



Investigation of smoke movement patterns from the Haur-Al-Azim wetland fire using a combination of MODIS imagery and the CALPUFF model

Fatemeh Mahamudi¹ | Hossein Madadi² | Hossein Moradi³ | Gholamreza Sabzghabaei⁴

1. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resource, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: fatemeh.ma96@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resource, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: hossein.madadi@gmail.com
3. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resource, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: hossein.moradi.env@gmail.com
4. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resource, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. E-mail: grsabz1@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 29 July 2023

Received in revised form 12

October 2023

Accepted 14 November 2023

Published online 27 January

2024

ABSTRACT

Haur-Al-Azim, an important ecosystem in the southwest of Iran, suffered numerous wildfires in 2018. This study aims to model the dispersal of smoke resulting from those wildfires. In order to achieve this, the emission rate of particulate matter was calculated utilizing MODIS products. The study made use of data from seven climate stations in Iran and Iraq, together with local ecological conditions and emission rates, to simulate 24-hour means of PM₁₀ through the use of the CALMET/CALPUFF package model. The study found that on September 9, 2018, the highest emission rate was measured at 0.0024 g/m²/s. This resulted in more than 42700 individuals being exposed to PM₁₀ concentrations that exceeded the standard. Integrating remote sensing data into an air pollution modeling system can be used as an identification method to assess air quality from a spatial and temporal perspective.

Keywords:*Air pollution,**Climate data,**Remote sensing.*

Cite this article: Mahamudi, F., Madadi, H., Moradi, H., & Sabzghabaei, Gh. (2024). Investigation of smoke movement patterns from the Haur-Al-Azim wetland fire using a combination of MODIS imagery and the CALPUFF model. *Journal of Natural Environment*, 76 (Special Issue), 197-212. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.362988.2583>





بررسی الگوهای حرکتی دود ناشی از آتش سوزی تالاب هورالعظیم با تلفیق تصاویر مودیس و مدل CALPUFF

فاطمه محمودی^۱ | حسین مددی^۲ | حسین مرادی^۳ | غلامرضا سبزقبایی^۴

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: fatemeh.ma96@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: hosein.madadi@gmail.com

۳. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: hossein.moradi.env@gmail.com

۴. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران. رایانامه: grsabz1@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تالاب هورالعظیم به عنوان یکی از اکوسیستم‌های ارزشمند زیستی در جنوب غربی ایران در سال ۱۳۹۷ با رخداد‌های آتش سوزی متعددی روبه‌رو بوده است. هدف تحقیق حاضر، مدل سازی پراکنش دود ناشی از این آتش سوزی‌ها بوده است. بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در بازه‌های زمانی وقوع رخداد‌های آتش سوزی، جهت برآورد نرخ انتشار ذرات معلق استفاده شد. سپس با استفاده از مدل CALPUFF از تلفیق داده‌های هواشناسی هفت ایستگاه سینوپتیک در دو کشور ایران و عراق، شرایط اکولوژیک منطقه و نرخ انتشار حاصل از سنجش از دور، مقدار متوسط غلظت ۲۴ ساعته ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون شبیه سازی شد. براساس نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار نرخ انتشار دود ناشی از آتش سوزی، با ۰/۰۰۲۴ گرم بر مترمربع در ثانیه، در روز ۱۸ شهریورماه برآورد شد. در این روز جمعیتی بالغ بر ۴۲۷۰۰ نفر در معرض غلظت‌های بالاتر از حد استاندارد ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون قرار داشتند. تلفیق داده‌های سنجش از دور با مدل‌های پراکنش آلودگی هوا می‌تواند رویکرد بسیار مناسبی در شناسایی گستره‌های مکانی و زمانی ارزیابی کیفیت هوا در رخداد‌های آتش سوزی طبیعی باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷	
کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، داده‌های هواشناسی، سنجش از دور.	

استناد: محمودی، فاطمه؛ مددی، حسین؛ مرادی، حسین؛ و سبزقبایی، غلامرضا (۱۴۰۲). بررسی الگوهای حرکتی دود ناشی از آتش سوزی تالاب هورالعظیم با تلفیق تصاویر مودیس و مدل CALPUFF. محیط زیست طبیعی، ۷۶ (ویژه نامه)، ۲۱۲-۱۹۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2023.362988.2583>



