


Assessment and comparison of the capability of two algorithms, RXD and NHI for detection of thermal anomalies of gas flaring based on the short-wave infrared bands of Landsat 8 satellite

Elmira Asadi-Fard¹ , Samereh Falahatkar²  , Mahdi Tanha Ziarati³ 

1- Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Email: e.asadifard@modares.ac.ir

2-(Corresponding Author), Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Email: samereh.falahatkar@modares.ac.ir

3- Department of Health, Safety and Environment Engineering, Ferdous Rahjuyan Danesh Higher Education Institute, Borazjan, Iran

Email: mahdi.ziarati@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

28 November 2023

Received in revised form:

24 February 2024

Accepted:

30 March 2024

Available online:

3 May 2024

Keywords:

Gas Flaring,
Thermal Anomaly
Detection,
RXD/NHI Algorithm,
PSEEZ.

ABSTRACT

Flares are elevated metallic vertical structures that are used in industries to dispose of flammable gases. It is an essential source of production and emission of greenhouse gases into the air. Therefore, gas flaring detection and identification is very important. The Pars Special Economic Energy Zone (PSEEZ) is one of the industrial areas in the south of Iran. The object of this research is to compare and investigate the potential of two algorithms, RXD and NHI, for the detection of thermal anomalies due to flames of gas flaring in the industries of PSEEZ by Near and shortwave infrared bands of Landsat 8 in 2018 and 2019. The innovation of this research is the first-time use of the RXD algorithm for detection and the utilization of the NHI algorithm at the local scale. The findings represented both algorithms had a high capability for detecting the thermal anomalies of flare during the day. However, the NHI algorithm is more accurate than the RXD algorithm due to taking into consideration the near-infrared band in the detection of thermal anomalies process in the studied area. In the validation section, the RXD rate of the detection algorithm showed over 70% for most months of these two years (2018-2019). This rate was above 80% for the first-NHI index, and it was more than 50% for the second index. In conclusion, the near and shortwave inferred bands of the Landsat 8 have a good capability in detecting thermal anomalies due to the flames of flares, which are located in the study area.

Cite this article: Asadi-Fard, I., Falahatkar, S., Tanha Ziarati, M. (2024). Assessment and comparison of the capability of two algorithms, RXD and NHI for detection of thermal anomalies of gas flaring based on the short-wave infrared bands of Landsat 8 satellite. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (1), 103-122. <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.369404.1007803>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Gas flaring (GF) is the necessary way to dispose of the gas produced in industries that do not have enough facilities to dispose of these produced gases. The process has significant regional and global environmental effects; thus, routine monitoring, detection, and estimation of the volume of gas flared are very important. Remote sensing has enough potential to prepare useful information about this process. Some sensors can detect the thermal anomalies of the flame of fire and other hot spots. Accordingly, pixels containing flare have different spectral behavior than surrounding pixels. Flares are subpixel objects; it is necessary to use special sensors with appropriate spatial resolution, such as Landsat 8. All hot spots emit most of their thermal radiation in the infrared region of the electromagnetic spectrum. The emission peak for thermal sources such as flares (1450 K) is in the shortwave infrared range. In general, SWIR bands from various/different sensors like OLI and MSI/sentinel2 have a suitable spatial resolution for GF detection. Many researchers have been focusing on the detection of gas flaring all over the world from 2015 until now. They have used different algorithms such as NHI, SMACC, TAI, and DAFI by using daytime or nighttime images or products of different satellite sensors on a global scale. According to these studies, all detection algorithms were done at the global scale, and due to a lack of access to all GF sites, researchers had to use Google Earth for validation. Unfortunately, it turned out that many flares were missed in some sites. Also, the distinction between gas and oil refinery flares is not considered in most research. Therefore, the main purpose of this research is to detect thermal anomalies due to active flares which are located at the Pars Special Economic Energy Zone using RXD and NHI algorithms based on NIR/SWIR bands of the OLI sensor of L8 (2018-2019) and compare the ability of these algorithms together. To increase the rate of accuracy, only flares of gas refineries were investigated (at the local scale). We determined the geographic location of all flares during local visits;

therefore, validation was done with high

accuracy.

Methodology

The main goal of this research is to detect thermal anomalies due to the flames of flares using two methods, RXD and NHI algorithms, in the study area. RXD can find spectral differences between a test region and its surrounding pixels. This algorithm extracts targets that are spectrally distinct from the image background. First, all images of the OLI sensor were downloaded for two years. Then, the OLI sensor bands 6 and 7 were stacked with each other for all months. The RXD algorithm was applied for anomaly detection on bands 6-7 shortwave from January 2018 to December 2019 in PSEEZ. In the next step, the NHI algorithm was done based on the difference of the bands/divided by the bands' sum by considering the OLI NIR/SWIR bands from January 2018 to December 2019 in PSEEZ. Finally, we compared the results of these algorithms together. The finding of the RXD algorithm was shown monthly by anomaly pictures. Unfortunately, the NHI algorithms could not represent the results by visual outputs. For this section, exact points of active flares (64) were used. The last one was the percentage of detection rate calculated for all months. The point layer of flares was used to calculate the rate percentage of anomaly detection. Using Shapefile of flares location, the number of flares detected each month and the number of flares ignored were counted. Next, the detection rate of both algorithms was determined.

Results and discussion

A gas flare signal peaks in the SWIR region; then, the RXD algorithm produced monthly images that showed anomaly pixels (with white clusters) for all images, and the NHI finding was shown. In total, the results of both algorithms represented that these detection algorithms are capable of anomaly detection of gas flaring in the study area. The OLI sensor's bands 6 and 7 displayed almost more accurate detecting gas flaring locations in RXD/algorithm. As mentioned above, the NHI has two indexes, but the index of SWIR based on SWIR bands/OLI did not have

enough ability for detection, and the next one, the NIR index based on the NIR band, provided accurate detection due to the flame of the flare. It is important to mention that these algorithms and OLI bands did not have complete detection, and some flares were missed in both algorithms. Furthermore, the rate of thermal anomaly detection based on RXD and NHI was high. That shows the adequate ability of RXD/NHI to detect thermal anomalies of flare flames at the local scale. In the validation phase, the RXD algorithm achieved a detection rate of over 70% for the majority of months in the years 2018 and 2019. Specifically, the detection rate exceeded 80% for the first-NHI index; for the second index, it was above 50% for most months. In summary, the near and shortwave infrared bands of the Landsat 8 demonstrate strong effectiveness in detecting thermal anomalies caused by GF in the study area.

Conclusion

In this study, the detection of flares in refineries and petrochemicals in the PSEEZ was applied using the RXD/NHI algorithm with NIR/SWIR bands of the OLI-Landsat-8 in different months in 2018 and 2019. Many flares in the PSEEZ are related to refineries and petrochemicals. Monthly pictures and tables showed the findings of each method; then, a comparison was made. As a result, these algorithms had enough capability to detect thermal anomalies due to the flare flame. Nevertheless, the NHI algorithm, which used a near-infrared band, represented more accuracy than the RXD algorithm. However, both detection processes were incomplete, and some flares were missed. The results of the validation part proved our findings. All in all, these algorithms with NIR/SWIR bands of OLI are recommended for detecting thermal anomalies due to flares at the global/local scales.

Funding

There is no funding support.


Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

ارزیابی و مقایسه پتانسیل دو الگوریتم RXD و NHI برای شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی مشعل سوزی با استفاده از باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه ماهواره لندست ۸

المیرا اسدی فرد^۱، سامره فلاحتکار^۲ ✉، مهدی تنها زیارتی^۳ 

۱- گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران. رایانامه: e.asadifard@modares.ac.ir
۲- نویسنده مسئول، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران. رایانامه: samereh.falahatkar@modares.ac.ir
۳- گروه مهندسی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست، مؤسسه آموزش عالی فردوس رهنویان دانش، برازجان، بوشهر، ایران. رایانامه: mahdi.ziarati@gmail.com

چکیده

فلرها تأسیسات عمودی فلزی هستند که در صنایع برای دفع گازهای اشتعال‌زا به کار گرفته می‌شوند و منبع مهمی در تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای به حساب می‌آیند. در نتیجه بررسی و شناسایی آن‌ها حائز اهمیت است. منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس یکی از مناطق صنعتی جنوب ایران است. هدف از این تحقیق بررسی پتانسیل دو الگوریتم RXD و NHI برای شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از شعله‌های فلر موجود در کلیه صنایع در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس با استفاده از باند مادون قرمز نزدیک و باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه لندست ۸ در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است. نوآوری این تحقیق استفاده از الگوریتم جدید RXD برای اولین بار در جهت شناسایی فلرها و استفاده از الگوریتم NHI در مقیاس محلی است. نتایج حاکی از این بود که هر دو الگوریتم در تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی فلرها در طی روز از خود قابلیت بالایی را نشان دادند اما الگوریتم NHI به علت اینکه باند مادون قرمز نزدیک را هم در فرآیند تشخیص در نظر گرفته است، نسبت به الگوریتم RXD دقت بالاتری را از خود نشان داد. در بخش اعتبارسنجی الگوریتم RXD نیز درصد تشخیص برای اکثر ماه‌های این دو سال بالاتر از ۷۰ درصد گزارش شد که این میزان برای شاخص اول NHI برای اکثر ماه‌ها، بالاتر از ۸۰ درصد و برای شاخص دوم بالاتر از ۵۰ درصد بود. در انتها نتیجه‌گیری می‌شود که باندهای مادون قرمز نزدیک و طول موج کوتاه ماهواره لندست ۸ در شناسایی ناهنجاری حرارتی ناشی از شعله فلرها مستقر در منطقه مورد مطالعه توانایی بسیار خوبی دارند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۰۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۱/۱۳

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۰۲/۱۶

واژگان کلیدی:

فلر،
صنایع نفت و گاز،
منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس،
درصد تشخیص.

استناد: اسدی فرد، المیرا؛ فلاحتکار، سامره و تنها زیارتی، مهدی. (۱۴۰۳). ارزیابی و مقایسه پتانسیل دو الگوریتم RXD و NHI برای شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی مشعل سوزی با استفاده از باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه ماهواره لندست ۸. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶ (۱)، ۱۰۳-۱۲۲.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.374275.1007820>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

© نویسندگان



مقدمه

سوزاندن گازها یا فلرینگ، یک مشکل دیرینه صنایع نفت و گاز است (Faruolo et al., 2022a). این فرآیند، یک روش متداول برای دفع گازهای تولیدشده، در صنایع نفت و گازی است که فاقد تأسیسات کافی برای دفع این گازهای تولیدی هستند (Elvidge et al., 2009; Elvidge et al., 2015). فلرینگ در این صنایع توسط تجهیزات احتراقی خاصی به اسم مشعل‌ها / فلرها انجام می‌شود. ارتفاع این سازه عمودی فلزی بین ۱۰ تا بیش از ۱۰۰ متر است که در بالای آن‌ها شعله آتش در معرض هوا در حال سوزاندن است که ارتفاع شعله آتش آن‌ها نیز بین ۸ تا ۱۰ متر و دمای حداکثر آن به ۲۰۰۰ کلوین نیز می‌رسد (Faruolo et al., 2021). این فرآیند باعث اتلاف حجم زیادی انرژی (Elvidge et al., 2009) و باعث آلودگی هوا می‌گردد که دارای اثرات محیط‌زیستی بسیار قابل توجهی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است و جزو منابع انتشاردهنده گازهای گلخانه‌ای (GHG) به جو (Fisher et al., 2019) و در سطح جهانی نیز به‌عنوان یک عامل مؤثر در گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی است (Faruolo et al., 2022a). مهم‌ترین چالش پیش‌روی این پدیده کمی کردن آن (Faruolo et al., 2022a) و درک بهتر اثرات زیست‌محیطی فلرینگ یا مشعل سوزی گازهای طبیعی است که نیازمند نظارت منظم بر روی شعله‌ها و در مرحله بعد تعیین میزان حجم مصرف گاز در آن‌ها است (Zhang et al., 2015).

