهم را فراهم می‌سازد. این ماژول با تخصیص وزن‌های مختلف به کانال‌های اطلاعاتی، اطلاعات حیاتی را برای تشخیص بهتر و دقیق‌تر استخراج می‌کند.

افزودن ماژول تجمیع هرمی به معماری شبکه نیز یکی از نوآوری‌های دیگر این تحقیق است. این ماژول با ترکیب اطلاعات در سطوح مختلف و پردازش هم‌زمان اطلاعات سطح بالا و سطح پایین، به بهبود قابلیت‌های تشخیصی شبکه کمک می‌کند. با استفاده از این ماژول، شبکه UNet3+ قادر است تا علاوه بر تشخیص الگوهای ساده، الگوهای پیچیده و پنهان در تصاویر سنجش از دور را نیز شناسایی کند. این ویژگی باعث افزایش دقت و کارایی مدل در شرایط مختلف محیطی و جغرافیایی می‌شود.

با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده در ارزیابی قابلیت اجرایی روش پیشنهادی در این تحقیق از یک منبع خاص و با شرایط جغرافیایی و نوری مشابه تهیه شده‌اند، برای رفع این محدودیت و بهبود عملکرد مدل و افزایش قابلیت تعمیم‌پذیری آن، می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای و هوایی مختلف برداشت شده از مناطق مختلف جهان با شرایط آب و هوایی و جغرافیایی متفاوت استفاده کرد. به علاوه، در کنار استفاده از داده‌های متنوع، بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته داده‌افزایی نیز می‌تواند به بهبود عملکرد مدل کمک کند. داده‌افزایی با تولید نمونه‌های جدید از داده‌های موجود، به افزایش تنوع داده‌ها و مقاومت مدل در برابر تغییرات محیطی و جغرافیایی کمک می‌کند. استفاده از تکنیک‌هایی نظیر چرخش، تغییر مقیاس، تغییر روشنایی و کنتراست، و ترکیب این تکنیک‌ها با یکدیگر، می‌تواند به تولید داده‌های متنوع‌تر و مقاوم‌تر کمک کند و در نتیجه عملکرد مدل را بهبود بخشد.

همانطور که در جدول ۱ مشخص است، استفاده از ماژول‌های توجه مکانی و کانال و تجمیع هرمی در شبکه بهبودیافته UNet3+ توانسته معیارهای بازخوانی، دقت، امتیاز F1 و IoU را به ترتیب به میزان ۱/۲، ۱/۷، ۰/۵ و ۵/۱ نسبت به نسخه اصلی شبکه UNet3+ بهبود بخشد. این بهبودها نشان‌دهنده توانایی بالای شبکه در تشخیص جاده‌های فرعی، به‌ویژه در مناطق شهری غیرمتراکم، مناطق کشاورزی و دارای پوشش گیاهی است. در مناطقی که جاده‌ها با پس‌زمینه گیاهی و خاکی همپوشانی دارند، شبکه توانسته است بهبود قابل‌توجهی در پیوستگی جاده‌ها و کاهش خطاهای تشخیصی داشته باشد.

با این که این مقادیر نشان‌دهنده دقت بالای شبکه در شناسایی جاده‌های فرعی است، اما همچنان چالش‌هایی مانند تشابه طیفی و بافتی میان جاده‌ها و سایر عوارض زمین، به‌ویژه در مناطق شهری با پوشش گیاهی و ساختمان‌های مشابه، وجود دارد. این تشابه‌ها می‌توانند باعث کاهش دقت شبکه در تشخیص جاده‌ها و ایجاد اشتباهات در تعیین مرزهای دقیق جاده‌ها شوند.

با این حال، در مناطقی که پوشش گیاهی نامتراکم‌تر است، عملکرد شبکه بهبود یافته و شبکه توانسته است جاده‌ها را با دقت بیشتری شناسایی کند. این نشان‌دهنده قدرت شبکه در تشخیص جاده‌ها در شرایطی است که تداخل‌های محیطی کمتری وجود دارد. اما در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، ضعف‌هایی در شناخت تقاطع‌ها و جاده‌های پیچیده مشاهده می‌شود. این ضعف‌ها می‌تواند ناشی از پوشش گیاهی متراکم باشد که باعث مخفی شدن بخشی از جاده‌ها و کاهش وضوح تصویر در این مناطق می‌شود.

در مناطق کشاورزی که جاده‌ها اغلب در مجاورت زمین‌های زراعی قرار دارند، شبکه توانسته است با دقت بالاتری پیوستگی جاده‌ها را تشخیص دهد. این بهبودها به دلیل توانایی شبکه در استخراج و ترکیب اطلاعات از سطوح مختلف تصویر و تحلیل دقیق‌تر ویژگی‌های مکانی و کانال‌های اطلاعاتی است. ترکیب ماژول‌های توجه و تجمیع هرمی به ویژه در شرایطی که شبکه با داده‌های پیچیده و چالش‌های محیطی مختلف روبرو است، به بهبود عملکرد شبکه و افزایش دقت کلی آن کمک کرده است.

نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف تشخیص خودکار عارضه جاده با استفاده از تصاویر سنجش از دور با قدرت تفکیک مکانی زیاد و معماری‌های یادگیری عمیق طراحی شده است. روش‌های سنتی تشخیص جاده‌ها عمدتاً به تحلیل دستی تصاویر و استخراج ویژگی‌های سطح پایین مبتنی بر قوانین خاص متکی بوده‌اند، اما این روش‌ها در مواجهه با پیچیدگی‌های محیطی و تغییرات شرایط نوری و جغرافیایی کارایی خود را از دست می‌دهند. از سوی دیگر، روش‌های یادگیری عمیق قادرند با استفاده از شبکه‌های عصبی پیچیده و یادگیری از داده‌های گسترده، الگوهای

[8] Zhou N, M. Zhou M, Ge L. "Vector Road Map Updating from High-Resolution Remote-Sensing Images with the Guidance of Road Intersection Change Detection and Directed Road Tracing." *Remote Sensing*, 2023; 15(7): 1840. <https://doi.org/10.3390/rs15071840>

[9] Zhu X, Huang X, Cao W, Yang X, Zhou Y, Wang S. "Road Extraction from Remote Sensing Imagery with Spatial Attention Based on Swin Transformer." *Remote Sens.* 2024; 16, 1183. <https://doi.org/10.3390/rs16071183>

[10] Gao L, Shi W, Miao Z, Lv Z. "Method Based on Edge Constraint and Fast Marching for Road Centerline Extraction from Very High-Resolution Remote Sensing Images." *Remote Sens.* 2018; 10, 900. <https://doi.org/10.3390/rs10060900>

[11] Courtrai N, Bourgeois S, Balligand E. "Road network extraction in remote sensing images using morphological operators." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010; 48(11): 3980-3990. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2052587>

[12] Gamba P, Houshmand B. "Urban road extraction in high-resolution SAR images using contextual information." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002; 40(2): 274-282. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.984692>

[13] Grinias I, Chrysoulakis N, Kontoes C. "Unsupervised road extraction from high resolution satellite images using hybrid methods." *Remote Sensing*, 2014; 6(7): 5806-5822. <https://doi.org/10.3390/rs6075806>

[14] Liu Y, Zhou M. "Road extraction from satellite images using generalized Hough transform." *International Journal of Remote Sensing*, 2017; 28(10): 2331-2341. <https://doi.org/10.1080/01431160701305715>

[15] Lindeberg T. "Scale-space theory: A basic tool for analyzing structures at different scales." *Journal of Applied Statistics*, 1994; 21(2): 225-270. <https://doi.org/10.1080/02664769400000012>

[16] Chen Z, Deng L, Luo Y, Li D, Junior J. M. "Road extraction in remote sensing data: A survey." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102833>

[17] Van Etten A, Lindenbaum D, Bacastow T. M. "Spacenet: A remote sensing dataset and challenge series." *arXiv preprint arXiv:1807.01232*. 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01232>

[18] Omati M.E. Tabib Mahmoudi F. "Efficiency analysis of ITN loss function for deep semantic building segmentation." *Earth Sci Inform*, 2024; 17: 2011–2025. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01267-w>

[19] Xu Y. Xie Z. Feng Y. Chen Z. "Road extraction from high-resolution remote sensing imagery using deep learning." *Remote Sensing*, 2018; 10(9): 1461. <https://doi.org/10.3390/rs10091461>

مشارکت نویسندگان

آقای امیرحسین غلامیان در جمع آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل نتایج مشارکت داشته‌اند. خانم فاطمه طبیب محمودی در ایده پردازی و طراحی پژوهش و نگارش و اصلاح مقاله مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گرنت شماره ۵۹۷۳/۶۳ مورخ ۱۴۰۳/۰۴/۱۴ انجام گردیده است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که در رابطه با انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند. همچنین نویسندگان منافعی تجاری در این راستا نداشته‌اند و در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

منابع و مآخذ

[1] Shi Q, Liu, X, Li X. "Road detection from remote sensing images by generative adversarial networks." *IEEE Access*, 2017; 6, 25486-25494. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831034>

[2] Abdelkarim S.B, Ahmad A.M, Ferwati S, Naji K. "Urban Facility Management Improving Livability through Smart Public Spaces in Smart Sustainable Cities." *Sustainability* 2023; 15, 16257. <https://doi.org/10.3390/su152316257>

[3] Chen Z, Deng L, Luo Y, Li D, Junior J. M, Gonçalves W. N, ... & Li, D. "Road extraction in remote sensing data: A survey." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022; 112, 102833. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102833>

[4] Wei Y, Ji S. "Scribble-based weakly supervised deep learning for road surface extraction from remote sensing images." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021; 60: 1-12. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3053740>

[5] Omati M.E, Tabib Mahmoudi F. "A Deep Learning Approach based on Specialized Convolutional Blocks in Urban Road Extraction." *JGit* 2024; 12(1): 83-94. <https://doi.org/10.1109/JGIT.2024.123456>

[6] Zhang J, Chen L, Wang C, Zhuo L, Tian Q, Liang X. "Road recognition from remote sensing imagery using incremental learning." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017; 18(11): 2993-3005. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2700987>

[7] Wei Z, Zhang Z. "Remote Sensing Image Road Extraction Network Based on MSPFE-Net." *Electronics*, 2023; 12(7): 1713. <https://doi.org/10.3390/electronics12071713>

موضوع استفاده از یادگیری عمیق در تشخیص جاده با موفقیت به اتمام رساند.