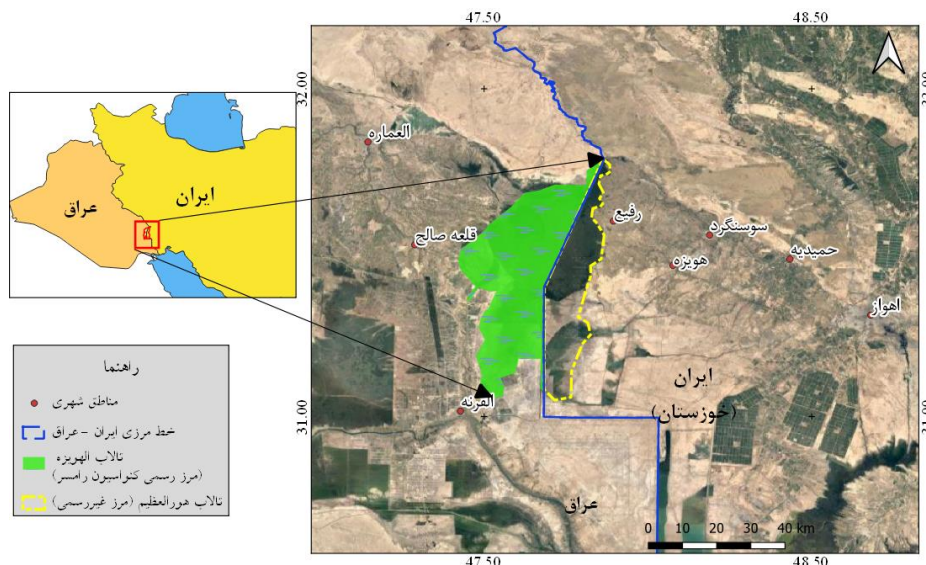
مقدمه

تالاب‌ها یکی از با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های کره زمین هستند که دارای کارکردهای مهم در سیمای سرزمین می‌باشند (William *et al.*, 2015). این ساختارهای طبیعی در حفاظت از آبزیان و حیات وحش، ذخیره و پاک‌سازی منابع آبی آلوده در پایاب رودخانه‌ها، تعدیل‌کننده رخدادهای خشکسالی و سیلاب، جلوگیری از پیشروی آب دریا، تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، تقویت شبکه غذایی و حفظ غنای گونه‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای دارند (Mitsch and Gosselink, 2007). تالاب‌ها با ایجاد زیستگاه‌های منحصربه‌فرد برای طیف وسیعی از گونه‌های گیاهی و جانوری، نقش اساسی در حفظ تنوع زیستی دارند (William *et al.*, 2015). تولیدات گیاهی تالاب، محرک کلیدی در پویایی اکوسیستم تالابی و ارائه خدمات اکوسیستمی است (Lumbierres *et al.*, 2017). با وجود خدمات ارزشمند محیط‌زیستی که تالاب‌ها ارائه می‌دهند، تولیدات گیاهی تالاب‌ها تحت عنوان زی‌توده گیاهی (Biomass)، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی در بروز بحران آتش‌سوزی در چنین اکوسیستم‌هایی به‌شمار می‌رود. آتش‌سوزی پدیده‌ای است که در سرتاسر جهان در اکوسیستم‌های طبیعی رخ می‌دهد. بر اثر این پدیده، انرژی ذخیره‌شده توسط گیاهان طی فرآیند فتوسنتز، آزاد می‌شود (Weise and Wright, 2014). تغییر در الگوهای دمایی و بارندگی بر اثر تغییر اقلیم منجر به افزایش تعداد و شدت آتش‌سوزی‌ها در طی چند دهه گذشته شده است (Westerling *et al.*, 2006). همچنین براساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده، تغییر اقلیم با ایجاد فصول خشک‌تر، گرم‌تر و طولانی‌تر منجر به ایجاد آتش‌سوزی‌های بیشتر و شدیدتر خواهد شد (Hauptman *et al.*, 2018; Mills *et al.*, 2020). از مهم‌ترین اثرات قابل مشاهده آتش‌سوزی‌های طبیعی، انتشار دود ناشی از آن می‌باشد. این دود شامل آلاینده‌های متعددی نظیر مونوکسیدکربن (CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، ازن (O₃)، ذرات معلق (PM)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) و مواد آلی فرار (VOCs) هستند (Naeher *et al.*, 2007). آتش‌سوزی زی‌توده‌های گیاهی بالاترین سهم را در انتشار ذرات معلق (PM) به اتمسفر داشته و دومین منبع آزادسازی کربن سیاه به جو زمین می‌باشند (Wiedinmyer *et al.*, 2006; US EPA, 2012; Myers-Pigg *et al.*, 2016). در مطالعات متعددی بر تأثیر منفی این ذرات معلق بر سلامت جوامع انسانی که در معرض دود ناشی از آتش‌سوزی‌های طبیعی قرار دارند، تأکید شده است (Reid *et al.