از سال ۲۰۰۲، از سوی دفتر GGFR (Global Gas Flaring Reduction) تلاش قابل توجهی در جهت کاهش فلر شدن گازها صورت گرفته است (Elvidge et al., 2009). طبق آمار جدید منتشرشده، هفت کشور با بیشترین میزان مشعل سوزی در سراسر جهان به ترتیب عبارت‌اند از: روسیه، عراق، ایران، ایالات متحده، ونزوئلا، الجزایر و نیجریه، که متأسفانه ایران نیز رتبه سوم را به خود اختصاص داده و میزان حجم گازهای فلر شده در سال ۲۰۲۱ کشور ایران، ۱۷۵۰۰ بیلیون مترمکعب گزارش شده که نسبت به دو سال قبل افزایش قابل توجهی داشته است (GGFR, 2022). کشور ما دارای پالایشگاه‌های عظیم نفت و گاز و صنایع متعدد پتروشیمی است. البته حضور و استقرار این صنایع به‌صورت عمده در قسمت جنوبی کشور مخصوصاً در استان‌های خوزستان، بوشهر، فارس و کرمانشاه در مجاورت مخازن نفت و گاز است (Saeed et al., 2012). در این صنایع، فرآیند فلرینگ یا همان مشعل سوزی گازهای عملیاتی به‌صورت پیوسته در حال انجام است. فناوری سنجش‌ازدور، این پتانسیل و قابلیت را دارد که مشاهدات و بازدیدهای مستقل برای به دست آوردن اطلاعات جامع در مورد مناطق میزان انتشار و همچنین در مورد تغییرات زمانی و مکانی فرآیند فلرینگ را ارائه دهد (Faruolo et al., 2022a). اگرچه هیچ نوع سنجنده فضایی خاصی وجود ندارد که به‌طور اختصاصی برای مشاهده مشعل سوزی یا فلرینگ گاز طراحی و به فضا پرتاب شده باشد، اما چندین سنجنده با قابلیت تشخیص شعله‌های گاز بر اساس انتشار تابشی ناشی از شعله‌های آتش موجود هستند (Elvidge et al., 2009). این تابش‌های ساطع شده در دمای آتش معمولی، عموماً در ناحیه مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی قرار دارند (Anejionu et al., 2015). در واقع این کانال‌های سنجنده‌ها در پنجره‌های اتمسفری برای کاربردهای زمینی مثل مشاهده مشعل سوزی استفاده می‌شود (دکترعلوی‌پناه و همکاران، ۱۳۹۹). در وضعیت فعلی، فلرینگ گازها از طریق مشاهدات شبانه ماهواره‌ای در محدوده مادون قرمز (از نزدیک تا حرارتی) تجزیه و تحلیل می‌شوند. اخیراً در تحقیقات مختلف امکان استفاده از سنجنده‌های در شرایط روز، مانند نقشه‌بردار موضوعی (TM) و تصویرگر عملیاتی زمین (OLI) برای بررسی این پدیده صنعتی توسط ماهواره مورد استفاده قرار گرفتند (Faruolo et al., 2022a).

لازم به ذکر است فلرها پدیده‌های زیر پیکسلی^۱ هستند که اندازه آن‌ها در تصاویر ماهواره تقریباً 10×10 مترمربع یا حتی کمتر است. لذا رصد و بررسی آن‌ها فقط توسط سنجنده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا (Zhang et al., 2015)، مانند لندست ۸ امکان‌پذیر است. البته این ماهواره به علت قدرت تفکیک مکانی بالا در سایر زمینه‌ها، مانند برآورد تبخیر و تعرق واقعی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (شمس‌الدینی و نحوی، ۱۴۰۰). در تحقیق دیگری نیز با به‌کارگیری مدل ESTARFM^۲ برای ریزمقیاس‌نمایی تصاویر مادیس به جهت تولید و دستیابی به تصاویر لندست-مانند (با قدرت تفکیک مکانی مناسب) با استفاده از سه روش بازنمونه‌گیری تصویر، پوشش‌های زمینی مختلف و اختلاف‌زمانی بین تصاویر ورودی و شبیه‌سازی‌شده، صورت گرفت (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۸).

ماهواره لندست ۸ توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) طراحی شد و در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. OLI/TIRS^۳ هر دو سنجنده‌های موجود بر روی سکو این ماهواره هستند. داده‌های OLI در ۹ باند طیفی از مرئی تا ناحیه مادون‌قرمز با طول‌موج کوتاه با وضوح مکانی ۱۵ متر برای باند پانکروماتیک و ۳۰ متر برای باندهای مرئی و مادون‌قرمز کوتاه و داده‌های TIRS نیز در ۲ باند طیفی مادون‌قرمز حرارتی با وضوح مکانی ۱۰۰ متر هستند (nasa.gov). کلیه منابع داغ و حرارتی مانند فلرها بیشترین تابش حرارتی خود را در ناحیه مادون‌قرمز طیف الکترومغناطیسی ساطع می‌کنند. اوج انتشار برای منابعی حرارتی با دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کلوین در محدوده مادون‌قرمز متوسط و برای منابع با دمای ۱۴۵۰ کلوین به بالا در محدوده مادون‌قرمز کوتاه قرار دارد (Faruolo et al., 2022a). فلرها در دماهای بالاتر از ۱۴۵۰ کلوین و با میانگین تقریباً ۱۷۵۰ کلوین می‌سوزند (Faruolo et al., 2021).

در خصوص شناسایی و تشخیص نقاط داغ مانند فلرها با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدوری، چهار روش اصلی وجود دارد که توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند که شامل روش شناسایی بصری، روش آستانه‌گذاری ثابت، روش دو طیفی و روش پس‌زمینه‌ای هستند. الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیقات بر اساس یک روش یا هیبریدی از چندین روش طراحی شدند (Faruolo et al., 2021). الگوریتم‌ها و شاخص‌های مختلفی که از سال ۲۰۱۵ تاکنون برای شناسایی توسعه یافتند شامل: SMACC^۴، NHI^۵، DAFI^۶، HATS^۷ و TAI^۸ با به‌کارگیری روز و شب سنجنده OLI در کنار سنجنده‌های دیگر در مقیاس جهانی صورت گرفته است (Chowdhury et al., 2014; Faruolo et al., 2021; Liu et al., 2021; Faruolo et al., 2022a,b).

در الگوریتم SMACC (یک مدل مخروط محدب)، مقادیر عدد دیجیتالی (DN) باندهای مرئی (باند ۱-۴)، مادون‌قرمز نزدیک (NIR؛ باند ۵) و مادون‌قرمز با طول‌موج کوتاه (باند ۶ و ۷) به‌عنوان ورودی استفاده شدند. در این مدل ابتدا درخشان‌ترین (brightest) پیکسل شناسایی می‌شود و در مرحله بعد متفاوت‌ترین پیکسل را از بین درخشان‌ترین پیکسل پیدا می‌کند. در مرحله انتهایی بین پیکسل‌های شناسایی‌شده در مرحله دوم، متمایزترین آن‌ها را انتخاب می‌کند (Chowdhury et al., 2014).

1. Sub pixel
2. Enhanced Spatial temporal adaptive reflectance fusion model
3. Operational Land Imager
4. Thermal Infrared Sensor
5. Normalized Hotspot indices
6. Sequential Maximum Angle Convex Cone
7. Daytime Approach for gas Flaring Investigation
8. High-temperature anomalies
9. tri-spectral thermal anomaly index

مورد دیگر، با استفاده از شاخص TAI و دو باند مادون قرمز با طول موج کوتاه و نزدیک سنجنده MSI اطلاعاتی دقیق از محل و وسعت ناهنجاری‌های حرارتی مختلفی مانند آتش‌سوزی، فعالیت‌های آتش‌فشانی و منابع صنعتی حرارتی در مقیاس جهانی برای یک دوره سری زمانی طولانی، حاصل شد (Liu et al., 2021).

در خصوص نظارت بر فعالیت فلرها، پتانسیل مشاهدات ماهواره‌ای مادون قرمز روزانه سنجنده OLI در کنار سنجنده MSI با اعمال الگوریتم NHI در مقیاس جهانی برای بازه زمانی چندساله (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱) مورد ارزیابی قرار گرفت (Faruolo et al., 2022a). یک الگوریتم جدیدتر به اسم DAFI نیز بر اساس الگوریتم NHI تهیه و از مشاهدات ماهواره‌ای مادون قرمز نزدیک و با طول موج کوتاه-روزانه سنجنده OLI و سنجنده MSI در مقیاس جهانی برای بازه زمانی چندساله (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱) استفاده شد و مکان‌های فلرهای فعال در دمای بالا را در سراسر جهان شناسایی کردند (Faruolo et al., 2022b). در تحقیق دیگری از Faruolo و همکاران (۲۰۲۳) از رویکرد DAFI و داده‌های لندست ۹/۸ و MSI برای بررسی وضعیت مشعل سوزی کشورهای ایران و عراق استفاده کردند. نتایج به دست آمده قابلیت اطمینان این رویکرد را با سطوح بهبود یافته دقت و حساسیت (+۵۲ درصد) نشان داد و یک تصویر واقعی‌تر از سایت‌های مشعل سوزی و رفتار آن‌ها حاصل شد (Faruolo et al., 2023).

