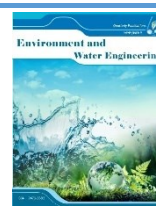




Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Evaluation of Spectral Indices to Detect the Thickness of Oil Slicks in Persian Gulf Using Satellite Images

Saeed Mahmodizadeh^{1*}, Hassan Yousefi² and Hamed Deldar³

¹M.Sc. Alumni, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil and Surveying Engineering, Kerman Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

²M.Sc. Alumni, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³Ph.D. Alumni, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

Article information

Received: Febraury 18, 2022

Revised: May 16, 2022

Accepted: May 16, 2022

Keywords:

Crude Oil
Persian Gulf
Pollution
Remote Sensing

*Corresponding author:
masoud_naderi97@iust.ac.ir



Abstract

Usually, the methods used to highlight oil stains are, In order to distinguish different parts of a stain, they work poorly in terms of thickness. the spectrum of oil slicks is affected by seawater and the physical and chemical properties of the oil. For this reason, in the upcoming research, by using Sentinel 2 satellite images and using spectral indices, different thicknesses of oil slicks were investigated and distinguished from each other. The used indices are related to two groups of hydrocarbons (FI, RAI, HI, RG, RR, WAF) and seawater (CHL, CDOM). The index separability (IS) mathematical model based on classroom distance was used to evaluate the spectral indices used quantitatively. The results show that the spectral indices of hydrocarbons are more suitable for distinguishing the emulsion from seawater and other parts of the oil slick. Thus, the value of the IS parameter for the FI index in order to detect and differentiate emulsions with segments such as seawater, shining part, code 4, and code 5 are equal to 1.542, 0.967, 0.423, and 0.4236 respectively. On the other hand, the spectral indices of seawater are suitable for detecting the thinner parts of the oil slick.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

Due to the need for rapid action to identify the location and estimate the amount of oil pollution, the use of traditional methods based on field studies using exploration flights and passing ships, in addition to being time consuming, is not economically viable. In contrast to conventional methods based on field studies, remote sensing to detect pollutants, especially oil slicks, and

monitor the resulting pollution will be very effective.

Usually, the algorithms used in previous studies related to this subject are only suitable for detecting oil slicks and separating them from seawater. They work to detect the thickness and classify different parts of the slices based on poor thickness. Since the spectral curves of oil slicks are affected by their thickness, the present study tries to investigate and differentiate the different



thicknesses of oil slicks using the spectral indices of hydrocarbons and seawater. They are noteworthy that the different thicknesses of oil slicks at sea level have different visual characteristics and, consequently, different spectral characteristics.

Material and Methods

In 2004, an agreement was approved for the apparent classification of oil slicks in terms of appearance and thickness. According to the agreement, the thickness of the oil is coded from 1 to 5, which includes sheen (silver/gray), rainbow, metallic, discontinuous oil color, and true continuous oil color (Fig. 1).

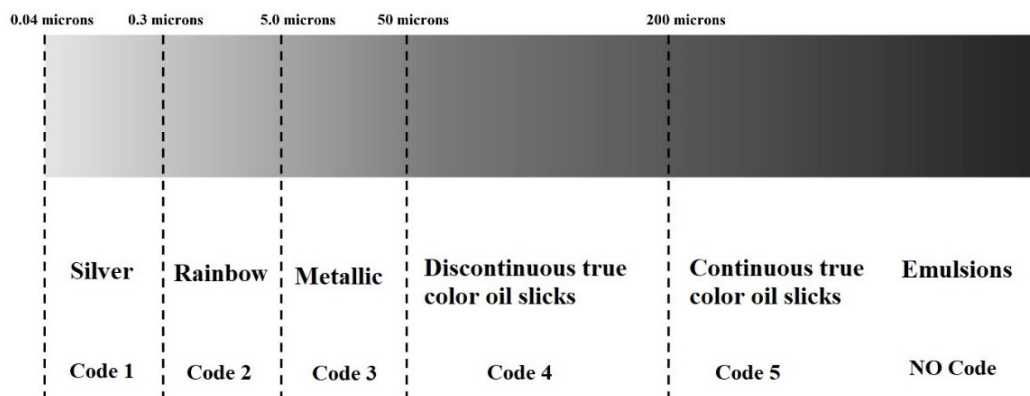


Fig. 1 Oil slick thickness descriptions

The spectral indices used in the research to identify and differentiate different parts of oil slicks include two groups of hydrocarbons (Fluorescence Index, Rotation-Absorption Index, Hydrocarbon Index, Reflectance of Green, Reflectance of Red, Water Absorption Feature) and seawater (Chlorophyll, Colored Dissolved Organic Matter). Different spectral indices may have different capabilities for identifying and distinguishing different thicknesses of oil slicks. For this purpose, for quantitative evaluation of spectral indices, the mathematical model of index separability (IS), which is based on classroom distance, was used. A larger IS indicates the index's greater ability to detect oil slick thickness.

Results

The IS values for FI, RR and CDOM indices to distinguish emulsion from other evaluated parts have higher values than other indices, which shows the high ability of these indices to distinguish emulsion from sea water and other parts. In general, IS values for FI, RR and CDOM indices are greater than zero, which means that these indices have the ability to distinguish seawater from oil-contaminated areas.

Among the indicators used, an index such as RR of its nondiagonal elements is greater than zero, which indicates the ability of this index to identify seawater and all oil slick thicknesses.

The sample image below (Figure 2) was used to implement and confirm the ability of FI, RR and CDOM indices to separate the emulsion section from the luminous and seawater ranges. In the identification results, the FI index showed better performance than the other two indices. The emulsion ranges were accurately extracted by FI, while in the output of the CDOM and RR indices some of the pixels were mistakenly placed in the emulsion and luminous classes.

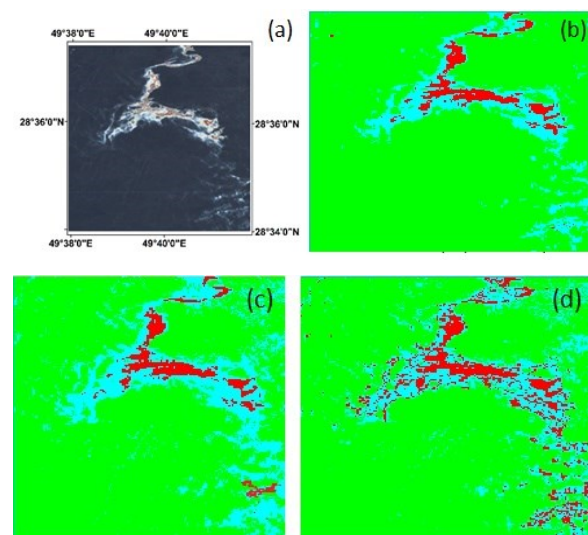


Fig. 2: a) Sample image of emulsion range Sheen (red) and seawater (green); Output of (b) FI, (c) RR, and (d) CDOM indexes after classification

Determining the extent of oil contamination is one of the most important and critical issues in dealing with oil spills. The main

goal is to accurately distinguish between seawater and areas with minimal pollution (sheen spots). Based on the IS parameter values, the following image (Fig. 3) was used to confirm the ability of the CHL index to distinguish seawater and sheen oil slicks. The results show the high ability of this index to detect and differentiate between seawater and the sheen part of oil slicks.

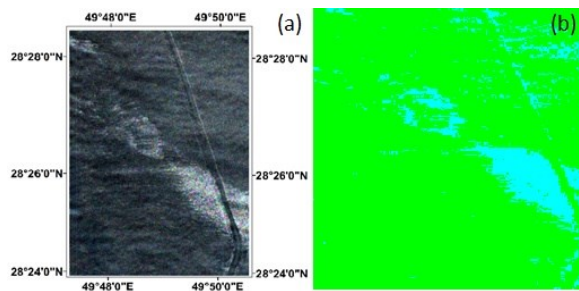


Fig. 3: a) Sample image of Sheen range and seawater, and b) output of CHL index after classification (■ Sheen and ■ Seawater)

From the IS values, it can be seen that the spectral indicators under study (hydrocarbons and seawater) may also be a supplement. For this purpose, combined methods can be used to improve the accuracy of differentiating different thicknesses of oil slicks. For example, after combining the two indices RR and WAF, the values of IS to detect and differentiate the emulsion and

other parts to be evaluated (seawater, sheen part, code 4, and code 5) as 1.004, 0.726, 0.536, 0.711. It will improve accuracy. By analyzing the IS matrix, it is possible to find examples of these indicators that complement each other and use them to improve accuracy.