*, 2016; and Maestas, 2005; Liu *et al.*, 2015; Myers-Pigg *et al.*, 2016). با بررسی اثر دود ناشی از آتش‌سوزی بر روی کودکان بیان کردند که به دلیل نیازهای فیزیولوژیکی بدن در سنین پایین‌تر، میزان دم و بازدم در واحد زمان در کودکان بیشتر از بزرگسالان بوده و از سوی دیگر به دلیل وجود ریه‌های در حال رشد، کودکان بیشتر در معرض آسیب قرار دارند (Mills *et al.*, 2018). با توجه به اینکه در مناطق تالابی علاوه بر وجود گونه‌های گیاهی و جانوری، جوامع انسانی کوچک و بزرگی نیز وجود دارند که شرایط زندگی آن‌ها کاملاً وابسته به تالاب می‌باشد، بنابراین هر گونه افت کیفیت در سلامت تالاب می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کیفیت زندگی جوامع انسانی وابسته به آن داشته باشد. عوامل مختلفی مانند مساحت سوخته، میزان زی‌توده سوخته، فراوانی، شدت و پراکندگی آتش‌سوزی، شرایط هواشناسی منطقه در زمان آتش‌سوزی و موقعیت مکانی مراکز جمعیتی نسبت به رخدادهای آتش‌سوزی از جمله عواملی هستند که در اثرگذاری آتش‌سوزی بر جوامع انسانی دخالت دارند (Williamson *et al.*, 2016; Long *et al.*, 2018). روش‌های مختلفی برای مشخص نمودن میزان جمعیتی که در معرض ذرات معلق ناشی از آتش‌سوزی طبیعی قرار می‌گیرند وجود دارد. Reid و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی مروری، عوارض سلامت جوامع انسانی که در معرض دود آتش‌سوزی طبیعی بودند را مورد بررسی قرار دادند (Reid *et al.*, 2016). آن‌ها در مطالعه خود از اطلاعات مراکز درمانی و افراد مراجعه‌کننده به این مراکز در طی آتش‌سوزی‌های مختلف استفاده کردند. از روش‌های اولیه و قدیمی برای این نوع ارزیابی، مقایسه آمار سلامت افراد جامعه در دو بازه زمانی رخداد آتش‌سوزی و بدون رخداد آتش‌سوزی بوده است (Reid and Maestas, 2019). به‌تدریج با شکل‌گیری ایستگاه‌های کنترل کیفیت هوا، پایش و بررسی داده این ایستگاه‌ها در ارزیابی دود آتش‌سوزی‌های طبیعی مورد استفاده قرار گرفت (Wiedinmyer *et al.*, 2006). امروزه با در اختیار داشتن حجم زیاد داده‌های سنجش‌ازدور در اندازه‌های تفکیک مکانی، زمانی، طیفی و رادیومتری مختلف، بررسی رخدادهای آتش‌سوزی و دود ناشی از آن به‌عنوان یکی از روش‌های نوین در ارزیابی سلامت جامعه شناخته می‌شود (Henderson *et al.*, 2008). یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در زمینه استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تعیین نرخ انتشار دود ناشی از آتش‌سوزی است (Lu *et al.*, 2019). از نظر Kaufman و همکاران (۱۹۹۶) نرخ انتشار انرژی تابشی آتش‌سوزی می‌تواند به‌عنوان شاخص نرخ میزان مصرف زی‌توده‌های