در اکثر تحقیقات صورت گرفته تاکنون انجام فرآیند شناسایی و تشخیص عارضه‌های حرارتی مانند فلرها در مقیاس جهانی و برای کل سایت‌های حاوی فلر صورت گرفته است که این مورد سبب بروز خطا احتمالی در فرآیند تشخیص است. علاوه بر آن در اکثر تحقیقات توجهی به فلرهای مستقر بروی خشکی و دریا قائل نشده‌اند و کلیه فلرها (بدون در نظرگیری استقرار آن‌ها بر روی خشکی و دریا) را مورد شناسایی قرار دادند. از سوی دیگر نیز فلرها پالایشگاه‌های گازی و نفتی سیستم و شرایط متفاوتی از هم دارند که در تحقیقات جهانی به این مورد نیز توجهی نشده است. در این تحقیق سعی شده است که نقاط ضعف تحقیقات را پوشش دهد در نتیجه برای فرآیند شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی منطقه مورد مطالعه در مقیاس محلی (در سطح شهرستان - مقیاس محلی) انتخاب شد. در منطقه مورد نظر فلرهای پالایشگاه‌های گازی و پتروشیمی‌های وابسته به محصولات پالایشگاه‌های گازی مستقر هستند و علاوه بر این موارد فقط فلرهای روی سطح خشکی مورد شناسایی قرار گرفتند و فلرهای دریا با توجه به شرایط متغیر آب در منطقه در فرآیند شناسایی وارد نشدند. هدف اصلی ما از این مطالعه بررسی و مقایسه پتانسیل و توانایی دو الگوریتم RXD و NHI برای شناسایی و تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از شعله‌های فلرهای گازی با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک (باند ۵) و باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه (باند ۶ و ۷) سنجنده OLI، ماهواره لندست ۸ در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس (PSEEZ) در قسمت جنوب ایران، برای بازه زمانی دوساله ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ است.

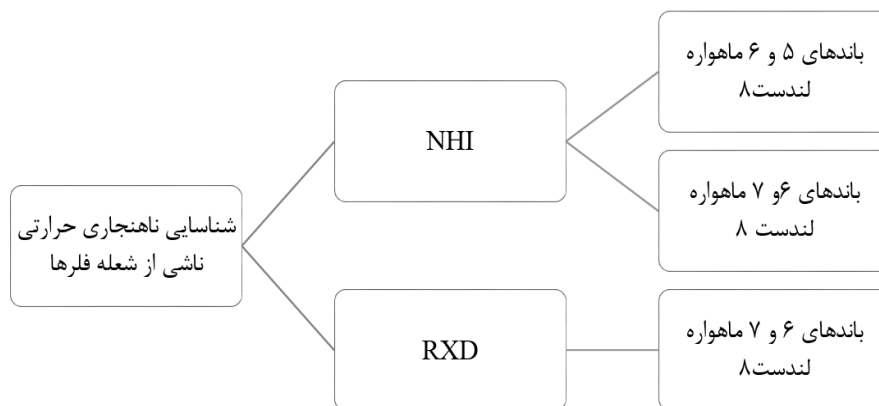
روش پژوهش

در این تحقیق از تصاویر باند ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ با توان تفکیک مکانی به ترتیب ۳۰×۳۰ متر و دوره بازگشت زمانی ۱۶ روزه برای منطقه مورد نظر استفاده شد. کلیه تصاویر از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده به آدرس (<https://earthexplorer.usgs.gov>) برای بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ دانلود شدند. علاوه بر داده‌های ماهواره‌ای، از داده‌های هواشناسی جهت بررسی درجه ابرناکی منطقه مورد مطالعه (برای بازه زمانی تحقیق) استفاده شد. این داده‌ها نیز از اداره محیط‌زیست منطقه PSEEZ برای بازه زمانی تحقیق اخذ شدند. جهت پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای تشخیص ناهنجاری، در گام اول، کالیبراسیون رادیومتری داده‌های مورد استفاده انجام شد و ارزش پیکسل‌ها به رادیانس تبدیل شدند.

تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی

واضح است که پیکسل‌های حاوی فلر رفتار طیفی متفاوتی را نسبت به پیکسل‌های اطراف خود (بدون فلر) به علت انتشار نور و حرارت نشان می‌دهند که همان ناهنجاری حرارتی هستند. لذا بررسی ناهنجاری‌های حرارتی در این منطقه مورد مطالعه به علت استقرار صنایع مختلف حائز اهمیت است و در این تحقیق ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از فلرها با استفاده دو الگوریتم مختلف و با بهره‌گیری از باندهای ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI/ ماهواره لندست ۸ مورد بررسی قرار گرفت. در نمودار زیر خلاصه‌ای از روش کار ارائه شده است.



شکل ۱. فرآیند شناسایی ناهنجاری حرارتی ناشی از شعله فلرهای مستقر در منطقه مورد مطالعه

مرحله اول (الگوریتم RXD): برای تشخیص ناهنجاری حرارتی ناشی از شعله فلرها از الگوریتم Reed-Xiaoli Detector (RXD) در نرم‌افزار ENVI جهت شناسایی تفاوت‌های طیفی یک پیکسل با پیکسل‌های همسایه آن استفاده شد. این الگوریتم عارضه هدف (Target) و پیکسل‌های متمایز از نظر طیفی با پس‌زمینه را استخراج می‌کند و نتایج حاصله از تجزیه و تحلیل این الگوریتم بدون ابهام و در تشخیص ویژگی‌های طیفی نیز بسیار مؤثر است. رابطه زیر، الگوریتم استاندارد RXD موجود در نرم‌افزار ENVI را نشان می‌دهد (Chang & Chiang, 2002; Reed & Yu, 1990):

$$\sigma_{RXD} = (r - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu) \quad \text{رابطه (۱)}$$

r = بردار (vector) نمونه

μ = میانگین نمونه

$K_{L \times L}^{-1}$ = ماتریس کوواریانس نمونه

در این بخش برای تشخیص ناهنجاری‌ها در پیکسل‌های حاوی فلر نسبت به سایر پیکسل‌ها، الگوریتم RXD بر روی تصاویر باند ۶ و ۷ سنجنده OLI (در محدوده مادون قرمز با طول موج کوتاه SWIR) از ژانویه ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۱۹ در PSEEZ اعمال شد و نتایج عملکرد آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این الگوریتم در قالب یک تصویر نهایی آنومالی ارائه می‌گردد که در این تصویر نواحی ناهنجاری (فلرها) در قالب یک کلاستر سفید رنگ ارائه می‌شود.

مرحله دوم (الگوریتم NHI): در این مرحله نیز برای تشخیص ناهنجاری حرارتی ناشی از شعله فلرها از الگوریتم The normalized hotspot indices (NHI) در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. الگوریتم NHI با استفاده از روابط (۲) و (۳) رادینانس‌های اندازه‌گیری شده در باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و SWIR سنجنده OLI/ماهواره‌های لندست ۸ را آنالیز می‌کند تا ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از فلرها را در شرایط روز تشخیص دهد (Faruolo et al; 2022a). در واقع برای اعمال این الگوریتم علاوه بر مقادیر باندهای مادون قرمز کوتاه (۶ و ۷) از مقادیر باند ۵ یا همان باند مادون قرمز نزدیک لندست ۸ نیز استفاده شد.

$$NHI_{SWIR} = \frac{B7-B6}{B7+B6} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$NHI_{SWNIR} = \frac{B6-B5}{B6+B5} \quad \text{رابطه (۳)}$$

B5 = باند شماره ۵ لندست ۸

B6 = باند شماره ۶ لندست ۸

B7 = باند شماره ۷ لندست ۸

لازم به ذکر است با محاسبه دو فرمول بالا، پیکسل‌هایی که مقادیر مثبت برای یکی یا هر دو شاخص نشان دهند، به عنوان نقطه داغ یا همان ناهنجاری حرارتی لحاظ می‌شوند. این الگوریتم مانند الگوریتم RXD قادر به تهیه یک تصویر مجزا از ناهنجاری‌های حرارتی و پس‌زمینه نیست و تصویر خروجی همان تفاوت مقادیر باندهاست. لذا این الگوریتم بر روی تصاویر باند ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI از ژانویه ۲۰۱۸ تا دسامبر ۲۰۱۹ در PSEEZ اعمال شد و بعد از اعمال مقادیر هر ۲ شاخص برای فلرهای منطقه (بر اساس لایه نقطه‌ای موقعیت دقیق فلر) استخراج شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفتند.

مرحله سوم: در این مرحله نیز به جهت بررسی صحت و درستی عملیات تشخیص، میزان درصد تشخیص بر روی کلیه تصاویر به دست آمده بعد از اعمال الگوریتم RXD و NHI محاسبه شد. معادله شماره ۴ درصد تشخیص (صحیح) را ارائه می‌دهد. برای محاسبه درصد تشخیص ناهنجاری حرارتی از لایه نقطه‌ای موقعیت دقیق فلرها استفاده شد. در نتیجه تعداد فلرهای درست شناسایی شده و نادیده گرفته شده در همراه به صورت دقیق شمارش شدند. سپس، نرخ تشخیص طبق معادله پیشنهادی برای هر دو باند مادون قرمز حرارتی و با طول موج کوتاه محاسبه شد.

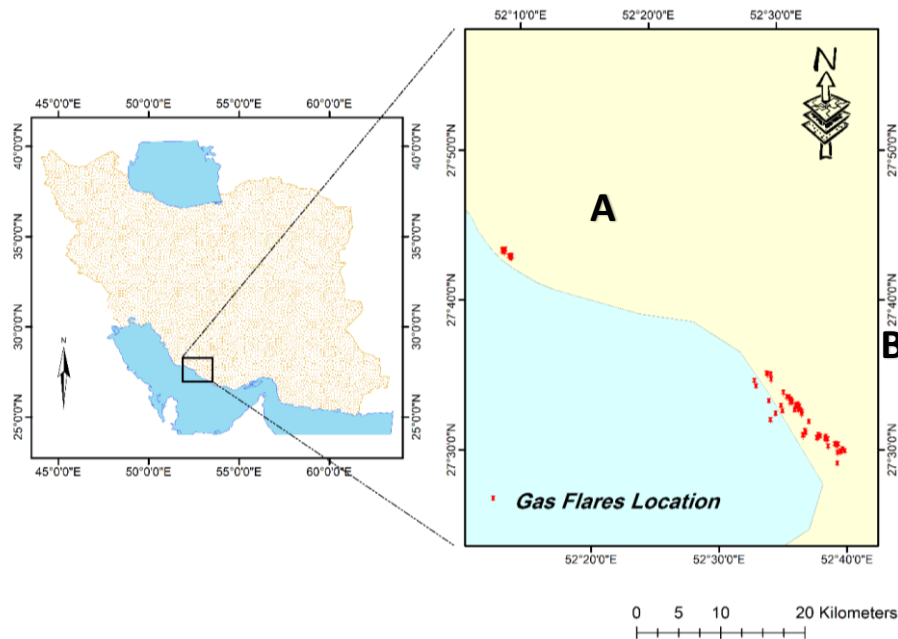
$$\text{رابطه (۴)} = \frac{\text{تعداد فلرهای درست شناسایی شده}}{N} = \text{درصد تشخیص}$$

N = تعداد کل فلرهای فعال در منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ که میزان آن در این تحقیق برابر با ۶۴ عدد است.