Gholamian, A., Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

✉ Amirhoseinghloamian@sru.ac.ir



فاطمه طبیب محمودی استادیار گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی مهندسی نقشه برداری را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری -

گرایش فتوگرامتری را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه تهران دریافت نمودند. در سال ۱۳۸۹ به عنوان دانشجوی دکتری فتوگرامتری در دانشگاه تهران مشغول به تحقیق شدند و در سال ۱۳۹۳ موفق به اخذ مدرک دکتری تخصصی خود گردیدند. ایشان ده ها مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های علمی ملی و بین المللی ارائه نموده‌اند و همچنین در کمیته علمی و داوری چندین مجله و کنفرانس علمی نیز فعالیت داشته‌اند. شاخص ترین زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: تشخیص الگو، یادگیری ماشین، ادغام داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های هوشمند.

Tabib Mahmoudi, F., Assistant Professor at the Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

✉ fmahmoudi@sru.ac.ir

[20] Gao L. Song W, Dai J, Chen Y. "Road extraction from high-resolution remote sensing imagery using refined deep residual convolutional neural network." *Remote Sensing*, 2019; 11(5): 552. <https://doi.org/10.3390/rs11050552>

[21] Lu X, Li S. "Global-aware deep network for road extraction from satellite images." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019; 16(7): 1100-1104. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2903593>

[22] Fan H, Long J. "DlinkNet: LinkNet with pretrained encoder and deep supervision for road extraction from aerial imagery." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019; 16(4): 618-622. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2018.2882992>

[23] Yerram S, Xu X. "Unet++ with ResNeXt for road extraction from high-resolution satellite images." *Remote Sensing*, 2021; 13(1): 60. <https://doi.org/10.3390/rs13010060>

[24] Xu Y, Xie Z, Feng Y, Chen Z. "Road extraction from high-resolution remote sensing imagery using deep learning." *Remote Sensing*. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10091461>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



امیر حسین غلامیان پس از اتمام تحصیلات دوره کارشناسی رشته مهندسی نقشه برداری، در سال ۱۴۰۰ در گرایش سنجش از دور در مقطع کارشناسی ارشد گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تحصیلات خود را آغاز نمود. وی موفق شد که در سال ۱۴۰۳ پایان نامه کارشناسی ارشد خود را در

Citation (Vancouver): Gholamian A, Tabib Mahmoudi F. [Detection of Secondary Roads in Soil and Vegetation areas Based on Deep Learning Model]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 335-343

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11390.1085>



COPYRIGHTS

© 2024 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research

Volume 2, Issue 2, Serial Number 4, Summer & Autumn 2024

Estimating Geoidal Vertical Skewness and its effect on the reduction of the slope distances to the horizontal ones <i>M. Shirazian, F. Hajmahmoudattar</i>	179-186
Systematic Analysis of Space Lidar Payload of Remote Sensing Satellites with Emphasis on the Effect of Environmental Parameters <i>M. Khoshsima, S. Ghazanfarinia, R. Narimani</i>	187-204
Evaluation of Surface Temperature Changes in Ilam City with a Combined Approach to Geostatistical Models and Spatial Information Systems <i>A. Vafaeinejad, F. Hemati, S. Haery</i>	205-218
Development of a Decision Support System for Optimizing Land Use Allocation Using the Ant Colony Algorithm (Case Study: 7 th Municipal District of Isfahan) <i>A. Sahebgharani</i>	219-232
Large Scale Crop Type Mapping Using Multi Temporal Sentinel-2 Imagery and a New Attention U-Net-Vit <i>M. HeidariGholanlo, R. Javanmard Alitappeh, E. Ghanbari Parmehr</i>	233-246
Radio Sounding and Tomography of Ionosphere based on GNSS <i>S. Barzegar, M. Khoshsima</i>	247-264
Building Detection with Special Roofing in Urban Areas using Hyperspectral Remote Sensing Technology <i>D. Akbari, M. Akbari</i>	265-276
Analysis and classification of land use using aerial imagery and deep learning based on U-Net architecture <i>M. Farhangi, A. Milan, S. Sadeghian</i>	277-292
Presenting a temporal-spectral signature model to identify and distinguish different plant species by using satellite images <i>P. Afzali Kordmahalleh, S. Behzadi</i>	293-306
Comparison of extracting façade points of urban buildings from points cloud of mobile laser scanner and UAV imaging <i>M. Heidarimozaffar, S.A. Hosseini</i>	307-320
Evaluation of the impact of construction in urban areas on air pollution in the troposphere using remote sensing data <i>A. Amini, Z. Azargoshayesh, P. Nouri</i>	321-334
Detection of Secondary Roads in Soil and Vegetation areas Based on Deep Learning Model <i>A. Gholamian, F. Tabib Mahmoudi</i>	335-343