گیاهی به عنوان سوخت مصرفی در رخدادهای آتش سوزی طبیعی مورد استفاده قرار گیرد (Kaufman *et al.*, 1996). بر این اساس می توان با اندازه گیری توان تابشی آتش (FRP^۱) با استفاده از سنجنده های ماهواره ای با مشخص کردن ویژگی های رخداد آتش سوزی و کمی نمودن زی توده مصرفی در زمان آتش سوزی، نرخ انتشار ذرات معلق را به دست آورد (Wooster and Zhang, 2004; Smith and Wooster, 2005; Mazzone *et al.*, 2007; Ichoku *et al.*, 2008; Ellicott *et al.*, 2009; Vermote *et al.*, 2009; Val Martin *et al.*, 2010; Kaiser *et al.*, 2012; Freeborn *et al.*, 2014). با توجه به برداشت لحظه ای آتش سوزی و دود آن توسط سنجنده های ماهواره ای، حداکثر یک یا دو بار در روز، عملاً امکان پایش لحظه به لحظه رفتار دود آتش سوزی با استفاده از داده های ماهواره ای وجود ندارد (Remy and Kaise, 2014). از سوی دیگر، به دلیل تأثیر دود ناشی از آتش سوزی در مقیاس های محلی تا منطقه ای، و وابستگی رفتار دود آتش سوزی به شرایط آب و هوایی و فیزیوگرافی منطقه آتش گرفته، مدل سازی پراکنش دود آتش سوزی می تواند به کمک داده های نرخ انتشار حاصل از تصاویر ماهواره ای، نقش مؤثری در شناسایی وضعیت پراکنش ذرات معلق ناشی از آتش سوزی داشته باشد (Henderson *et al.*, 2008). مدل سازی پراکنش دود به منظور شبیه سازی وضعیت پراکنش ذرات معلق ناشی از آتش سوزی در فضا و زمان و تحلیل تأثیرات آن ها بر روی محیط زیست و انسان ها بکار می رود. این مدل ها می توانند برای شبیه سازی پخش آلاینده های جوی خروجی از دودکش واحدهای صنعتی در مناطق شهری و همچنین برای مدل سازی دود آتش سوزی در محیط های طبیعی بکار گرفته شوند. برای مدل سازی پراکنش دود، ابتدا باید اطلاعات مورد نیاز برای ورود به مدل (مانند نرخ انتشار، ارتفاع، سرعت و جهت باد، دما و رطوبت هوا) با استفاده از داده های سنجنش از دور و GIS جمع آوری شود. سپس با استفاده از مدل های پراکنش دود مانند CALPUFF، پخش دود و آلاینده های جوی در فضا و زمان شبیه سازی شود. مدل CALPUFF یک مدل پخش دود و آلاینده ها در جو است که برای شبیه سازی پخش آلاینده ها در مقیاس های مکانی-زمانی و تحلیل تأثیرات آن ها بر روی محیط زیست و جوامع انسانی بکار می رود. این مدل چند لایه ای که بر اساس مدل توده گوسی لاگرانژی طراحی شده است، قادر به شبیه سازی مکانی-زمانی انتقال، تبدیل و حذف آلاینده های جوی بر اساس وضعیت آب و هوایی است. پیش بینی اثرات آلاینده ها بر منابع نزدیک سطح زمین با استفاده از الگوریتم های مختلف در مدل CALPUFF قابل انجام است (Scire *et al.*, 2000). مرور منابع استفاده از روش تلفیق داده های ماهواره ای (داده های نرخ انتشار ذرات معلق ناشی از آتش سوزی های طبیعی) با مدل های پراکنش آلودگی هوا نشان داد که از این روش در مناطق مختلفی از دنیا بهره گرفته است. برای نمونه، در مطالعه ای Reid و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تلفیق داده های ماهواره ای مودیس و مدل WRF-Chem، پراکنش مکانی و زمانی ذرات معلق ناشی از آتش سوزی سال ۲۰۰۸ میلادی در مناطق جنگلی در کالیفرنیا شمالی را مورد بررسی قرار دادند (Reid *et al.*, 2013). همچنین Lassman و همکاران (۲۰۱۷) به منظور بررسی جمعیت تحت تأثیر از دود ناشی از آتش سوزی سال ۲۰۱۲ میلادی در ایالت واشنگتن از تلفیق داده های ماهواره ای مودیس و مدل انتقال شیمیایی (CTM) استفاده کردند (Lassman *et al.*, 2017). نتایج این مطالعات نشان داد که تلفیق مدل سازی آلودگی هوا با داده های به دست آمده از تصاویر ماهواره ای به ویژه در مناطقی که شبکه کنترل سنجنش زمینی کیفیت هوا از تراکم کمی برخوردار است، نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. در بررسی منابع داخلی، مطالعه ای در خصوص استفاده از روش تلفیق مدل های پراکنش آلودگی هوا و تصاویر ماهواره ای یافت نشد.

تالاب هورالعظیم به عنوان یکی از مناطق ارزشمند زیستی در محدوده مرزی دو کشور ایران و عراق، در طی سال های اخیر با بحران آتش سوزی های متعدد همراه بوده است. به دلیل وابستگی بسیاری از جوامع انسانی کوچک و بزرگ در دو کشور همسایه به خدمات محیط زیستی تالاب هورالعظیم و همجواری سکونتگاه های انسانی با آن، رخدادهای آتش سوزی علاوه بر نابودی گونه های مختلف زیستی، منجر به افزایش آلودگی هوا در منطقه می شود. وسعت زیاد تالاب و عدم امکان دسترسی به بخش های مختلف آن هم به دلایل امنیتی-سیاسی در کنار عدم مدیریت یکپارچه تالاب (Garstecki and Amr, 2011)، باعث شده است تا در فصول آتش سوزی، شرایط سختی بر تالاب و بر ساکنان هم جوار با آن تحمیل گردد. کاهش کیفیت هوا و عوارض ناشی از آن بر سلامت ساکنان مجاور تالاب، یکی از چالش های مهم در خصوص آتش سوزی های تالاب هورالعظیم می باشد. بر این اساس،