Conclusion

The results showed that hydrocarbon spectral indices such as the FI index are more suitable for distinguishing emulsion from seawater and other parts of oil slick due to the high values of IS parameter than seawater spectral indices. On the other hand, the spectral indices of seawater are suitable for detecting the thinner parts of the oil slick. The spectral indices studied (hydrocarbons and seawater) may be complementary. For this purpose, combined methods can be used to improve the accuracy of differentiating different thicknesses of oil slicks.

Data Availability

The data used in this research are presented in the paper.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص‌های طیفی جهت تشخیص ضخامت لکه‌های نفتی خلیج فارس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

سعید محمودی زاده^{۱*}، حسن یوسفی^۲ و حامد دلدار^۲

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ دانش‌آموخته دکتری، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۱۱/۲۹]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۱/۰۲/۲۶]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۰۲/۲۶]

واژه‌های کلیدی:

آلودگی
سنجش از دور
خلیج فارس
نفت خام

*نویسنده مسئول:

masoud_naderi97@iust.ac.ir



معمولاً روش‌هایی که جهت بارز سازی لکه‌های نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، جهت تشخیص بخش‌های مختلف یک لکه از نظر ضخامت ضعیف عمل می‌کنند. طیف لکه‌های نفتی تحت تأثیر آب دریا و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت قرار می‌گیرند. بدین منظور در پژوهش پیش رو با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ و به کارگیری شاخص‌های طیفی، ضخامت‌های مختلف لکه نفتی بررسی و از هم متمایز شدند. شاخص‌های بکار گرفته شده مربوط به دو گروه هیدروکربن‌ها (FI, RAI, HI, RG, RR, WAF) و آب دریا (CHL, CDOM) است. به منظور ارزیابی کمی شاخص‌های طیفی مورد استفاده از مدل ریاضی شاخص تفکیک‌پذیری (IS) که بر مبنای فاصله بین کلاسی است، استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های طیفی هیدروکربن‌ها، جهت تشخیص و تمایز امولسیون از آب دریا و سایر بخش‌های لکه نفتی مناسب‌تر هستند. به این گونه که مقدار پارامتر تفکیک‌پذیری (IS) برای شاخص FI به منظور تشخیص و تمایز امولسیون با بخش‌های آب دریا، درخشان، کد چهار و کد پنج به ترتیب برابر با ۱/۵۴۲، ۰/۹۶۷، ۰/۴۲۳ و ۰/۴۲۳۶ است. از طرفی شاخص‌های طیفی آب دریا جهت تشخیص بخش‌های نازک‌تر لکه نفتی مناسب است.

۱- مقدمه

در ارتباط با محیط‌زیست مطرح می‌شود، مسئله آلودگی دریا است. زندگی صنعتی بشر امروزی بیش از هر پهنه آبی دیگر آثار مخرب خود را بر خلیج فارس نشان داده است (Aghajanian et al. 2022; Ghanavati 2021;

در سال‌های اخیر عوامل مختلفی همچون افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی، گسترش صنعت، استفاده نادرست از منابع طبیعی و موارد دیگر سبب بروز آلودگی‌های شدید زیست‌محیطی شده است. یکی از مهم‌ترین مسائلی که امروزه



فناوری‌های سنجش از راه دور و الگوریتم‌های یادگیری ماشین نقش مهمی در تشخیص و پایش دقیق نشت نفت، پیش‌بینی مسیر حرکت، توسعه برنامه‌های پاک‌سازی، انجام اقدامات به‌موقع و فوری و اعمال راهکارهای مؤثر جهت مهار آن ایفا می‌کنند (Ruzouq et al. 2020).

Zhang et al. (2017) روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان در حالت‌های مختلف و ماکزیمم شباهت را برای تشخیص لکه‌های نفتی باهم مقایسه کردند. نتایج پژوهش نشان داد روش ماشین بردار پشتیبان دارای دقت و کارایی بالاتری نسبت به دیگر روش‌های مورد استفاده بود. (Chehresa et al. 2016) از ۲۴ ویژگی و ۸ الگوریتم تکاملی مختلف جهت انتخاب و تولید زیرمجموعه مطلوبی از ویژگی‌ها استفاده کرده‌اند. در این پژوهش، آشکارسازی لکه نفتی با دقت ۹۳٪ صورت گرفت و نشان داد روش‌های بکار گرفته به دلیل استفاده از ویژگی‌های مختلف دارای دقت مناسبی است. (Talebpoor et al. 2016) به‌منظور آشکارسازی لکه‌های نفتی، بعد از پیش‌پردازش‌های مورد نیاز بر روی تصاویر، با استفاده از منحنی رفتار طیفی نفت و آب و همچنین شاخص مطلوب (OIF)^۱ ترکیب‌های رنگی بهینه تشخیص داده شدند. با محاسبه شاخص آب تفاضل نرمال شده (NDWI)^۲ و اعمال آستانه‌هایی روی آن، لکه‌ی نفتی به‌طور دقیق آشکار شد.

هر ماده یا پدیده موجود در صحنه تصویر به دلیل داشتن ترکیب و ساختار مولکولی مخصوص به خود، اثر طیفی منحصر به فردی از خود نشان می‌دهد. بر همین اساس می‌توان پدیده‌های مختلف را در سنجش از دور، آشکار و از هم متمایز نمود. یکی از عوامل بسیار تأثیر گزار بر رفتار طیفی لکه‌های نفتی، میزان ضخامت بخش‌های مختلف آن است. لذا هدف پژوهش پیش رو ارزیابی و بررسی محدوده‌های طیفی مختلف به‌منظور تشخیص و تمایز ضخامت‌های مختلف لکه نفتی با استفاده از شاخص‌های طیفی هیدروکربن و آب دریا است. شایان ذکر است که ضخامت متفاوت لکه‌های نفتی موجود در سطح دریا، ویژگی‌های بصری و به تبع آن ویژگی‌های طیفی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به عبارتی خصوصیات بصری لکه‌های نفتی ارتباط تنگاتنگی با منبع،

(Darabinia and Nagafi Asfad 2012). در صورت پیدایش آلودگی نفتی در خلیج فارس تنها مقدار بسیار جزئی از این مواد ممکن است از آن خارج شوند. بنابراین میزان بار آلودگی نفتی تحمیل‌شده بر هر کیلومترمربع از سطح خلیج فارس بیش از مقدار جهانی است. بر اساس مطالعات انجام‌شده آلودگی حاصل از حمل‌ونقل مواد نفتی در خلیج فارس حدود ۸۶٪ کل آلودگی نفتی این خلیج تخمین زده‌شده است که در مقام مقایسه، حدود ۲ برابر سهم آلودگی در اثر حمل‌ونقل دریایی در سطح جهانی است. تعداد زیاد سوانح و حوادث دریایی نیز نقش بسزایی در افزایش آلودگی نفتی در خلیج فارس داشته است (Pourhaimi et al. 2015; Johnsiz and Pirmohammadi 2021).

ردیابی دقیق نشت نفت و پیش‌بینی مسیر حرکت آن به‌منظور مدیریت منابع، حیات وحش و شیلات به لحاظ پایش و کنترل محیط زیست دریایی بسیار مؤثر است. با توجه به ضرورت اقدام سریع جهت شناسایی محل و برآورد میزان آلودگی نفتی، استفاده از روش‌های سنتی مبنی بر مطالعه میدانی که با استفاده از پروازهای اکتشافی و گزارش کشتی‌های عبوری است، علاوه بر زمان‌بر بودن، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در مقابل روش‌های سنتی مبتنی بر مطالعات میدانی، استفاده از علم سنجش از دور به‌منظور منشأیابی آلاینده‌ها بخصوص لکه‌های نفتی و پایش آلودگی حاصل از آن، بسیار کارآمد خواهد بود. در سنجش از دور بازتاب امواج الکترومغناطیسی، پس از برخورد با پدیده‌های مختلف زمین، به‌وسیله سنجنده‌هایی که بر روی سکوها یا مختلف تعبیه شده‌اند ثبت و سپس مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند، بنابراین ضروری است که خصوصیات بازتابش پدیده‌های عمده زمین شناخته شود (Fingas and Brown 2017; Alpers et al. 2017). با استفاده از فن‌های سنجش از دور مدرن می‌توان آلودگی نفتی دریا را به‌صورت ۲۴ hr پایش نمود. داده‌های ماهواره‌ای به‌واسطه عددی بودن، به هنگام بودن، توان تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتری، پوشش مناسب و قابلیت تکرار آن‌ها، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز مطالعات را فراهم و امکان برقراری نگاه یکپارچه (مکانی و زمانی) به آن را ممکن می‌سازند. با استفاده از شاخص‌های مختلف و انجام آنالیزهای مربوطه، تعیین لایه‌های آلودگی امکان‌پذیر و قابل مدیریت است.