محدوده مورد مطالعه

منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس^۱ در جنوب ایران و در نزدیکی شهرستان عسلویه قرار دارد و جمعیت آن حدوداً به ۷۴۰۰۰ نفر می‌رسد. این منطقه مشتمل بر سه منطقه پارس یک (پارس جنوبی) با ۱۴ هزار هکتار، پارس دو (کنگان) در محدوده ۱۶ هزار هکتاری شهرستان کنگان و پارس سه (پارس شمالی) شامل ۱۶ هزار هکتار از محدوده شهرستان‌های دیر، دشتی، تنگستان و بوشهر را در برمی‌گیرد. تعداد زیادی پالایشگاه‌های گاز و صنایع پتروشیمی در این ناحیه مستقر هستند که دارای ۶۴ عدد فلر عملیاتی در انواع مختلف برای سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بودند (تنها زیارتی و همکاران، ۱۳۹۸؛ pseez.ir). شکل شماره ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

1. Pars Special Economic Energy Zone (PSEEZ)



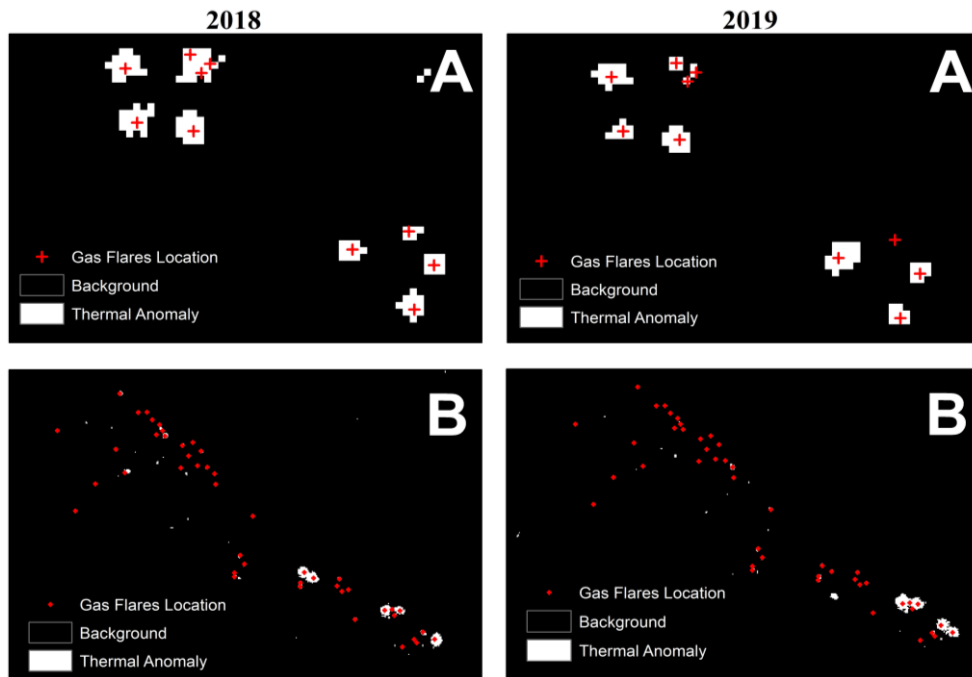
شکل ۲. منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس در جنوب ایران

یافته‌ها

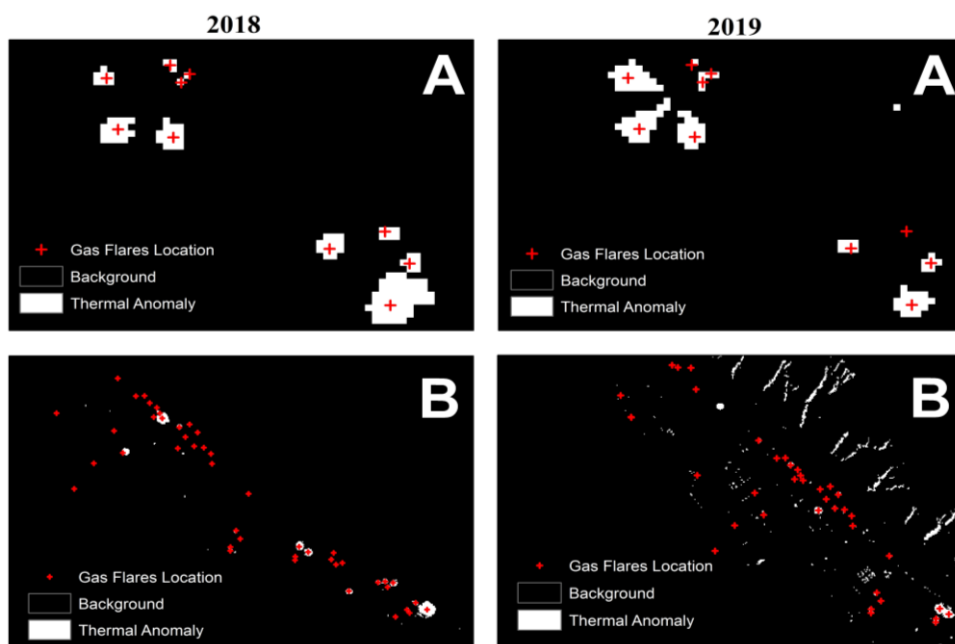
تشخیص ناهنجاری‌های ناشی از شعله‌های فلرها در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌های موجود در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس در بازه زمانی ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ با استفاده از دو الگوریتم RXD و NHI به کمک باندهای ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ انجام شد. همان‌طور که در قسمت مقدمه اشاره شده، پیکسل‌های حاوی فلر باید رفتار طیفی متفاوتی نسبت به پیکسل‌های اطراف را نشان دهند که همان ناهنجاری حرارتی مطرح می‌شود. کلیه نتایج در سه بخش مجزا به شرح زیر ارائه گردید.

مرحله اول: نتایج الگوریتم RXD

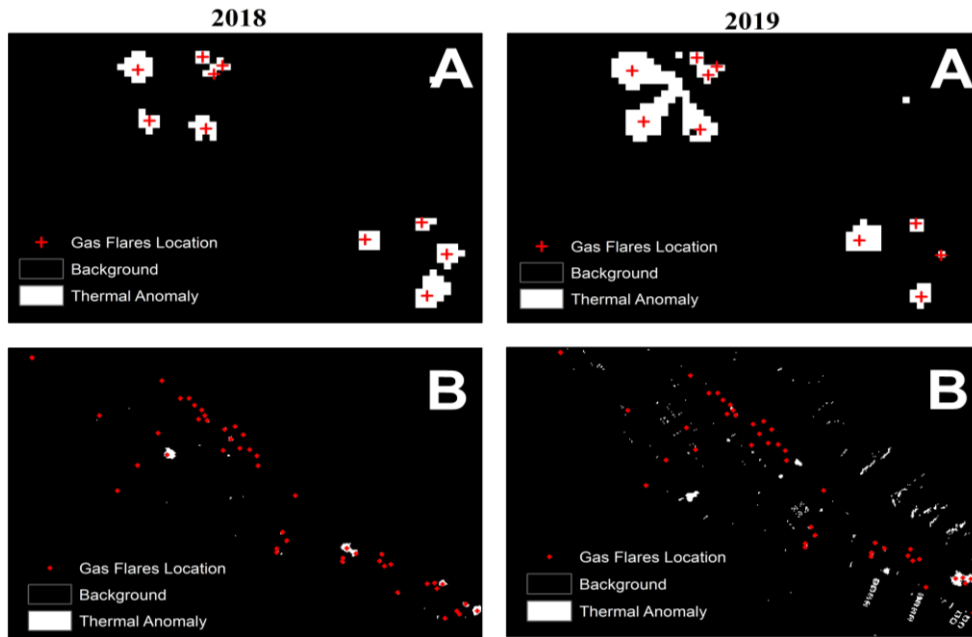
بعد از اعمال الگوریتم RXD، بر روی تصاویر ماهانه (باندهای ۶ و ۷)، یک تصویر مجزا (تصویر ناهنجاری حرارتی) حاصل گردید که تصاویر خروجی شامل دو بخش آنومالی و پس‌زمینه بود. در مرحله بعد، تمام تصاویر با موقعیت دقیق تک‌تک فلرها، بررسی شدند. با توجه به این نکته که محدوده مادون‌قرمز با طول موج کوتاه اولین منطقه در محدوده طیفی مادون‌قرمز برای تشخیص فلرها در شب و حتی در طول روز است، در نتیجه در تصاویر به‌دست‌آمده بعد از اعمال الگوریتم، در اکثر نقاط حاوی فلر آنومالی، در قالب یک کلاستر سفید نشان داده شد. تصاویر شماره ۳ الی ۱۳ تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از فلرها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم RXD برای تمام ماه‌های سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است به جهت ارائه دقیق‌تر منطقه مورد مطالعه از بعد تمرکز پایه‌های فلر به دو بخش A و B (مطابق شکل ۱) تقسیم شد و کلیه تصاویر با این تقسیم‌بندی به نمایش گذاشته شدند. با بررسی دقیق نتایج، الگوریتم RXD و باندهای مادون‌قرمز با طول موج کوتاه (باند ۶ و ۷، تصاویر سمت چپ) قابلیت خوبی در تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از فلرها در منطقه مورد مطالعه از خود نشان دادند. البته شایان‌ذکر است که در نتایج باندهای مادون‌قرمز با طول موج کوتاه، برخی از پیکسل‌های حاوی فلر در روش شناسایی با الگوریتم RXD به‌عنوان ناهنجاری حرارتی شناخته نشده‌اند. بر این اساس تشخیص در این دو باند صد در صد نبود.



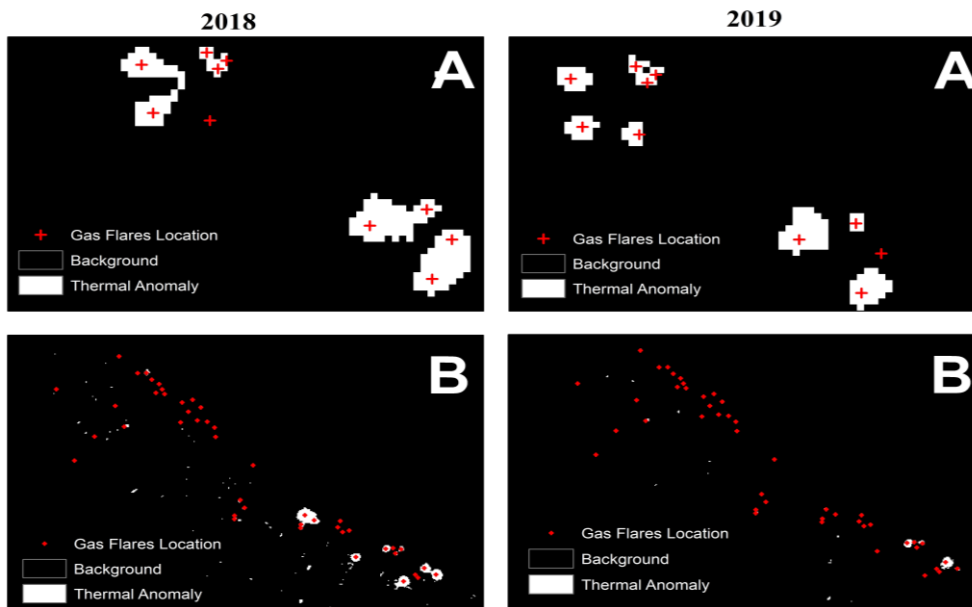
شکل ۳. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه ژانویه (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