¹Fire Radiative Power



شکل ۱- محدوده تالاب هورالعظیم در مرز دو کشور ایران و عراق

شناسایی رفتار رخداد‌های آتش‌سوزی به صورت غیر مستقیم و با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی پراکنش دود ناشی از آن‌ها به عنوان هدف این تحقیق می‌باشد. سؤالات مهم در این پژوهش عبارتند از: (۱) روند تغییرات آتش‌سوزی در تالاب هورالعظیم در طی دهه‌های اخیر چگونه بوده است؟ (۲) رخداد‌های آتش‌سوزی در دو بخش ایرانی و عراقی تالاب هورالعظیم از چه وضعیتی برخوردار است؟ (۳) نرخ انتشار آتش‌سوزی در این تالاب به چه میزان است؟ و (۴) مدل‌سازی پراکنش دود ناشی از آتش‌سوزی، کدام جوامع انسانی را بیشتر در معرض خطر نشان می‌دهد؟

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مطالعاتی: تالاب هورالعظیم به عنوان یک تالاب مرزی در جنوب غربی ایران و جنوب شرقی عراق واقع شده است (شکل ۱). بخش عراقی این تالاب با نام تالاب الهویزه در سال ۱۳۸۶ به عنوان یک تالاب بین‌المللی در کنوانسیون رامسر ثبت شد. تالاب الهویزه با مساحت ۱۳۷۷۰۰ هکتار در مختصات جغرافیایی $31^{\circ}02'$ الی $31^{\circ}46'$ درجه عرض شمالی و $47^{\circ}41'$ الی $47^{\circ}51'$ درجه طول شرقی قرار دارد که در شکل ۱ به رنگ سبز می‌باشد. بخش ایرانی این تالاب که هنوز در لیست تالاب‌های مهم بین‌المللی کنوانسیون رامسر ثبت نشده است در مختصات جغرافیایی $31^{\circ}00'$ الی $31^{\circ}48'$ درجه عرض شمالی و $47^{\circ}42'$ الی $47^{\circ}54'$ درجه طول شرقی قرار دارد. با توجه به اینکه هنوز مرز مشخصی برای آن در نظر گرفته نشده است مرز غیررسمی بخش ایرانی تالاب با خط زرد رنگ مشخص شده است. این تالاب مرزی مهم و بین‌المللی، از طریق رودخانه‌های دجله در عراق و کرخه در ایران تغذیه می‌شود.

مواد و روش‌ها: مدل‌سازی پراکنش دود ناشی از آتش‌سوزی در تالاب هورالعظیم نیازمند داده‌های اولیه شامل نرخ انتشار دود (ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون، PM_{10})، داده‌های هواشناسی (دما، رطوبت، سرعت باد، جهت باد، ابرناکی و فشار هوا)، نقشه کاربری اراضی و وضعیت توپوگرافی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. این پژوهش در چهار مرحله کلی شامل: (۱) آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها، (۲) محاسبه نرخ انتشار، (۳) مدل‌سازی انتشار دود و (۴) ارزیابی اثر دود آتش‌سوزی انجام شد.

آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌ها: با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه که در مرز بین دو کشور ایران و عراق قرار دارد، داده‌های مورد استفاده در این پژوهش باید از هر دو کشور تهیه و مورد استفاده قرار می‌گرفت. بدین منظور داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک (جدول ۱) منطقه مورد مطالعه (Global Modeling & Assimilation Office (GMAO), 2015)، مدل رقومی ارتفاع (Jarvis et al., 2019) و نقشه کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت.

محاسبه نرخ انتشار دود: عدم وجود امکانات مناسب برای اندازه‌گیری مستقیم نرخ انتشار ذرات معلق در زمان آتش‌سوزی باعث شد تا از روش غیرمستقیم برای برآورد نرخ انتشار در این تحقیق استفاده شود. یکی از روش‌های غیرمستقیم در برآورد نرخ انتشار،