¹Optimum index factor

²Normalized difference water index

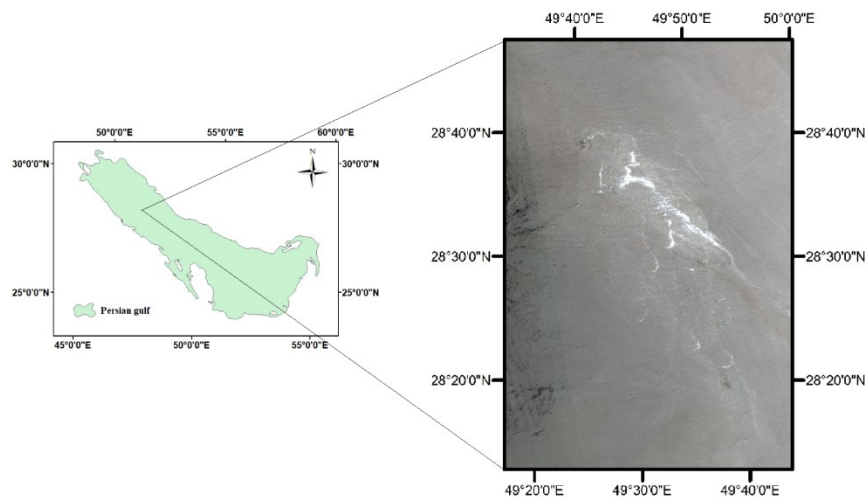
است و سواحل آن معادن سرشار نفت و گاز دارد و مسیر انتقال نفت کشورهایی چون کویت، عربستان و امارت متحده عربی است، به همین دلیل منطقه‌ای مهم و راهبردی به شمار می‌آید، بندرهای مهمی در حاشیه خلیج فارس وجود دارد که از آن‌ها می‌توان بندرعباس، بوشهر، شارجه، ابوظبی و دومی را نام برد (Javanbakht 2021). نمونه‌ای از لکه نفتی در شکل (۱) نمایش داده شده است که در نزدیکی سکوی نفتی فروزان واقع در منطقه خلیج فارس است.

فرآیند تغییر و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لکه نفتی دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس در بین 30° و 24° عرض شمالی و 50° و 48° طول شرقی واقع و حدود آن از شمال و شمال شرقی به سواحل ایران، از شرق به خلیج عمان، از جنوب و غرب به شبه جزیره عربستان محدود است. خلیج فارس توسط تنگه هرمز به دریای عمان و از طریق آن به دریاهای آزاد مرتبط



شکل ۱- تصویر اخذ شده به وسیله ماهواره سنتینل ۲ از محدوده لکه نفتی در خلیج فارس

Fig. 1 Image taken by Sentinel2 satellite from the oil slick area in the Persian Gulf

۲-۲- روش پژوهش

هر ماده یا پدیده موجود در صحنه تصویر به دلیل داشتن ترکیب و ساختار مولکولی مخصوص به خود، اثر طیفی منحصر به فردی از خود نشان می‌دهد. بر همین اساس می‌توان پدیده‌های مختلف را در سنجش از دور، آشکار و از هم متمایز نمود. با استفاده از امضای طیفی هر پدیده می‌توان به رفتار طیفی آن و در نهایت به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن پدیده پی برد (Bigdeli and Samadzadegan 2015). وجود یک لایه نفت خام شناور بر روی سطح آب، میزان انعکاس، انتقال و ویژگی‌های برگشتی امواج الکترومغناطیسی را در بخش‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و حرارتی و ماکروویو تغییر می‌دهد. از این تغییرات می‌توان جهت شناسایی و ارزیابی لکه‌های نفتی از نظر ضخامت و... استفاده کرد. همان‌طور که گفته شد ضخامت متفاوت لکه‌های نفتی

داده‌های مورد استفاده در پژوهش پیش رو، تصویر اخذ شده توسط ماهواره سنتینل ۲ در تاریخ ۲۰۲۰/۰۷/۰۶ از محدوده مورد مطالعه است. ماهواره سنتینل ۲ جهت فراهم آوردن تصاویر اپتیک با قدرت تفکیک مکانی بالا برای پایش زمین، مدیریت بحران و دستگاه‌های هشدار دهنده، تهیه نقشه‌های پوششی و کمک‌های بشردوستانه و غیره در سال ۲۰۱۵ توسط سازمان فضای اروپا به فضا پرتاب شده است. سنجنده تصویربرداری نصب شده بر روی این ماهواره (سنجنده MSI) در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی فعال می‌باشد. این سنجنده دارای ۱۳ باند تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی ۱۰m (باندهای Blue, Vegetation Red Edge, ۲۰m, (Green, Red, NIR, SWIR – Cirrus, Water) ۶۰m و (Narrow NIR, SWIR vapour, Coastal aerosol) و عرض تصویربرداری ۲۸۵ Km است (Sentinel-2 2018).

شاخص‌های طیفی حاصل یک محاسبه ریاضی بین دو یا چند باند طیفی می‌باشند که به واسطه آن پدیده مورد نظر بارزتر می‌شود. جهت کاهش عوامل ناخواسته و افزایش اطلاعات مربوط به آب و پدیده‌های موجود در آن می‌توان حداقل دو باند را ترکیب کرده و شاخص مرکبی ایجاد کرد (Mir Alizadehfard and Mansouri 2019).

معمولاً روش‌هایی که جهت بارز سازی لکه‌های نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، جهت تشخیص ضخامت و دسته‌بندی لکه‌های نفتی بر اساس کد، ضعیف هستند. از آنجاکه طیف لکه‌های نفت تحت تأثیر آب دریا و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت قرار می‌گیرند، در این پژوهش سعی بر آن است که با استفاده از شاخص‌های طیفی هیدروکربن‌ها و آب دریا ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی بررسی و از هم متمایز شوند. بدین منظور در جدول (۲) نمونه‌ای از شاخص‌هایی طیفی هیدروکربن‌ها و آب دریا ارائه شد که در ادامه شرح داده می‌شود.

شاخص سبزی‌نگی (FI) و شاخص چرخش جذب (RAI)^۲ مشخصات فلورسانس لکه‌های نفت را نشان می‌دهند. این دو شاخص مناسب تشخیص و تفکیک لکه‌های نفت با ضخامت کم هستند. در این دو شاخص از باندهای محدوده طیفی ۴۰۰،۶۰۰ و ۸۰۰ nm استفاده می‌شود. پاسخ طیفی در محدوده لکه نفتی، یک ویژگی جذب در ۱۶۰۰ nm و ۱۸۰۰ nm را نشان می‌دهد؛ که ناشی از جذب بیش از حد پیوندهای کربن-هیدروژن است و می‌تواند برای شناسایی لکه‌های نفت استفاده شود. با استفاده از این ویژگی، شاخصی جهت شناسایی مواد حاوی هیدروکربن ارائه شد. شاخص هیدروکربنی (HI)^۳ از خط عمود BB' برای بررسی وقوع نفت یا سایر هیدروکربن در پیکسل استفاده می‌کند. بر همین اساس هرچه HI یا همان خط عمود BB' بزرگ‌تر باشد، غلظت هیدروکربن بیشتر است (شکل ۲). اگر در پیکسل هیچ نوع هیدروکربنی وجود نداشت، نقاط ABC در امتداد یک خط صاف قرار خواهند گرفت و در صورت وجود هیدروکربن تشکیل مثلث خواهند داد. نقطه B در محدوده طیفی ۱۷۳۰ nm و نقاط A, C در دو طرف آن انتخاب می‌شود (Kühn et al. 2004).