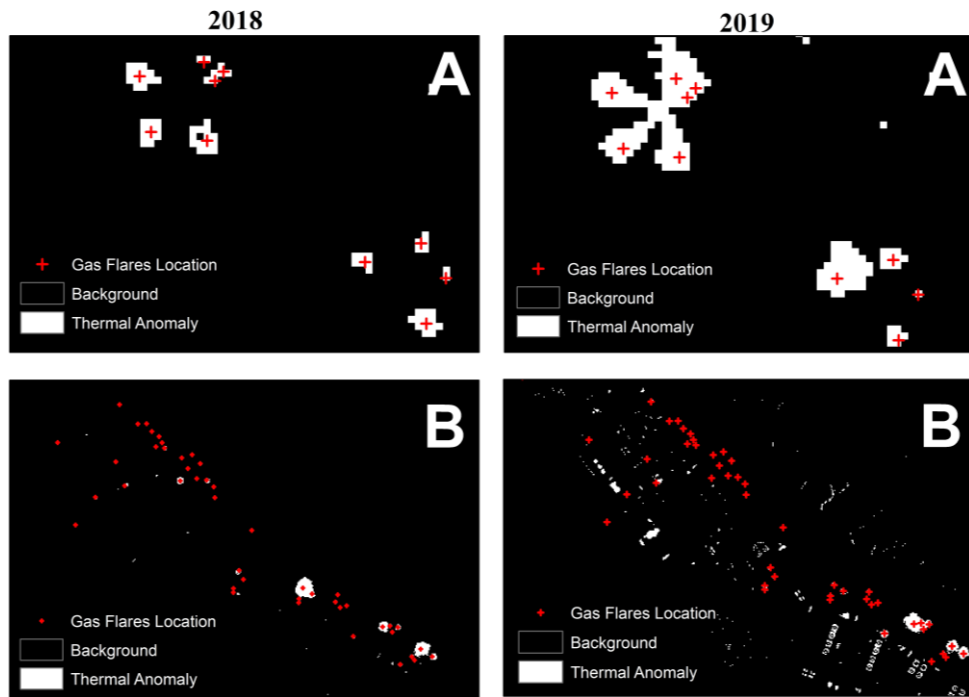
شکل ۴. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه فوریه (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



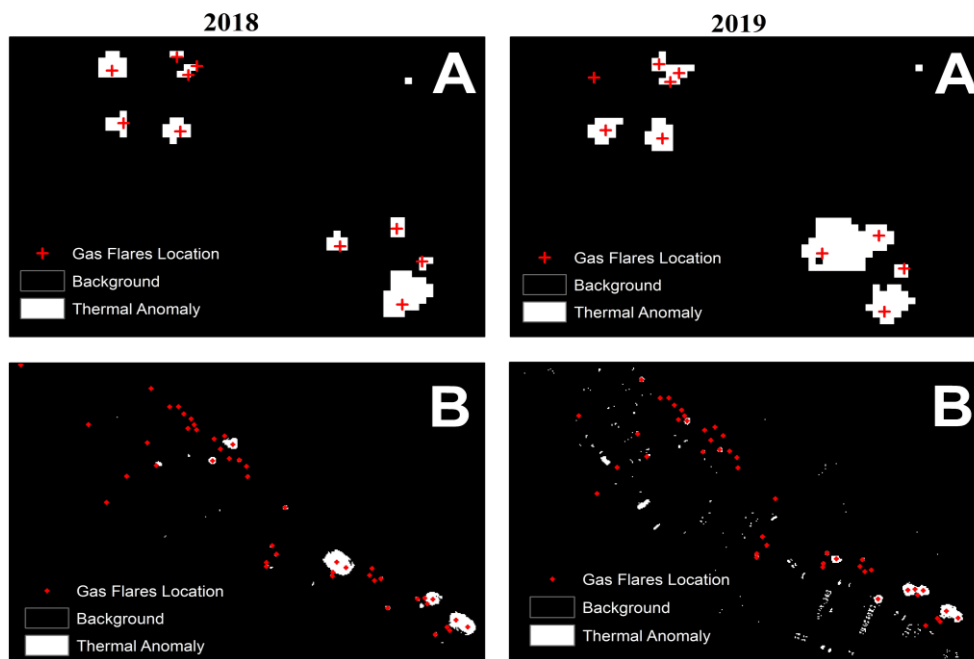
شکل ۵. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه مارس (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



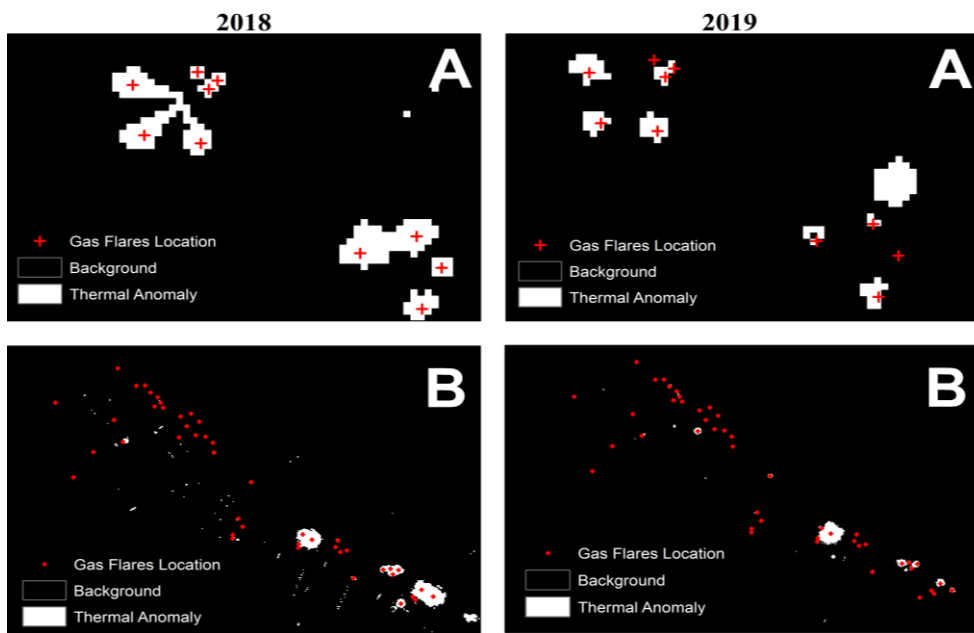
شکل ۶. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه می (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



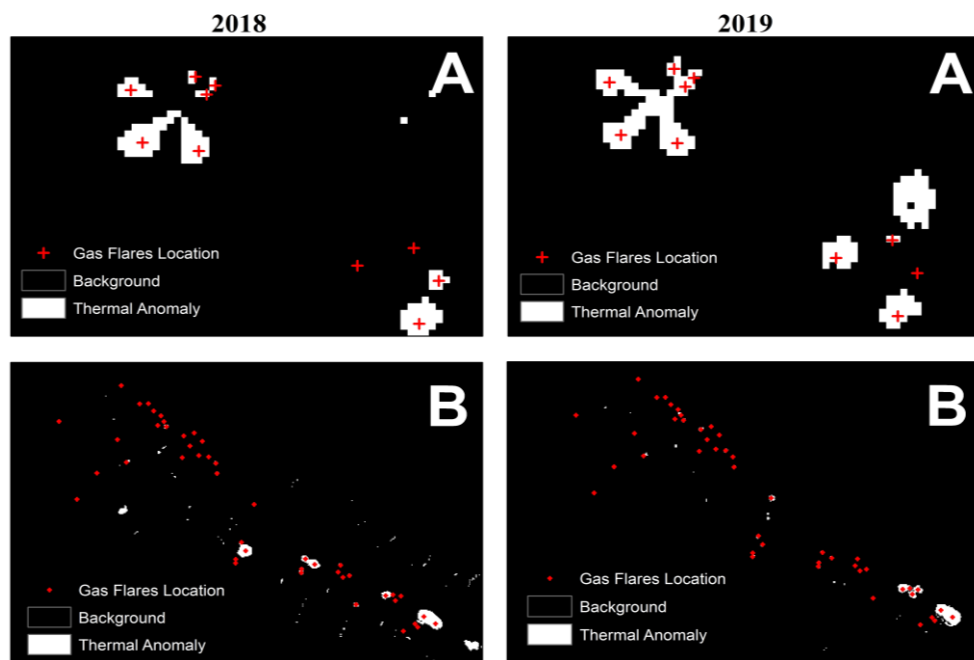
شکل ۷. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه جون (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



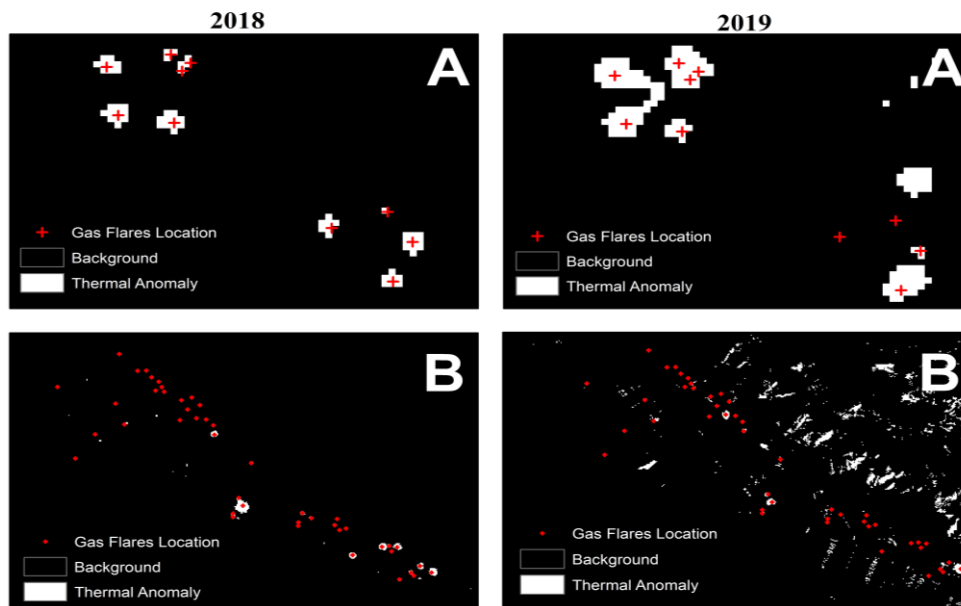
شکل ۸. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه جولای (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