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک

کشور	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
ایران	۳۱° ۲۰' ۱۳"	۴۸° ۴۵' ۴۳"	اهواز
	۳۱° ۱۵' ۵۹"	۴۸° ۲۴' ۵۹"	صفی آباد دزفول
	۳۰° ۲۲' ۱۵"	۴۸° ۱۳' ۴۱"	آبادان
عراق	۳۰° ۳۲' ۵۶"	۴۷° ۳۹' ۴۳"	بصره
	۳۱° ۰۰' ۵۹"	۴۶° ۱۳' ۵۹"	ناصریه
	۳۱° ۵۱' ۰۰"	۴۷° ۰۹' ۵۹"	العماره
	۳۲° ۲۷' ۵۹"	۴۶° ۴۲' ۵۹"	علی الغربی

استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور می‌باشد. وقوع آتش‌سوزی در مناطق طبیعی مانند تالاب هورالعظیم از الگوی زمانی مشخصی تبعیت نمی‌کند و این یعنی در هر زمان و مکانی که شرایط برای آتش‌سوزی فراهم گردد این اتفاق رخ خواهد داد. بر این اساس، یکی از معیارهای مهم در انتخاب تصویر ماهواره‌ای، اندازه تفکیک زمانی مناسب در تصویربرداری از سطح زمین می‌باشد. تصویربرداری روزانه امکان پایش مستمر وقایع آتش‌سوزی را به‌خوبی فراهم می‌کند و این در حالی است که سنجنده‌های ماهواره‌ای محدودی دارای این اندازه تفکیک زمانی می‌باشند. علاوه بر این وجود ذرات معلق در هوا باعث می‌شود تا میزان نفوذ نور خورشید در ستونی از جو تا سطح زمین کاهش یابد. این ویژگی تحت عنوان عمق نوری ذرات هواویزه (Aerosol Optical Depth)، به‌عنوان معیار دوم در انتخاب نوع تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفت. براساس این دو معیار و بررسی سوابق مطالعاتی در دنیا، تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس (MODIS) بدین منظور انتخاب شد (Ichoku and Kaufman, 2005; Reid *et al.*, 2013; Lassman *et al.*, 2017). یکی دیگر از دلایل انتخاب سنجنده مودیس، امکان شناسایی رخداد‌های آتش با استفاده از ابزار اندازه‌گیری نرخ انتشار انرژی تابشی آتش (R_{FRE}) یا قدرت تابشی آتش (FRP) توسط این سنجنده می‌باشد. در مدل‌سازی پراکنش دود، شناسایی موقعیت مکانی شروع انتشار دود (موقعیت مکانی آتش) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که R_{FRE} قادر به تأمین این نیاز اطلاعاتی می‌باشد. وقوع آتش‌سوزی‌های متعدد در سال‌های اخیر در فصل تابستان در محدوده تالاب هورالعظیم باعث شد تا این فصل به‌عنوان بازه زمانی مطالعاتی انتخاب شود. وجود پدیده‌هایی نظیر پوشش ابری و رخداد‌های گردوغبار امکان برآورد غلظت ذرات معلق ناشی از آتش‌سوزی را به‌شدت کاهش می‌دهد. بر این اساس، برای انتخاب تصاویر مناسب جهت استفاده در این پژوهش، تصاویر روزانه ۹۳ روز از تاریخ ۰۱-۰۴-۱۳۹۷ تا ۳۱-۰۶-۱۳۹۷ از نظر وقوع آتش‌سوزی مورد پایش قرار گرفت. در نهایت براساس کیفیت مناسب تصاویر جهت استخراج اطلاعات، چهار روز ۱۸ و ۲۳ تیرماه و ۱۸ و ۲۰ شهریورماه ۱۳۹۷ به‌عنوان تاریخ‌های مورد بررسی انتخاب شدند. رویکرد مورد استفاده در این تحقیق برای برآورد ضریب انتشار دود بر مبنای نرخ انتشار انرژی تابشی آتش، براساس روش ایچوکو و کافمن (Ichoku and Kaufman, 2005) می‌باشد. با وجود تصویربرداری روزانه و شبانه سنجنده مودیس، تنها از تصاویر روز استفاده شد. از بین محصولات مختلف مودیس ۱۴ آکوا و ترا، برای تشخیص آتش‌سوزی و موقعیت مکانی آن‌ها استفاده شد. رخداد‌های آتش در این تصاویر دارای اندازه تفکیک مکانی ۱ کیلومتری می‌باشد (Kaufman and Justice, 1998; Kaufman *et al.*, 2003). با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه مشعل‌های نفتی نیز وجود دارند جهت تفکیک آتش‌سوزی‌های طبیعی و مشعل‌های نفتی، نقاطی که دارای روند طولانی مدت و مستمر بودند در حکم مشعل نفتی قلمداد کرده و از داده‌های مطالعاتی کنار گذاشته شدند. همچنین از محصولات مودیس ۰۴ آکوا و ترا با اندازه تفکیک ۱۰ کیلومتری برای اندازه‌گیری مقدار عمق نوری ذرات هواویزه به‌عنوان معیاری از میزان آورد ذرات معلق دود استفاده شد (Kaufman and Tanré, 1998). برای تخمین ذرات معلق آزاد شده از دود آتش‌سوزی از الگوریتم Deep Blue AOD در این پژوهش استفاده شد (Hsu *et al.*, 2004). دامنه عددی این شاخص بین صفر تا پنج می‌باشد که مقدار بیشتر از ۲ نشان‌دهنده غبار شدید یا رخداد‌های دودزا نظیر آتش‌سوزی می‌باشد (Chu *et al.*, 2003). در مرحله بعد تمامی رخداد‌های آتش‌سوزی اتفاق افتاده در تاریخ‌های مورد مطالعه، در داخل هر پیکسل عمق نوری ذرات هواویزه با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی QGIS 3.0 استخراج و با هم جمع شدند. برای محاسبه نرخ انتشار، مقدار عمق نوری ذرات هواویزه علاوه بر پیکسل دارای رخداد آتش، در پیکسل‌های مجاور آن نیز