موجود در سطح دریا، ویژگی‌های بصری و به تبع آن ویژگی‌های طیفی متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

در سال ۲۰۰۴ توافق‌نامه‌ای به منظور دسته‌بندی لکه‌های نفتی از نظر ظاهر و ضخامت تصویب شد که طبق آن ضخامت نفت از عدد ۱-۵ کدگذاری شده است (جدول ۱)؛ کدگذاری شامل درخشان (نقره‌ای/خاکستری)، رنگین کمان، فلزی، رنگ نفت ناپیوسته و رنگ نفت واقعی پیوسته است (Carpenter 2004).

جدول ۱- کدگذاری لایه نفتی بر اساس ضخامت

Table 1 Coding of oil layer based on thickness

Bonn Agreement Oil Appearance Code	Code	Thickness
Sheen	1	Thinner
Rainbow	2	
Metalic	3	
Discontinuous true oil color	4	
Continuous true oil color	5	
Emulsion	No code	Thicker

نفت خام ریخته شده بر روی سطح دریا به سرعت پخش شده و لایه‌های متفاوتی ایجاد می‌کند. به لایه‌های نازک درخشان^۱ گفته می‌شود. لکه‌هایی با ضخامت حدود ۵ μm در تصاویر به رنگ‌های نقره‌ای و رنگین کمان نمایان می‌شوند (Zhao et al. 2018). با توجه به اینکه لکه‌های نفتی با ضخامت نازک به سرعت تبخیر می‌شوند، مشاهده و تشخیص بخش‌های نقره‌ای، رنگین کمان و فلزی در تصاویری که چند هفته پس از حادثه نشن نفت اخذ شده‌اند، دشوار است؛ بنابراین معمولاً بخش‌های نقره‌ای رنگین کمان و فلزی را در یک گروه قرار می‌دهند. ضخامت امولسیون‌ها از لکه‌های نفت واقعی بیش‌تر است، اما توصیف دقیق ضخامت امولسیون دشوار است. امولسیون‌ها در تصاویر هوایی به رنگ نارنجی، قهوه‌ای و یا قرمز ظاهر می‌شوند. از آنجاکه ضخامت امولسیون‌ها از ۵۰۰ μm بیش‌تر است بازتاب زیادی در باندهای مادون قرمز دارند.

۲-۲-۱- جداسازی بخش‌های مختلف لکه نفتی

جهت بارز سازی و جداسازی لکه‌های نفتی از سطح دریا می‌توان از شاخص‌های طیفی مانند NDWI و استفاده کرد.

² Fluorescence Index

³ Rotation-Absorption Index

⁴ Hydrocarbon Index

¹ Sheens

جدول ۲- شاخص‌های طیفی هیدروکربن‌ها و آب دریا

Table 2 Spectral indexes of hydrocarbons and seawater

Group	Spectral index	Reference
Hydrocarbons	Fluorescence Index (FI)	Loos et al. (2012)
Hydrocarbons	Rotation-Absorption Index (RAI)	Loos et al. (2012)
Hydrocarbons	Hydrocarbon Index (HI)	Kühn et al. (2004)
Hydrocarbons	Reflectance of Green (RG)	Sun (2013)
Hydrocarbons	Reflectance of Red (RR)	Sun (2013)
Seawater	Water Absorption Feature (WAF)	Salas et al. (2017)
Seawater	Chlorophyll (CHL)	Hu et al. (2012)
Seawater	Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)	Momeni Esfahani and Amini (2021)

محلول رنگ (CDOM) از اجزای مهم آب دریا هستند. می‌توان از این دو ویژگی جهت تشخیص لکه‌های نفتی با استفاده از شاخص‌های طیفی آب دریا استفاده کرد. اگرچه مدل‌های ارزیابی غلظت CHL و CDOM تجربی هستند، ولی می‌توان از آن‌ها جهت بررسی و ارزیابی کیفی غلظت ترکیب آب دریا استفاده نمود.

۲-۲-۲- ارزیابی شاخص‌های طیفی

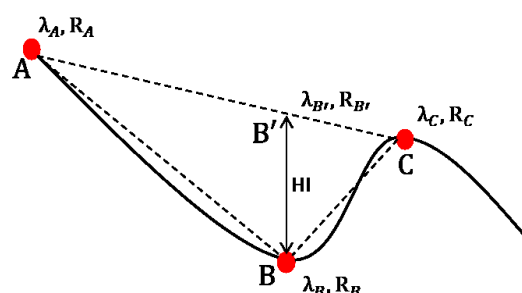
شاخص‌های طیفی مختلف ممکن است توانایی‌های مختلفی برای شناسایی و تفکیک ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی داشته باشند. به‌عنوان مثال شاخص‌های طیفی هیدروکربن‌ها ممکن است برای لکه‌های ضخیم‌تر نفت حساسیت بیشتری داشته باشند و نتوانند تمایز بین لکه‌های براق و آب دریا را تشخیص دهند. بدین منظور جهت ارزیابی کمی شاخص‌های طیفی از مدل ریاضی شاخص تفکیک‌پذیری^۱ (IS) که بر مبنای فاصله بین کلاسی است، استفاده شد (رابطه‌های ۱ و ۲). IS بزرگ‌تر نشان‌دهنده توانایی بیشتر شاخص در شناسایی ضخامت لکه‌های نفت است (Mthembu and Marwala 2008).

$$IS_{i,j}^I = \frac{\min ID_{i,j}^I}{Avg ID^I} \quad (1)$$

$$Avg ID^I = \frac{\max(\max ID_{i,j}^I)}{4} \quad (2)$$

⁵ Colored Dissolved Organic Matter

⁶ Index Separability



شکل ۲- شماتیکی از شاخص HI

Fig. 2 Schematic of the HI index

سیگنال‌های طیفی در باندهای سبز و قرمز به ضخامت لایه‌های نفت وابسته هستند، بنابراین، در این پژوهش از شاخص‌های انعکاس رنگ سبز (RG) و انعکاس رنگ قرمز (RR) برای بررسی خصوصیات طیفی لایه‌های نفت باندهای سبز و قرمز استفاده شد. علاوه بر مواد هیدروکربنی، آب دریا بر روی طیف لکه‌های نفت تأثیرگذار است؛ بنابراین در پژوهش پیش رو از شاخص‌های طیفی آب به‌منظور شناسایی و تفکیک لکه‌های نفت استفاده شد. در شاخص ویژگی جذب آب (WAF) از ویژگی باندهای جذب آب (به‌عنوان مثال ۱۱۴۰ nm) استفاده می‌شود.

مدل‌های ارزیابی کلروفیل و مواد آلی محلول رنگی در این تحقیق نقش اساسی دارند زیرا کلروفیل (CHL) و مواد آلی

¹ Reflectance of Green

² Reflectance of Red

³ Water Absorption Feature

⁴ Chlorophyll

استفاده شد. برای ارزیابی کمی شاخص‌های طیفی از پارامتر IS استفاده گردید که توانایی شاخص‌ها را در متمایز کردن لکه‌های نفتی نشان می‌دهد. مقادیر IS محاسبه شده از طریق نمونه‌های آموزشی، در ماتریس زیر نمایش داده شده است. IS بزرگ‌تر نشان‌دهنده توانایی بیشتر شاخص در شناسایی ضخامت لکه‌های نفت است.