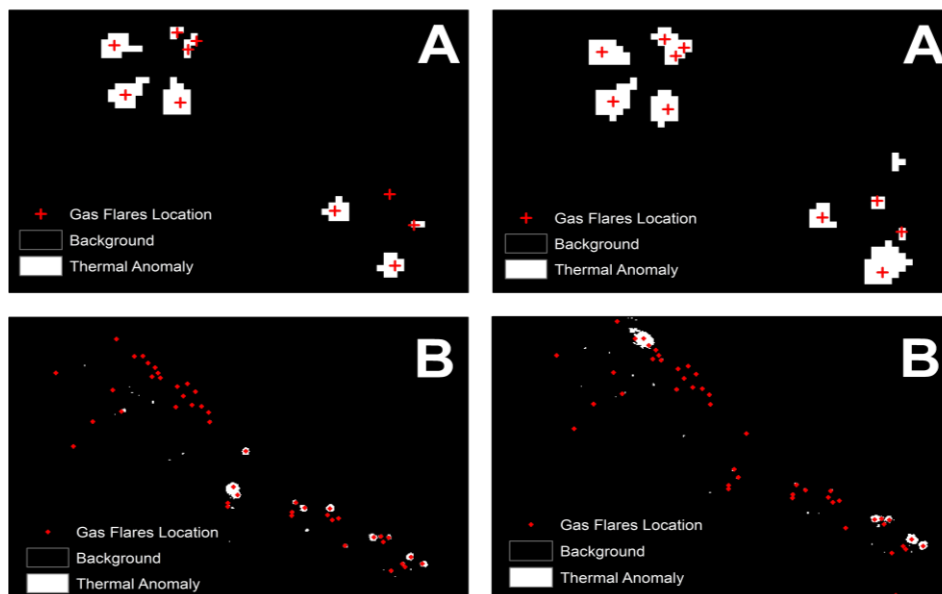
شکل ۹. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه آگوست (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



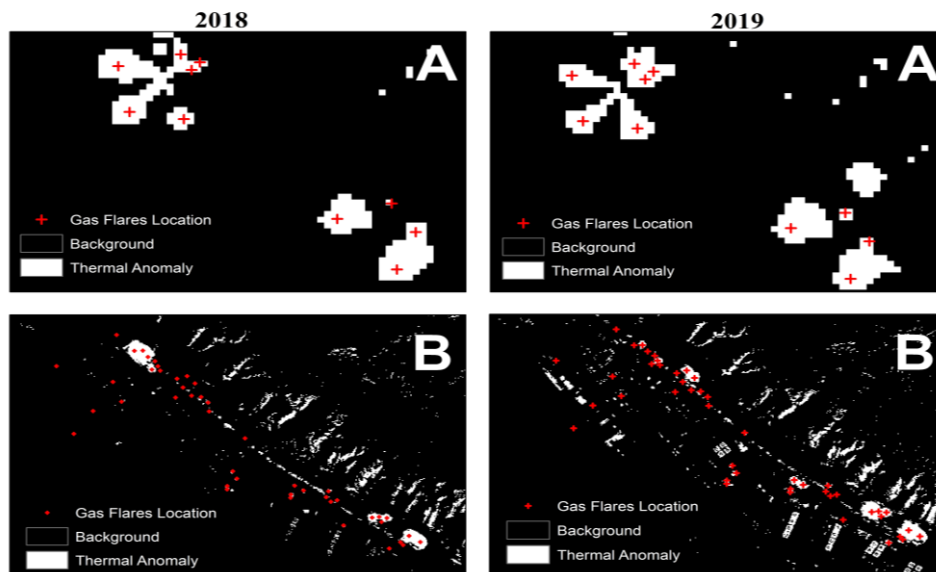
شکل ۱۰. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه سپتامبر (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



شکل ۱۱. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه اکتبر (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



شکل ۱۲. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه نوامبر (۲۰۱۸-۲۰۱۹)



شکل ۱۳. تصاویر خروجی آشکارسازی ناهنجاری حرارتی با استفاده از الگوریتم RXD برای ماه دسامبر (۲۰۱۸-۲۰۱۹)

مرحله دوم: نتایج الگوریتم NHI

این بخش نیز طبق معادله (۲) و (۳) بر روی ۳ باند ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ برای تک تک ماه‌های سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ اعمال شد. همان‌طور که در قسمت روش تحقیق این الگوریتم نیز عنوان گردید، در این بخش بعد از اعمال الگوریتم و محاسبه اعمال ریاضی بر روی باندها، نتیجه خروجی کار برخلاف الگوریتم RXD یک تصویر خروجی حاوی کلاستر سفید رنگ ناهنجاری‌های و فضایی پس‌زمینه نیست و در واقع طبق اعداد به‌دست‌آمده برای هر دو شاخص (از جنبه مثبت و منفی بودن) حضور یا عدم حضور فلر تشخیص داده می‌شود. در نتیجه بعد از محاسبه دو معادله نتایج به‌صورت کمی بررسی شد. در این قسمت با استفاده از لایه نقطه‌ای موقعیت فلرها، مقادیر عددی دو شاخص برای هر پیکسل حاوی فلر استخراج شد و اعداد موردبررسی قرار گرفتند. تعداد پیکسل‌های حاوی فلر با ارزش مثبت و منفی شمارش شدند و نتایج در جدول ۱ ارائه گردید.

طبق جدول ۱ از بین ۶۴ پیکسل حاوی فلر، تعداد پیکسل‌های حاوی مقادیر مثبت و مقادیر منفی و صفر مشخص شدند. البته با توجه به اینکه نتایج این الگوریتم در قالب بصری نبود، خروجی آن فقط در قالب اعداد ارائه گردید. در نتیجه طبق اعداد به‌دست‌آمده، شاخص NHI_{SWNIR} نسبت به شاخص NHI_{SWIR} از خود عملکرد بسیار بالاتری را نشان داد. در نتیجه با توجه به شرط ارائه‌شده در بخش روش کار از یکی از این دو شاخص هم مقادیر مثبت را نشان بدهد، حضور فلر در پیکسل تأیید می‌گردد. پس در این بخش به علت عملکرد بالایی شاخص اول (NHI_{SWNIR}) و با در نظرگیری باند ۵ سنجنده OLI با باند ۶، فرآیند تشخیص با دقت بسیار بالاتری انجام شد و در واقع تعداد فلرهای که تشخیص داده نشده در این الگوریتم بسیار پایین‌تر از الگوریتم RXD بود. البته شایان‌ذکر است در الگوریتم RXD مبنای کار فقط بر اساس باندهای مادون‌قرمز با طول موج کوتاه بود و باند شماره ۵ در عملیات تشخیص لحاظ نشده بود.

جدول ۱. نتایج بخش تشخیص و شناسایی ناهنجاری‌های ناشی از فلرها با استفاده از شاخص‌های الگوریتم NHI

سال شاخص‌ها	۲۰۱۹				۲۰۱۸		
	NHI _{SWIR}	NHI _{SWIR}	NHI _{SWNIR}	NHI _{SWNIR}	NHI _{SWIR}	NHI _{SWNIR}	NHI _{SWNIR}
ماه‌های میادادی	تعداد پیکسل‌های با ارزش منفی یا صفر	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت	تعداد پیکسل‌های با ارزش منفی یا صفر	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت	تعداد پیکسل‌های با ارزش منفی یا صفر	تعداد پیکسل‌های با ارزش منفی یا صفر	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت
ژانویه	۲۳	۴۱	۴	۶۰	۲۲	۴۲	۷
فوریه	۲۹	۳۵	۱	۶۳	۱۹	۴۵	۳
مارس	۲۷	۳۷	۷	۵۷	۱۸	۴۶	۱
آوریل ^۱	-	-	-	-	-	-	-
می	۲۳	۴۱	۱	۶۳	۲۷	۲۷	۲
جون	۲۷	۳۷	۳	۶۱	۲۰	۴۴	۱
جولای	۳۰	۳۴	۱	۶۳	۲۶	۳۸	۱
اگوست	۲۷	۳۷	۱	۶۳	۳۰	۳۴	۱
سپتامبر	۲۶	۳۸	۱	۶۳	۳۴	۳۰	۱
اکتبر	۳۲	۳۲	۱۷	۴۷	۲۳	۴۱	۲
نوامبر	۲۱	۴۳	۱	۶۳	۱۹	۴۵	۴
دسامبر	۲۹	۳۵	۱۱	۵۳	۲۲	۴۲	۲

مرحله سوم: نتایج مرحله اعتبارسنجی (صحت‌سنجی)

در این بخش برای به دست آوردن درصد میزان تشخیص ناهنجاری حرارتی طبق رابطه شماره ۴، با استفاده از لایه نقطه‌ای موقعیت دقیق فلرها بر روی تصاویر، تشخیص ناهنجاری به دست آمده بعد از اعمال الگوریتم RXD و بررسی نتایج جدول الگوریتم NHI تعداد فلرها درست تشخیص داده شده و تعداد فلرهای تشخیص داده نشده برای هر یک از ماه‌ها، به صورت دقیق بررسی و محاسبه شدند و در نهایت درصد میزان تشخیص صحیح برای هر دو الگوریتم محاسبه شد و نتایج در جداول شماره ۲ و ۳ ارائه گردیدند.

طبق مقادیر جدول شماره ۲، میزان درصد تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی الگوریتم RXD به تفکیک کلیه ماه‌های دو سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ بالای ۷۰ درصد بود. ماه‌های ژانویه و فوریه (۸۶٪) در سال ۲۰۱۸ و دسامبر (۸۴٪/۳) و فوریه (۸۱٪/۲۵) در سال ۲۰۱۹ بیشترین میزان شناسایی و کمترین آن مربوط به اکتبر (۴۸٪/۴) بوده است. بر اساس داده‌های هواشناسی میزان ابرناکی، بیشترین میزان ابری بودن آسمان به ترتیب در آوریل ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ و اکتبر ۲۰۱۹ ثبت شده است. به همین دلیل، تشخیص ناهنجاری برای آوریل ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ انجام نشد.

در جدول شماره ۳، نتایج میزان درصد تشخیص دو شاخص الگوریتم NHI بر اساس باندهای مادون قرمز نزدیک و با طول موج کوتاه سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ ارائه گردید. با بررسی نتایج این بخش، مشخص گردید شاخص دوم (بر اساس باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه) قابلیت متوسطی در تشخیص و شناسایی ناهنجاری حرارتی داشته و مقادیر برای ماه‌های مختلف بازه زمانی دو ساله بین ۵۰ تا ۷۰ درصد بود. اما برای شاخص اول و با اضافه شدن باندهای مادون قرمز نزدیک میزان درصد تشخیص این شاخص بسیار بالاتر بود. به ترتیب ماه‌های مارس و جون سال ۲۰۱۸ و ماه‌های می و نوامبر سال ۲۰۱۹ هر دو شاخص به طور هم‌زمان، بیشترین میزان درصد تشخیص را به خود اختصاص دادند.

لازم به ذکر است در حین شناسایی با استفاده از شاخص شماره اول، تقریباً اکثر فلرهای فعال در منطقه با اعمال این شاخص به صورت دقیق شناسایی شدند. در واقع، با توجه به اینکه در این الگوریتم باند مادون قرمز نزدیک در نظر گرفته شده

۱. در این ماه تصاویر ماهواره لندست برای منطقه مورد مطالعه دارای ابرناکی فراوانی بودند در نتیجه به جهت جلوگیری از ایجاد خطا، در تشخیص ناهنجاری‌ها استفاده نشدند.