به‌دست آمد. با توجه به اینکه در انتخاب روزهای مورد مطالعه، از انتخاب روزهایی که فاقد هرگونه پوشش ابری و یا رخدادهای گردوغبار بودند، اجتناب شده بود، کمترین مقدار عمق نوری ذرات هواویزه در بین پیکسل‌های مجاور به‌عنوان مقدار پس‌زمینه و پیکسل با بالاترین میزان عمق نوری ذرات هواویزه، نشان‌دهندهٔ مجموع دود ناشی از آتش‌سوزی به‌علاوه مقدار پس‌زمینه می‌باشد. تفاضل این دو عدد، مقدار عمق نوری ذرات هواویزه دود آتش‌سوزی را نشان می‌دهد. با فرض اینکه ابعاد هر پیکسل عمق نوری ذرات هواویزه به‌صورت ستون مکعب عمودی از سطح زمین به بالا می‌باشد، محاسبهٔ تراکم جرم دود در این ستون مورد نیاز خواهد بود (رابطهٔ ۱).

$$SMD = \tau_a^{Smoke} / \alpha_e \quad \text{رابطهٔ ۱}$$

در این رابطه SMD: به‌عنوان تراکم جرم دود (گرم بر مترمربع)، τ_a^{Smoke} : مقدار عمق نوری ذرات هواویزه دود آتش‌سوزی (بدون واحد) و α_e : ضریب امحاء جرم دود (مترمربع برای هر گرم) می‌باشد. ضریب امحاء جرم دود براساس نوع مادهٔ سوخت یا همان بیومس تعیین می‌شود که وابسته به نوع پوشش اراضی منطقهٔ درگیر آتش‌سوزی می‌باشد. با توجه به اینکه پوشش اراضی تالاب هورالعظیم به‌صورت یکپارچه و در طبقهٔ پوشش علفزار قرار دارد (CCI-LC-PUGV2, 2017)، این ضریب برای پوشش علفزار براساس پژوهش Reid و همکاران (۲۰۰۵) مقدار ۴/۵ مترمربع برای هر گرم تعیین شده است. در مرحلهٔ بعد برای تعیین مدت‌زمان پاک‌سازی (t_{clear}) هر ستون پیکسل عمق نوری ذرات هواویزه از دود آتش‌سوزی از سرعت متوسط باد ($|u|$) در موقعیت مکانی مرکز هر پیکسل و طول هر پیکسل (L) استفاده شد (رابطهٔ ۲).

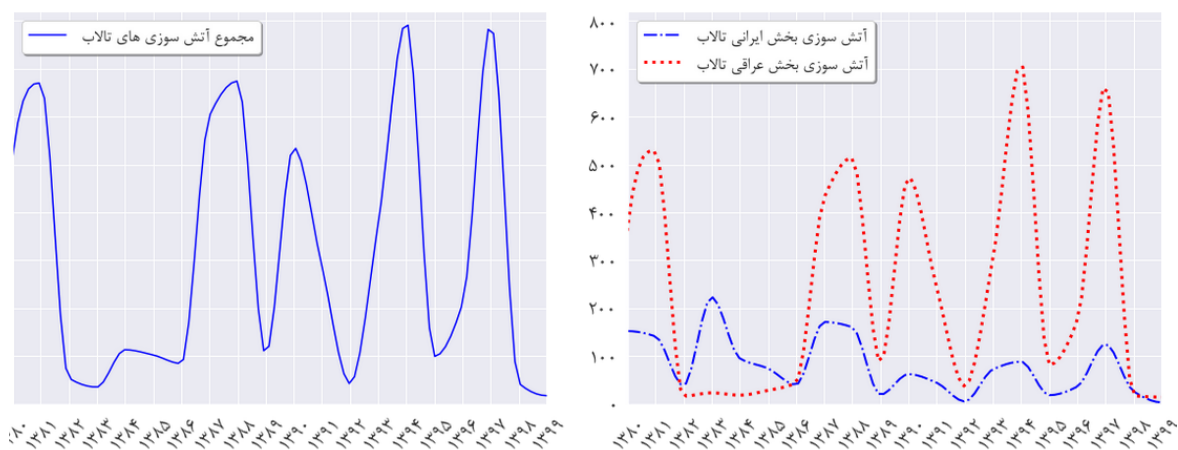
$$t_{clear} = L/|u| \quad \text{رابطهٔ ۲}$$