ردیف‌ها و ستون‌های ماتریس جدول (۳) مربوط به آب دریا و ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی است. نتایج نشان می‌دهد که در میان شاخص‌های مورد ارزیابی، شاخص HI نسبت به دیگر شاخص‌ها دارای مقادیر کمتر IS است. از دلایل آن می‌توان به مواردی همچون: تأثیر زیاد آب دریا و حجم لکه نفتی بر روی شاخص HI اشاره کرد. شاخص HI بر اساس ویژگی جذب ماده هیدروکربن محاسبه می‌شود که متکی به حجم لکه نفتی است. شاخص HI برای لکه‌های نفتی با کد پنج نتایج بهتری نسبت به کدهای چهار و درخشان نشان داد، زیرا حاوی مقدار زیادی نفت هستند و همچنین به دلیل سرعت پایین انتقال نور به‌ندرت تحت تأثیر آب دریا قرار می‌گیرند. مقادیر IS برای شاخص‌های FI، RR و CDOM جهت تشخیص و تمایز امولسیون با دیگر بخش‌های مورد ارزیابی (آب دریا، بخش درخشان، کد چهار و پنج)، نسبت به دیگر شاخص‌ها دارای مقادیر بالاتری بوده که نشان‌دهنده توانایی بالای این شاخص‌ها جهت تشخیص و تمایز امولسیون از آب دریا و سایر بخش‌ها است. به‌طور کلی مقادیر IS برای شاخص‌های FI، RR و CDOM بزرگ‌تر از صفر است، به این معنی که این شاخص‌ها توانایی تشخیص آب دریا را از مناطق آلوده به نفت را دارند. در صورتی که شاخص‌های دیگر مقادیر بسیار نزدیک به صفر را به خود اختصاص داده‌اند. از شکل (۳) جهت پیاده‌سازی و تأیید توانایی شاخص‌های FI، RR و CDOM به‌منظور تفکیک بخش امولسیون از محدودهای درخشان و آب دریا استفاده شد.

که، I شامل شاخص‌های طیفی (FI، RAI، CDOM) و J مربوط به عناصر (آب دریا، کد یک تا سه، کد چهار، کد پنج و امولسیون) است. شاخص IS به‌صورت ماتریس نمایش داده می‌شود. ماتریس متقارن است و عناصر مورب ماتریس همه صفر می‌باشند. اگر عناصر غیر مورب بزرگ‌تر از عدد صفر باشند، به این معنی است که شاخص طیفی توانایی تشخیص بالاتری دارد.

جهت پیاده‌سازی این روش‌ها و ارزیابی کمی آن‌ها به‌منظور قابلیت تشخیص ضخامت‌های مختلف یک لکه نفتی، ابتدا پیکسل‌هایی به‌عنوان نمونه آموزشی از بخش‌های مختلف تصویر جمع‌آوری شده که شامل: کد یک (آب دریا)، کد دو (بخش درخشان لکه نفتی)، کد سه (بخش ضخیم لکه نفتی)، کد چهار (رنگ نفت واقعی ناپیوسته)، کد پنج (رنگ نفت واقعی پیوسته) و بخش امولسیون، است. نمونه‌های آموزشی انتخاب شده از آب دریا و ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی بر اساس رفتارهای طیفی متفاوت آن‌ها بوده که در بخش‌های قبل به آن اشاره شده است. در ادامه بعد از پیاده‌سازی شاخص‌های طیفی، به‌منظور دسته‌بندی آب دریا و ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی از روش خوشه‌بندی k-means با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک استفاده شد. در پروسه خوشه‌بندی آگاهی از تعداد کلاس‌ها یک امر ضروری است. از این‌رو جهت خوشه‌بندی اتوماتیک از فن پیاده‌سازی شده توسط (Das et al. (2007) با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. در این فن هر کروموزوم از دو بخش حد آستانه فعال‌سازی و مرکز خوشه‌ها تشکیل شده است، حد آستانه فعال‌سازی بیانگر فعال یا غیرفعال بودن هر کدام از مراکز خوشه‌ها با توجه به حد آستانه تعیین شده برای آن‌ها است.

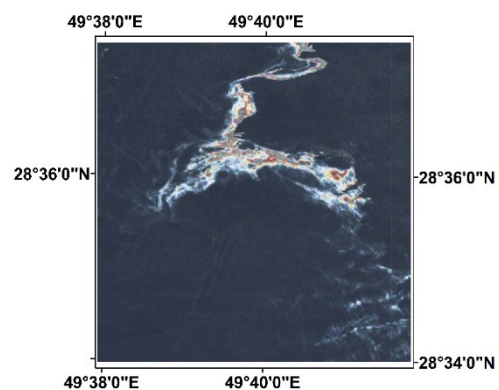
۳- یافته‌ها و بحث

در پژوهش پیش رو سعی بر آن است که با استفاده از شاخص‌های طیفی هیدروکربن‌ها و آب دریا ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی بررسی و از هم متمایز شوند. بدین منظور از شاخص‌های طیفی که در جدول (۲) ارائه شده است،

جدول ۳- ارزیابی شاخص‌های طیفی با استفاده از پارامتر IS
Table 3 Evaluation of spectral index using IS parameter

Index	IS Matrixes					
	Seawater	Sheens	Code 4	Code 5	Emulsions	
Fluorescence Index	Seawater	0	0.232	1.153	1.102	1.542
	Sheens	0.232	0	0.4124	0.421	0.967
	Code 4	1.153	0.4124	0	0	0.423
	Code 5	1.102	0.421	0	0	0.4236
	Emulsions	1.542	0.967	0.423	0.4236	0
Rotation-Absorption Index	Seawater	0	0.015	0.103	0.096	0.153
	Sheens	0.015	0	0.0953	0.051	0.197
	Code 4	0.103	0.0953	0	0	0.107
	Code 5	0.096	0.051	0	0	0.117
	Emulsions	0.153	0.197	0.107	0.117	0
Hydrocarbon Index	Seawater	0	0.032	0.015	1.131	0.023
	Sheens	0.032	0	0.067	0.064	1.467
	Code 4	0.015	0.067	0	0	1.403
	Code 5	1.131	0.064	0	0	0.047
	Emulsions	0.023	1.467	1.403	0.047	0
Reflectance of Green	Seawater	0	2.202	3.004	0.012	1.53
	Sheens	2.202	0	0.01	2.367	0.04
	Code 4	3.004	0.01	0	2.536	0.012
	Code 5	0.012	2.367	2.536	0	1.0136
	Emulsions	1.53	0.04	0.012	1.0136	0
Reflectance of Red	Seawater	0	0.1546	0.478	0.193	1.004
	Sheens	0.1546	0	0.3412	0.095	0.726
	Code 4	0.478	0.3412	0	0.215	0.467
	Code 5	0.193	0.095	0.215	0	0.711
	Emulsions	1.004	0.726	0.467	0.711	0
Water Absorption Feature	Seawater	0	0.021	0.01	2.01	0.63
	Sheens	0.021	0	0.071	1.612	0.197
	Code 4	0.01	0.071	0	0.263	0.536
	Code 5	2.01	1.612	0.263	0	0.0309
	Emulsions	0.63	0.197	0.536	0.0309	0
Chlorophyll	Seawater	0	0.715	0.831	0.549	0.697
	Sheens	0.715	0	0.1278	0.1209	0.057
	Code 4	0.831	0.1278	0	0.283	0.047
	Code 5	0.549	0.1209	0.283	0	0.207
	Emulsions	0.697	0.057	0.047	0.207	0
Colored Dissolved	Seawater	0	0.01	0.109	0.197	0.416
	Sheens	0.01	0	0.072	0.984	0.321
	Code 4	0.109	0.072	0	0.045	0.261
	Code 5	0.197	0.984	0.045	0	0.271
	Emulsions	0.416	0.321	0.261	0.271	0

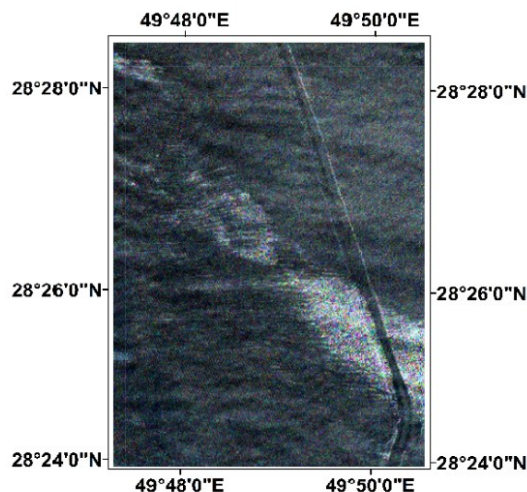
نتایج حاصل از شاخص‌های FI، RR و CDOM، بعد از انجام کلاسه‌بندی پیکسل‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. در نتایج شناسایی، شاخص FI نسبت به دو شاخص دیگر عملکرد بهتری را نشان داد. بدین صورت که محدوده‌های مربوط به امولسیون به‌طور دقیق به‌وسیله FI استخراج شد. در صورتی که در خروجی شاخص‌های CDOM و RR بعضی از پیکسل‌ها به اشتباه در کلاسه‌های امولسیون و درخشان قرار گرفته‌اند.