بود، عملیات تشخیص با دقت بیشتری انجام شد. به بیان دیگر، در منطقه مورد مطالعه ما، الگوریتم NHI از خود قابلیت بیشتری را نسبت به الگوریتم RXD نشان داد.

البته در مقایسه بین شاخص شماره دوم (باند ۶ و ۷) الگوریتم NHI با الگوریتم RXD (باند ۶ و ۷)، الگوریتم RXD نسبت به شاخص شماره دوم (هر دو بر اساس باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه) از خود قابلیت بسیار بالاتری را نشان داد اما به طور کلی در الگوریتم NHI با اضافه شدن باند مادون قرمز نزدیک، دقت عملیات شناسایی به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرد.

لازم به ذکر است به طور کلی این الگوریتم‌ها در منطقه مورد مطالعه، از خود عملکرد بالایی را برای شناسایی ناهنجاری حاصل از شعله فلرها نشان داد، اما میزان این تشخیص‌ها صددرصدی نبود. برخی از فلرها در این فرآیند تشخیص داده نشدند. با بررسی دقیق فلرهای تشخیص داده نشده مشخص گردید که این فلرهای اکثراً متعلق به صنایع پتروشیمی مستقر در منطقه بودند. مشخصات ظاهری و عملکرد این فلرها نسبت به فلرهای مستقر در پالایشگاه‌ها متفاوت است. ارتفاع پایه آن‌ها و ارتفاع شعله آن‌ها نسبت به فلرهای پالایشگاه بسیار کمتر است. عملکرد این فلرها به این صورت است که با اضافه کردن هوا و بخار آب فرآیند احتراق به صورت کامل انجام می‌شود و در نتیجه شعله آن‌ها بسیار کوچک است که حتی در روز نیز قابل تشخیص نیست. در کنار این موارد برخی از پتروشیمی‌ها نیز با بهره‌گیری از فناوری بازیافت، میزان فلرینگ خود را به صورت قابل توجهی کاهش دادند.

جدول ۲. میزان تشخیص ناهنجاری‌های ناشی از فلرها بر اساس الگوریتم RXD با استفاده از باندهای ۶ و ۷ سنجنده OLI

سال ماه‌های میلاادی	۲۰۱۸		۲۰۱۹	
	تعداد فلرهای شناسایی شده	درصد تشخیص	تعداد فلرهای شناسایی شده	درصد تشخیص
ژانویه	۵۵	۹	۴۹	۷۶/۵٪
فوریه	۵۵	۹	۵۲	۸۱/۲۵٪
مارس	۵۲	۱۲	۴۸	۷۵٪
آوریل	-	-	-	-
می	۵۱	۱۳	۵۱	۸۰٪
جون	۵۴	۱۰	۴۷	۷۳/۴٪
جولای	۵۴	۱۰	۴۷	۷۳/۴٪
آگوست	۴۷	۱۷	۴۷	۷۳/۴٪
سپتامبر	۵۰	۱۴	۴۹	۷۶/۵٪
اکتبر	۵۰	۱۴	۳۱	۴۸/۴٪
نوامبر	۵۱	۱۳	۴۷	۷۳/۴٪
دسامبر	۵۲	۱۲	۵۴	۸۴/۳٪

جدول ۳. میزان تشخیص ناهنجاری‌های ناشی از فلرها بر اساس الگوریتم NHI با استفاده از باندهای ۵، ۶ و ۷ سنجنده OLI

شاخص‌ها	۲۰۱۸				۲۰۱۹			
	NHI _{SWIR}	NHI _{SWNIR}	NHI _{SWNIR}	NHI _{WIR}	NHI _{SWIR}	NHI _{SWNIR}	NHI _{WNIR}	NHI _{SWIR}
ماه‌های میلادی	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت	درصد تشخیص	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت	درصد تشخیص	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت	درصد تشخیص	تعداد پیکسل‌های با ارزش مثبت	درصد تشخیص
ژانویه	۵۷	۸۹٪	۴۲	۶۵/۶٪	۶۰	۹۳/۷٪	۴۱	۶۴٪
فوریه	۶۱	۹۵/۳٪	۴۵	۷۰/۳٪	۶۳	۹۸/۴٪	۳۵	۵۴/۶٪
مارس	۶۳	۹۸/۴٪	۴۶	۷۱/۸٪	۵۷	۸۹٪	۳۷	۵۷/۸٪
آوریل	-	-	-	-	-	-	-	-
می	۶۲	۹۶/۸٪	۳۷	۵۷/۸٪	۶۳	۹۸/۴٪	۴۱	۶۴٪
جون	۶۳	۹۸/۴٪	۴۴	۶۸/۷٪	۶۱	۹۵/۳٪	۳۷	۵۷/۸٪
جولای	۶۳	۹۸/۴٪	۳۸	۵۹/۳٪	۶۳	۹۸/۴٪	۳۴	۵۳/۸٪
آگوست	۶۳	۹۸/۴٪	۳۴	۵۳/۱٪	۶۳	۹۸/۴٪	۳۷	۵۷/۸٪
سپتامبر	۶۳	۹۸/۴٪	۳۰	۴۶/۸٪	۶۳	۹۸/۴٪	۳۸	۵۹/۳٪
اکتبر	۶۲	۹۶/۸٪	۴۱	۶۴٪	۴۷	۷۳/۴٪	۳۲	۵۰٪
نوامبر	۶۰	۹۳/۷٪	۴۵	۷۰/۳٪	۶۳	۹۸/۴٪	۴۳	۶۷/۱٪
دسامبر	۶۲	۹۶/۸٪	۴۲	۶۵/۶٪	۵۳	۸۲/۸٪	۳۵	۵۴/۶٪

بحث

با بررسی دقیق نتایج مشخص شد که هر دو الگوریتم که بر اساس باندهای مادون قرمز نزدیک و کوتاه هستند، در فرآیند تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از شعله فلرها از خود عملکرد بسیار خوبی را نشان دادند. در نتایج تحقیق فارولو و همکاران در سال ۲۰۲۱، در باندهای مادون قرمز نزدیک و طول موج کوتاه سنجنده OLI سیگنال افزایش یافته را در پیکسل حاوی فلر/نقطه داغ نسبت به پس‌زمینه ارائه شد، که حتی این افزایش در باند ۷ با طول موج ۲/۲ میکرومتر نسبت به باند ۶ مشخص و واضح‌تر است (Faruolo et al; 2021). در واقع نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات لیو و همکاران در سال ۲۰۱۵ و فارولو و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطابقت داشت (Liu et al., 2015; Faruolo et al; 2021). علت اصلی این افزایش سیگنال واضح و مشخص در باندهای با طول موج‌های مادون قرمز کوتاه این است که این محدوده به‌عنوان اولین منطقه برای تشخیص و شناسایی فلرها در شب و حتی روز است که تحقیقات مختلف از سال ۲۰۱۳ تا سال ۲۰۲۲ این مورد را به‌وضوح در نتایج خود ارائه داده و مطلب ذکر شده را کاملاً تأکید می‌کنند. لازم به ذکر است در گذشته تحقیقات بر روی داده‌های شبانه سنجنده‌ها از جمله VIIRS متمرکز بوده اما در تحقیقات اخیر محققان از جمله فارولو و همکاران در سال ۲۰۲۲ از داده‌های روز سنجنده‌هایی مانند OLI برای تشخیص این نقاط داغ (فلر) استفاده کردند (Elvidge et al., 2013; Zhang et al., 2015; Elvidge et al., 2015; Faruolo et al., 2021; Faruolo et al., 2022a; Faruolo et al., 2022b).

در بخش بعد در خصوص الگوریتم NHI این شاخص با اضافه کردن باند مادون قرمز نزدیک فرآیند شناسایی و تشخیص را با دقت بسیار بالایی انجام داد. در واقع شاخص اول باعث افزایش دقت و کارایی الگوریتم گردید. لازم به ذکر است نتایج این بخش از تحقیق با نتایج تحقیق فارولو و همکاران در سال ۲۰۲۲ در مقیاس جهانی نیز مطابقت داشت. لازم به ذکر است در تحقیق فارولو و همکاران (۲۰۲۲) برای سایت‌های مختلفی در مقیاس جهانی انجام شده و در این تحقیق هم با اضافه شدن باند ۵ همان باند مادون قرمز نزدیک سبب افزایش دقت فرآیند تشخیص گردید (Faruolo et al., 2022a). در واقع شاخص NHI_{SWNIR} در تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از فلرها در مقیاس جهانی و منطقه‌ای نسبت به شاخص NHI_{SWIR} مؤثرتر بوده است.

میزان درصد تشخیص این دو الگوریتم برای تمام ماه‌ها مقادیر بالاتر را برای شاخص اول الگوریتم NHI و الگوریتم RXD نشان دادند که این نتایج نیز پتانسیل و توانایی این دو الگوریتم را برای تشخیص و شناسایی ناهنجاری‌های ناشی از فلر در منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کنند. البته به‌طور کلی تشخیص و شناسایی نقاط داغ از جمله فلرها در مناطق صنعتی که خود حاوی سایر منابع حرارت‌زا فراوانی هستند فرآیند بسیار پیچیده‌ای است و این فرآیند تشخیص در هر دو الگوریتم به‌صورت کامل و صددرصدی نبود و تعدادی از فلرها در این فرآیند به‌عنوان ناهنجاری حرارتی توسط الگوریتم شناسایی نشده‌اند و نتایج هرماه در طی این دو سال نیز متفاوت بوده است این فلرهای نادیده گرفته‌شده اکثراً مربوط به فلرهای مستقر در پتروشیمی‌ها در منطقه بودند. مشخصات، وضعیت و حتی عملکرد این مشعل‌ها نسبت به مشعل‌های مستقر در پالایشگاه‌ها بسیار متفاوت هستند. ارتفاع پایه و ارتفاع شعله این مشعل‌ها بسیار کمتر از مشعل‌های پالایشگاه‌ها می‌باشد. نوع فعالیت و عملکرد آن‌ها به‌صورتی است که با اضافه کردن هوا و بخار آب فرآیند احتراق به‌صورت کامل انجام می‌شود و شعله آن‌ها بسیار کوچک است که حتی در روز نیز قابل تشخیص نیستند (Faruolo و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر آن، برخی از پتروشیمی‌ها مستقر در منطقه با استفاده از فناوری بازیافت، میزان مشعل سوزی خود را بسیار کاهش داده‌اند. نتیجتاً به دلیل مواردی که در بالا ذکر شد تشخیص ناهنجاری حاصل از مشعل‌های برخی پتروشیمی‌ها در باندهای مادون قرمز کوتاه نیز به‌صورت دقیق انجام نشده است. کلیه این موارد جز بخش‌های عدم قطعیت این تحقیق بود.