شکل ۳- نمونه تصویر از محدوده امولسیون، درخشان و آب دریا
Fig. 3 Sample image of emulsion range, Sheen and seawater

تشخیص دهد. شاخص CDOM برای ارزیابی ترکیبات آب دریا پیشنهاد شده است. آب دریا تمیز و آب دریای آلوده به نفت باید مقادیر مختلف CDOM داشته باشد. CDOM از باندهای سبز و قرمز برای ایجاد یک مدل نمایی استفاده می کند. با این حال، در نتایج، CDOM نشان می دهد که این روش نمایی توانایی بالایی جهت تشخیص امولسیون ها ندارد. تعداد زیادی از براق ها به عنوان امولسیون اشتباه شناسایی شدند و بنابراین CDOM به طور مؤثری نمی تواند بخش امولسیون را تشخیص دهد. جهت رسیدگی به حوادث نشت نفت، تعیین محدوده آلوده به نفت از موارد مهم و حیاتی است هدف اصلی تشخیص دقیق بین آب دریا با محل هایی با حداقل آلودگی است (لکه های براق). باید توجه داشت که معمولاً طیف لکه های براق مشابه با طیف آب دریا هستند.

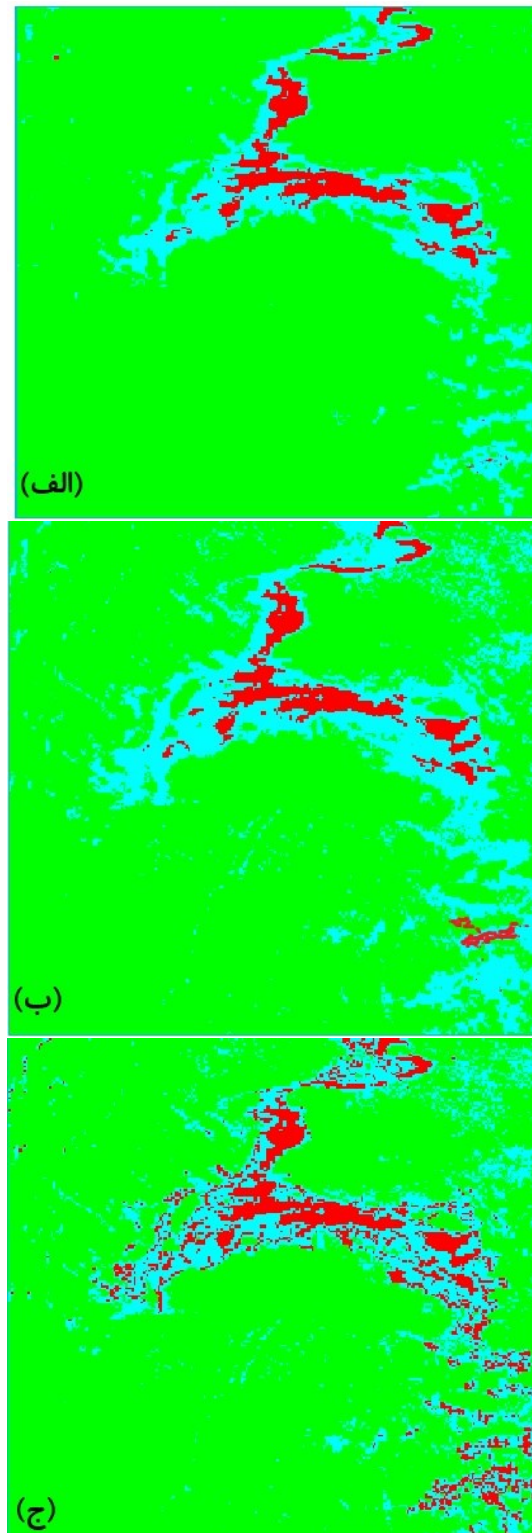
بر اساس نتایج ارزیابی ارائه شده در جدول (۳)، از شکل (۵) جهت تأیید توانایی شاخص های FI، RR و CHL به منظور تمایز آب دریا و لکه نفتی براق استفاده شد. در بین این شاخص ها، CHL بهترین تمایز را بین آب دریا و لکه نفتی براق نشان داد که خروجی در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل ۵ - نمونه تصویر از محدوده درخشان و آب دریا

Fig. 5 Sample image of Sheen range and seawater

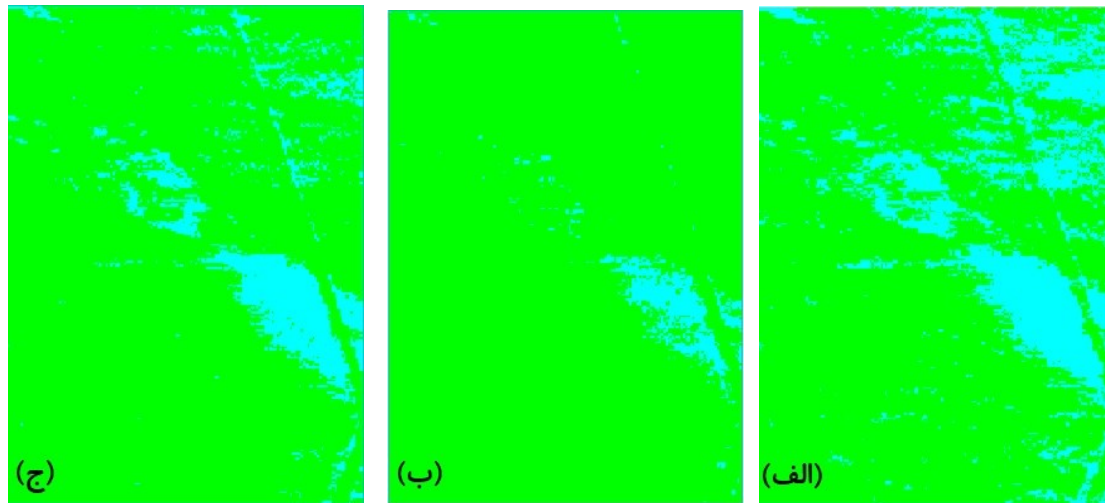
در ماتریس IS برای شاخص RR، مقدار IS بین ۵ و ۰/۰۹۵ است که عددی نزدیک به صفر هست و این بدان معنا است که این شاخص نمی تواند به طور قابل اعتماد بین بخش های کد ۵ و درخشان تفاوت قائل شود و آن ها را از یکدیگر متمایز نماید.



شکل ۴- خروجی شاخص های FI (الف)، RR (ب) و (ج) CDOM بعد کلاس بندی (آب دریا، امولسیون و درخشان)

Fig. 4 Output of (a) FI, (b) RR and (c) CDOM indxs after classification

از آنجایی که شاخص FI توانایی تشخیص ویژگی های طیفی فلورسانس نفت را دارد، لذا به راحتی می تواند امولسیون ها را



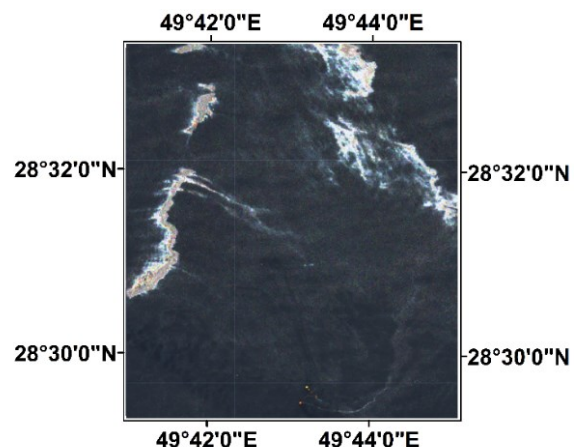
شکل ۶- خروجی شاخص‌های (الف) FI، (ب) RR و (ج) CHL بعد از کلاس‌بندی ((آب دریا و درختان)

Fig. 6 Output of (a) FI, (b) RR and (c) CHL indexs after classification

۰/۷۱۱ و مقادیر IS برای شاخص WAF جهت تشخیص و تمایز امولسیون و دیگر بخش‌های مورد ارزیابی برابر است با ۰/۶۳، ۰/۱۹۷، ۰/۵۳۶ و ۰/۰۳۰۹، بنابراین اگر شاخص RR و WAF برای شناسایی امولسیون‌ها ترکیب شوند، خروجی به صورت ۱/۰۰۴، ۰/۷۲۶، ۰/۵۳۶، ۰/۷۱۱ خواهد بود که باعث بهبود دقت می‌شود. با تجزیه و تحلیل ماتریس IS می‌توان نمونه‌هایی از این شاخص‌ها که مکمل یکدیگر هستند را یافت و از آن‌ها جهت بهبود دقت استفاده نمود. نمونه‌ای از ترکیب شاخص‌ها در شکل (۸) نمایش داده شده است که به طور قابل توجهی بهتر از شاخص RR عمل کرده است.

به طور کلی شاخص‌های طیفی هیدروکربن مورد مطالعه توانایی بالایی جهت شناسایی و تمایز امولسیون‌ها و لکه‌های نفتی با کد پنج از بخش درختان یا آب دریا را نشان دادند. لکه‌های نفتی ضخیم‌تر حاوی هیدروکربن‌های بسیار بیشتری هستند و لذا خواص بصری و فیزیکی کاملاً متفاوتی با بخش درختان دارند؛ بنابراین، امولسیون‌ها و لکه‌های نفتی با کد پنج تفاوت طیفی آشکاری را در باندهای سبز، قرمز و مادون قرمز نشان می‌دهند. شاخص‌های طیفی آب دریا مورد استفاده در این پژوهش شامل WAF، CHL و CDOM می‌باشد. جهت محاسبه شاخص CHL از باندهای مرئی (آبی، سبز، قرمز) استفاده شد که معمولاً آب دریا و لکه‌های نفتی تفاوت آشکاری در این باندها ندارند. با توجه به ماتریس IS، شاخص CDOM برای تشخیص و تمایز امولسیون‌ها مناسب‌تر به نظر می‌رسند. با این حال، در نتایج ارائه شده، توانایی شاخص CDOM برای تشخیص امولسیون‌ها ضعیف-

ماتریس IS ارائه شده برای شاخص RR، نشان داد که توانایی بالایی جهت تشخیص و تمایز ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی دارد. از شکل (۷) جهت تأیید عملکرد این شاخص استفاده شده. این تصویر شامل بخش آب دریا - براق‌ها، بخش ضخیم لکه نفتی بارنگ واقعی و امولسیون است.



شکل ۷- نمونه تصویر اخذ شده توسط ماهواره سنتینل ۲ از بخش‌های متفاوت لکه نفتی

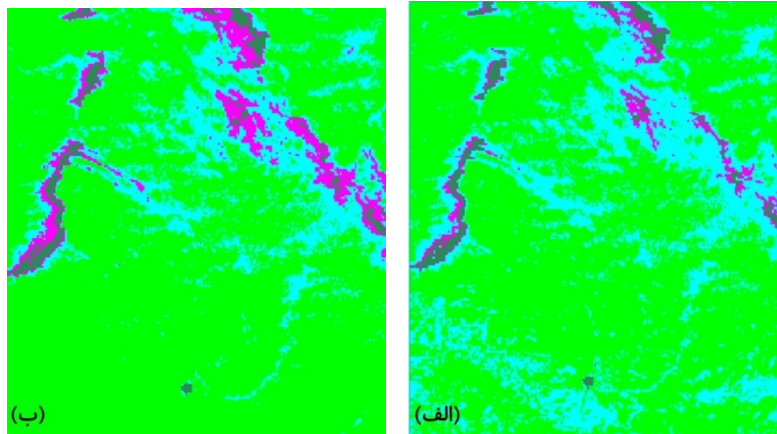
Fig. 7 Sample image taken by the Sentinel 2 satellite from different parts of the oil slick

همان‌طور که در ماتریس IS مشخص است، شاخص‌های طیفی مورد مطالعه (هیدروکربن‌ها و آب دریا) ممکن است نوعی مکمل هم باشند. بدین منظور می‌توان جهت بهبود دقت در متمایز نمودن ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی از روش‌های تلفیق داده استفاده کرد. به عنوان مثال، مقادیر IS برای شاخص RR جهت تشخیص و تمایز امولسیون و دیگر بخش‌های مورد ارزیابی (آب دریا، بخش درختان، کد ۴ و کد ۵) به ترتیب برابر است با ۱/۰۰۴، ۰/۷۲۶، ۰/۴۶۷،

ترکیبات نفتی تعیین می‌شوند. با این حال، لکه‌های نفتی به‌طور اجتناب‌ناپذیری تحت تأثیر محیط دریا از طریق فرآیندهای هوازدگی و عبور نور از لکه‌های نفتی شناور قرار می‌گیرند. برای لکه‌های نفتی ضخیم‌تر که حاوی مقدار زیادی نفت هستند و ضریب عبور نور کمی دارند، هیدروکربن‌ها تا حد زیادی بر منحنی‌های طیفی تأثیر می‌گذارند. اگر لکه‌های نفتی حاوی نفت کمی باشند و ضریب عبور نور بالایی داشته باشند، منحنی‌های طیفی لکه‌های نفتی بیشتر شبیه آب دریا خواهد بود. با این حال، نتایج ارزیابی و شناسایی نشان می‌دهد که ترکیب شاخص‌های طیفی می‌تواند لکه‌های نفتی با ضخامت‌های مختلف را با دقت شناسایی کند. با توجه به مشخص بودن ویژگی‌های بصری و شکلی لکه‌های نفتی مانند بخش‌های درخشان یا امولسیون، صحت پژوهش را می‌توان با تفسیر بصری ارزیابی کرد (Zhao et al. 2018; Alam and Sidike 2012; Svejksky et al. 2016).

تراز شاخص‌های طیفی هیدروکربن‌ها است. باندهای استفاده شده توسط شاخص WAF تفاوت‌های جزئی بین آب دریا، بخش درخشان، لکه‌های نفتی با کد چهار و کد پنج را نشان می‌دهند، اما آنها توانایی بالایی در شناسایی امولسیون‌ها از خود ارائه می‌دهند. شاخص CHL با یک مدل رگرسیون، با استفاده از باندهای آبی تا قرمز برای ارزیابی غلظت کلروفیل محاسبه می‌شود. این شاخص به تغییرات طیفی کوچک در آب دریا حساس است. عناصر ماتریس IS، نشان‌دهنده جدایی‌پذیری قوی این شاخص برای بخش درخشان و آب دریا است. در مقایسه با شاخص‌های طیفی هیدروکربن این شاخص برای تشخیص بخش درخشان مناسب‌تر است.

نتایج ارائه شده در پژوهش، مکمل بودن شاخص‌های طیفی آب دریا و هیدروکربن را تأیید می‌کند که با استفاده از روش‌های تلفیق‌داده می‌توان به دقت بهتری دست پیدا کرد. مکمل بودن این شاخص‌ها مربوط به دو بخش محیط دریا و ترکیبات نفتی می‌باشد. منحنی طیفی لکه‌های نفتی توسط



شکل ۸- الف): خروجی شاخص RR بعد از کلاسه‌بندی، و ب) خروجی تلفیق شاخص‌های RR و WAF (آب دریا، امولسیون، درخشان، و بخش ضخیم)

Fig. 8: a) RR index output after classification, and b) Combined output of RR and WAF indice

۴- نتیجه‌گیری

۳- با توجه به نتایج ارائه‌شده، شاخص‌های طیفی آب دریا (WAF, CHL, CDOM) جهت تشخیص بخش‌های نازک‌تر لکه نفتی مناسب می‌باشند.

۴- شاخص‌های طیفی مورد مطالعه (هیدروکربن‌ها و آب دریا) ممکن است مکمل یکدیگر باشند. بدین منظور می‌توان جهت بهبود دقت در متمایز نمودن ضخامت‌های مختلف لکه‌های نفتی از روش‌های تلفیق داده استفاده کرد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده (تولیدشده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه‌شده است.