البته این مشکل در سایر تحقیقات و با استفاده از سایر الگوریتم‌ها از جمله DAFI در مقیاس جهانی در تحقیق فالورا و همکاران در سال ۲۰۲۲ نیز مشاهده شده بود (Faruolo et al., 2022b). در آخر، الگوریتم‌های RXD و NHI نیز در مقیاس منطقه‌ای امکان بررسی و شناسایی نقاط داغ صنعتی مانند فلرها در کنار سایر الگوریتم‌های بروز مانند DAFI در مقیاس جهانی با بهره‌گیری از داده‌های روزانه لندست ۸ را فراهم می‌کند و این بررسی در مقیاس‌های منطقه‌ای نیز سبب افزایش دقت فرآیند شناسایی می‌شود (Faruolo et al., 2022a; Faruolo et al., 2022b).

در نتیجه محدودیت این تحقیق عبارت‌اند از: (۱) حضور سایر تأسیسات مولد حرارت و گرما در منطقه (۲) تفاوت ساختار فلرها مستقر در پتروشیمی‌ها (شعله بسیار کوچک‌تر نسبت به فلرهای پالایشگاه‌ها) (۳) شدت مشعل سوزی/فلرینگ متغیر در منطقه یا قطع موقت عملیات (۴) افزایش انعکاس تابش نور خورشید در فصل زمستان به دلیل زاویه سمت رأس خورشید می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تشخیص و شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از شعله فلرهای فعال در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس با استفاده از دو الگوریتم RXD و NHI بر اساس باندهای مادون قرمز نزدیک و طول موج کوتاه سنجنده OLI/ماهواره Landsat-8 در بازه زمانی دو ساله ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ انجام شد. منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی (سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹) تحقیق دارای ۶۴ فلر عملیاتی بود. در این تحقیق در ابتدا، الگوریتم RXD بر اساس باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه برای تشخیص ناهنجاری ناشی از فلرها بر روی تصاویر باندهای ۶ و ۷ از سنجنده OLI و در مرحله بعد نیز دو شاخص الگوریتم NHI بر روی تصاویر باندهای مادون قرمز نزدیک و با طول موج کوتاه منطقه مورد مطالعه اعمال شدند. نتایج به‌دست‌آمده هر دو الگوریتم با یکدیگر مقایسه شدند. در الگوریتم NHI به علت در نظرگیری باند ۵ یا همان باند مادون قرمز نزدیک فرآیند شناسایی و تشخیص با دقت بیشتری نسبت به الگوریتم RXD انجام شد. در واقع شاخص شماره دوم این الگوریتم که بر اساس باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه به‌تنهایی در فرآیند تشخیص از خود قابلیت متوسطی

را نشان داده بود با اضافه شدن باند شماره ۵ به این بخش سبب افزایش دقت قابل توجهی گردید. در نتیجه باندهای مادون قرمز نزدیک و با طول موج کوتاه، در تشخیص ناهنجاری‌های حرارتی شعله فلرها بسیار مؤثر و کارآمد بودند. در بخش بعد به جهت بررسی صحت و درستی عملیات تشخیص توسط دو الگوریتم میزان درصد تشخیص هر دو الگوریتم برای تمام ۲۴ ماه محاسبه گردید که نتایج این قسمت هم دقت شاخص NHI_{SWNIR} را تأیید کردند. میزان درصد تشخیص الگوریتم RXD بالاترین مقدار را برای ماه‌های ژانویه و فوریه سال ۲۰۱۸ و دسامبر و فوریه سال ۲۰۱۹ از خود نشان داد و برای الگوریتم NHI ماه‌های مارس و جون سال ۲۰۱۸ و ماه‌های می و نوامبر سال ۲۰۱۹ هر دو شاخص به طور هم‌زمان بیشترین میزان درصد تشخیص را به خود اختصاص دادند. در آخر بر اساس عملکرد خوب هر دو الگوریتم برای شناسایی فلرها مستقر در خشکی، در منطقه مورد مطالعه، پیشنهاد می‌شود که این الگوریتم‌ها برای فلرهای گازی مستقر روی سکوهای دریایی، کلیه فلرهای پالایشگاه‌های نفتی (سطح خشکی و دریا) در سایر نقاط صنعتی در سطح کشور مورد استفاده قرار گیرد و کلیه یافته‌ها با یکدیگر مقایسه شوند تا یک نتیجه‌گیری نهایی در خصوص استفاده از این دو الگوریتم برای فلرهای کلیه مناطق صنعتی حاصل شود.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

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

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

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

منابع

- تنها زیارتی، مهدی؛ بهرامی‌فر، نادر؛ باغپیشه، غلامرضا و یونسی، حبیب‌الله. (۱۳۹۷). ارزیابی روش نوین تخمین میزان گاز ارسالی به مشعل و برآورد میزان انتشار ذرات معلق ناشی از مشعل سوزی در یک پالایشگاه گاز. *مجله پژوهش نفت*، ۱۰۴، ۹۵-۱۰۷. DOI: 10.22078/pr.2018.3371.2547
- شمس‌الدینی، علی و نحوی، سارا. (۱۴۰۰). مقایسه الگوریتم‌های ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مادیس به لندست ۸ به منظور برآورد تبخیر-تعرق. *فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۵(۴)، ۱۴۱-۱۷۳. DOI: 20.1001.1.16059689.1400.25.4.1.2.۱۷۳-۱۴۱
- علوی‌پناه، سیدکاظم؛ طبیب‌محمودی، فاطمه؛ برازندگان، محسن و محرابی، محمد. (۱۳۹۸). *سنجش‌ازدور کمی در مادون‌قرمز حرارتی نظریه و کاربرد*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- علیزاده، محمود؛ موسیوند، علی جعفر و سیمیا، سمیه. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد مکانی و زمانی الگوریتم ریزمقیاس‌نمایی ESTARFM در تولید تصاویر لندست-مانند از تصاویر مادیس. *فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۳(۴)، ۱۲۳-۱۴۵. DOI: 20.1001.1.16059689.1398.23.4.5.2

References

- Alavipanah, S. K., Tabib Mahmoudi, F., Barazandegan, M., & Mehrabi, M. (2020). *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared*. University of Tehran Press, Tehran. [In Persian].
- Alizadeh, M., mousivand, A., & Sima S. (2019). On the spatial and temporal performance of ESTARFM downscaling method for generating Landsat-like imagery. *The Journal of Spatial Planning*, 23 (4), 123-145. DOR: 20.1001.1.16059689.1398.23.4.5.2. [In Persian].
- Anejionu, O.C.D., Blackburn, G.A., & Whyatt, J.D. (2015). Detecting gas flares and estimating flaring volumes at individual flow stations using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 158, 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.018>.
- Chang, C.I., & Chiang, S.S. (2002). Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(6), 1314-1325. doi: 10.1109/TGRS.2002.800280.
- Chowdhury, S., Shipman, T.; Chao, D., Elvidge, C.D., Zhizhin, M., & Hsu, F. (2014). Daytime gas flare detection using Landsat-8 multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada*, 258-261. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6946406.
- Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Baugh, K., Hsu, F.C., & Ghosh, T. (2015). Methods for Global Survey of Natural Gas Flaring from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Data. *Energies*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/en9010014>.
- Elvidge, C.D., Zhizhin, M., Hsu, F.C., & Baugh, K.E. (2013). VIIRS Nightfire: Satellite Pyrometry at Night. *Remote Sensing*, 5(9), 4423-4449. <https://doi.org/10.3390/rs5094423>.
- Elvidge, C.D., Ziskin, D., Baugh, K.E., Tuttle, B.T., Ghosh, T., Pack, D.W., Erwin, E.H., & Zhizhin, M. (2009). A fifteen-year record of global natural gas flaring derived from satellite data. *Energies*, 2(3), 595-622. doi.org/10.3390/en20300595.
- Faruolo, M., Caseiro, A., Lacava, T., & Kaiser, J.W. (2021). Gas Flaring: A review focused on its analysis from space. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(1), 258-281. DOI: 10.1109/MGRS.2020.3007232.
- Faruolo, M., Falconieri, A., Genzano, N., Lacava, T., Marchese, F., & Pergola, N. (2022a). A Daytime Multi sensor Satellite System for Global Gas Flaring Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-17. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3143167.
- Faruolo, M., Genzano, N., Marchese, F., & Pergola, N. (2022b). A Tailored Approach for the Global Gas Flaring Investigation by Means of Daytime Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 14(24), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs14246319>.
- Faruolo, M., Genzano, N., Marchese, F., & Pergola, N. (2023). Multi-Temporal Satellite Investigation of gas Flaring in Iraq and Iran: The DAFI Porting on Collection 2 Landsat 8/9 and Sentinel 2A/B. *sensor*, 23, 1-19. <https://doi.org/10.3390/s23125734>.
- Fisher, D., & Wooster, M.J. (2019). Multi-decade global gas flaring change inventoried using the ATSR-1, ATSR-2, AATSR and SLSTR data records. *Remote Sensing of Environment*, 232, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111298>.
- GGFR. (2022). *Global Gas Flaring Tracker Report*. Washington, USA, DC 20433.
- Liu, Y., Zhi, W., Xu, B., Xu, W., & Wu, W. (2021). Detecting high-temperature anomalies from Sentinel-2 MSI images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 177,174–193. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.008>.
- NASA. (January 1, 2020), <https://www.nasa.gov/>.
- PSEEZ. (August 1, 2022). About pseez (Pars Special Economic Energy Zone), <http://www.pseez.ir/>.
- Reed, I. S., & Yu. X. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. *Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 38(10), 1760-1770. doi: 10.1109/29.60107.
- Saeed, M., Roayaei, E., Jazayeri, M.R., Saboormaleki, M., Minaei, M., & National Emadi, M.A. (2012). Database of CO₂ Emission Sources and Analysis of Geological Structures for a Carbon Sequestration Project in Iran. *SPE Middle East Health, Safety, Security, and Environment Conference and Exhibition, Abu Dhabi 2-4 April 2012, Society of Petroleum Engineers*,1-10. <https://doi.org/10.2118/152578-MS>.

- Shamsoddini, A., & Nahvi, S. (2021). Comparison of MODIS to Landsat-8 data Downscaling Algorithms for Evapotranspiration Estimation. *The Journal of Spatial Planning*, 25 (4),141-173. DOR: 20.1001.1.16059689.1400.25.4.1.2. [In Persian].
- Tanha Ziyarati, M., Bahramifar, N., Baghmisheh, G., & Younesi, H. (2018). Evaluation of a New Approach for Estimating the Amount of Flared Gas and Emission Estimation of Particulate Matters from Flaring of a Gas Process Plant. *Petroleum Research*, 29(104),95-106. DOI: 10.22078/pr.2018.3371.2547. [In Persian].
- USGS. (January 1, 2020). L8 Collection 2 - Level 1 Data, <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Zhang, X., Scheving, B., Shoghli, B., Zygarlicke, C., & Wocken, C. (2015). Quantifying Gas Flaring CH₄ Consumption Using VIIRS. *Remote sensing*, 7(8),9529-9541. <https://doi.org/10.3390/rs70809529>.