۱- شاخص‌های طیفی هیدروکربن مانند شاخص FI به دلیل بالا بودن مقادیر پارامتر IS نسبت به شاخص‌های طیفی آب دریا، جهت تشخیص و تمایز امولسیون از آب دریا و سایر بخش‌های لکه نفتی مناسب‌تر می‌باشند.

۲- بعد از پیاده‌سازی شاخص‌های FI, RR, CHL به‌منظور تمایز آب دریا و بخش نازک لکه نفتی (بخش براق) مشخص شد که در بین این شاخص‌ها، CHL بهترین تمایز را ایجاد کرده است.

References

- Alam, M. S., & Sidike, P. (2012). Trends in oil spill detection via hyperspectral imaging. In Proceedings of the 7th Electrical & Computer Engineering (ICECE), Dhaka, Bangladesh., 20–22.
- Al Ruzouq, R., Gibril, M. B. A., Shanableh, A., Kais, A., Hamed, O., Al-Mansoori, S., & Khalil, M. A. (2020). Sensors, features, and machine learning for oil spill detection and monitoring: a review. *Remote Sens.*, 12, 3338. DOI: [10.3390/rs12203338](https://doi.org/10.3390/rs12203338)
- Alpers, W., Holt, B., & Zeng, K. (2017). Remote sensing of environment oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls. *Remote Sens. Environ.*, 201, 133–147. DOI: [10.1016/j.rse.2017.09.002](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.002)
- Aghajanloo, K., Mohammadi, M., Yadegar Azadi, M., & Ghatei, F. (2022). Vulnerability assessment of the northern coasts of the Persian Gulf to oil spills. *Environ. Water Eng.*, 8(1), 47-62 [In Persian]. DOI: [10.22034/jewe.2021.273904.1524](https://doi.org/10.22034/jewe.2021.273904.1524)
- Bigdeli, B., & Samadzadegan, F. (2015). Classification of hyperspectral data using a band grouping-based SVM ensemble system. *J. Geomath. Sci. Technol.*, 4(3), 253-286 [In Persian].
- Chehresa, S., Amirkhani, A., Rezairad, G., & Mosavi, M. (2016). Optimum features selection for oil spill detection in SAR Image. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 44, 775–787. DOI: [10.1007/s12524-016-0553-x](https://doi.org/10.1007/s12524-016-0553-x)
- Carpenter, A. (2007). The Bonn agreement aerial surveillance programme: trends in North Sea oil pollution 1986-2004. *Mar. Pollut. Bull.*, 54, 149-163. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2006.07.013](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.07.013)
- Darabinia, M., & Nagafi Asfadi, M. (2012). Performance of Kuwait regional convention on Persian Gulf marine environment. *J. Mazandaran Univ. Med. Sci.*, 22(96), 71-78 [In Persian].
- Das, S., Abraham, A., & Konar, A. (2007). Automatic clustering using an improved differential evolution algorithm. *IEEE Trans. Syst. Man cybernet. A: Syst. Human.*, 38(1), 218-237. DOI: [10.1109/TSMCA.2007.909595](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2007.909595)
- Fingas, M., & Brown, C. (2017). A review of oil spill remote sensing. *Sensor.*, 18, 91. DOI: [10.3390/s18010091](https://doi.org/10.3390/s18010091)
- Ghanavati, E., Shah Hosseini, M., & Marriner, N. (2021). Analysis of the makran coastline of Iran's vulnerability to global sea-level rise. *J. Mar. Sci. Eng.*, 9, 891. DOI: [10.3390/jmse9080891](https://doi.org/10.3390/jmse9080891)
- Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach three—Band reflectance difference. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 117. DOI: [10.1029/2011JC007395](https://doi.org/10.1029/2011JC007395)
- Johnsiz, A., & Pirmohammadi, S. (2021). The PGCC's security strategy towards Iran (2011-2018). *Fundament. Appl. Stud. Islam. World*, 2(4), 1-28 [In Persian].
- Javanbakht, M. (2021). plastic waste and oil pollution; two important environmental pollutants in the Persian Gulf. *J. Mar. Med.*, 2(4), 199-204. Doi: [10.30491/2.4.199](https://doi.org/10.30491/2.4.199)
- Kühn, F., Oppermann, K., & Hörig, B. (2004). Hydrocarbon index—an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *Int. J. Remote Sens.*, 25, 2467–2473. DOI: [10.1080/01431160310001642287](https://doi.org/10.1080/01431160310001642287)
- Loos, E., Brown, L., Borstad, G., Mudge, T., & Alvare, M. (2012). Characterization of oil slicks at sea using remote sensing techniques. In Proceedings of the OCEANS, Yeosu, Korea. DOI: [10.1109/OCEANS.2012.6405033](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2012.6405033)
- Mir Alizadehfard, S., & Mansouri, S. (2019). Evaluation of indicators of remote sensing measurement in quantitative and qualitative studies of surface water with Landsat-8 satellite images (Case study: South of Khuzestan province). *J. RS GIS Nat. Resour.*, 10(2), 63-84. [In Persian]. DOI: [20.1001.1.26767082.1398.10.2.5.4](https://doi.org/10.1001.1.26767082.1398.10.2.5.4)
- Momeni Esfahani, M. and Amini, A. (2021). Optimal band selection of landsat-8 images

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارد که هیچ‌گونه تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارد.



- for estimation of CDOM of lakes using support vector regression, Iran. *J. Remote Sens. GIS*, 13(1), 75-92 [In Persian]. DOI: [10.52547/gisj.13.1.75](https://doi.org/10.52547/gisj.13.1.75)
- Mthembu, L., & Marwala, T. (2008). A note on the separability index. arXiv: Methodology. DOI: [10.48550/arXiv.0812.1107](https://doi.org/10.48550/arXiv.0812.1107)
- Pourhaimi, S. A., Heidari, F., Heidari, M., & Hoshyari, S. (2015). The legal system for the protection of the environment of the Persian Gulf against pollution. The first comprehensive international conference on the environment, Tehran [In Persian].
- Salas, E. A. L. (2017). Vegetation water content prediction: towards more relevant explicatory waveband variables. Preprints.org., 2017010001 DOI: [10.20944/preprints201701.0001.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201701.0001.v1)
- Sun, P. (2013). Study of prediction models for oil thickness based on spectral curve. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 33, 1881-1885. DOI: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2013\)07-1881-05](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2013)07-1881-05)
- Sentinel-2. (2018). The Long Term Archive. (n.d.). Retrieved Jan 26, 2018. Available online at: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2>
- Svejkovsky, J., Hess, M., Muskat, J., Nedwed, T. J., McCall, J., & Garcia, O. (2016). Characterization of surface oil thickness distribution patterns observed during the deepwater horizon (MC-252) oil spill with aerial and satellite remote sensing. *Mar. Pollut. Bull.*, 110(1), 162-176. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2016.06.066](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.066)
- Talebpour, N., Safarrad, T., Akbarinasab, M. and Rasolian, M. (2018). Investigation of proper index of oil spill detection using Space-Borne Sentinel-2 (Case study: the Persian Gulf, 15 Feb 2016). *J. Oceanogra.*, 9(33), 31-40 [In Persian] DOI: [10.29252/joc.9.33.31](https://doi.org/10.29252/joc.9.33.31)
- Zhang, Y., Li, Y., Liang, X. S., & Tsou, J. (2017). Comparison of oil spill classifications using fully and compact polarimetric SAR images. *Appl. Sci.*, 7, 193. DOI: [10.3390/app7020193](https://doi.org/10.3390/app7020193)
- Zhao, D., Cheng, X., Zhang, H., Niu, Y., Qi, Y., & Zhang, H. (2018). Evaluation of the ability of spectral indices of hydrocarbons and seawater for identifying oil slicks utilizing hyperspectral images. *Remote Sens.*, 10, 421. DOI: [10.3390/rs10030421](https://doi.org/10.3390/rs10030421)

How to cite this paper:

Naderi, M., Afzalimehr, H., & Dehghan, A. (2022). Evaluation of spectral indices to detect the thickness of oil slicks using satellite images (Case study: Persian Gulf). *Environ. Water Eng.*, 9(3), 352-366. DOI: [10.22034/jewe.2022.332019.1735](https://doi.org/10.22034/jewe.2022.332019.1735)