با توجه به اینکه در هر تصویر از سنجندهٔ مودیس در هر یک از تاریخ‌های مورد بررسی امکان ثبت رخدادهای آتش‌سوزی مختلفی وجود دارد، نیاز است تا از مقدار متوسط تراکم جرم دود (SMD_m) برای هر تاریخ تصویربرداری استفاده شود. بر این اساس با محاسبهٔ مقدار تراکم جرم دود برای هر یک از پیکسل‌های عمق نوری ذرات هواویزه، از تقسیم حاصل جمع این مقادیر بر تعداد پیکسل‌های حاوی رخداد آتش مقدار متوسط تراکم جرم دود به‌عنوان مقدار متوسط به‌دست آمد. در نهایت با استفاده از رابطهٔ ۳ نرخ انتشار ذرات معلق دود ناشی از آتش‌سوزی در تالاب هورالعظیم به‌دست آمد.

$$Q_{PM} = \frac{SMD_m * A_t}{(t_{clear})_m} \quad \text{رابطهٔ ۳}$$

در این رابطه Q_{PM} : نرخ انتشار ذرات معلق بر حسب گرم بر مترمربع در ثانیه، SMD_m : متوسط تراکم جرم دود، A_t : مجموع مساحت پیکسل‌های حاوی رخداد آتش و $(t_{clear})_m$: متوسط زمان انتشار دود می‌باشد.

مدل‌سازی انتشار دود: برای مدل‌سازی نحوهٔ پراکنش دود ناشی از آتش‌سوزی از مدل CALPUFF استفاده شد. این مدل یک مدل چندلایهٔ پیشرفته آلودگی هوا است که در شرایط ناپایدار برای پراکنش تودهٔ آلاینده، طبق مدل تودهٔ گوسی لاگرانژی طراحی شده است. در واقع یک مدل انتقال و پراکنش است که شبیه‌سازی پراکنش ذرات و گازها را با اثرات شرایط هواشناسی متغیر براساس معادلات تشابه، نحوهٔ انتشار و تبدیل و حذف آلاینده‌ها از آن را توصیف می‌کند. مدل CALPUFF شامل سه مؤلفهٔ CALMET، CALPUFF و CALPOST است که منابع آلاینده به‌صورت منفرد، نقطه‌ای، سطحی و حجمی را در ارتفاع‌های مختلف مدل‌سازی و پراکنش آلاینده‌های جوی را محاسبه می‌کند (Scire et al., 2000). داده‌هایی که برای اجرای مدل CALPUFF در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است شامل: (۱) داده‌های هواشناسی سطح زمین به‌صورت ساعتی شامل: داده‌های دمای هوا، رطوبت نسبی، پوشش ابری، سرعت باد، جهت باد، فشار و بارش، (۲) نقشهٔ کاربری زمین، (۳) نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع، (۴) داده‌های هواشناسی جو بالا (۵) اطلاعات مربوط به رخدادهای آتش‌سوزی تاریخ‌های مورد نظر شامل نقاط آتش‌سوزی انتخاب‌شده، نرخ انتشار دود و مساحت منطقهٔ آتش‌سوزی می‌باشد. CALMET دارای یکسری پیش‌پردازنده است که در جهت آماده‌سازی داده‌های هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از اجرای CALMET و تهیهٔ خروجی یکپارچه از شرایط هواشناسی منطقه از آن در بخش بعدی یعنی اجرای مدل CALPUFF برای شبیه‌سازی پراکنش دود ناشی از آتش‌سوزی استفاده شد. به‌دلیل حجم بالای داده‌های مورد استفاده و گستردگی منطقهٔ مورد مطالعه و همچنین زمان‌بر بودن پردازش داده‌ها، اجرای مدل CALPUFF برای ۴ روز و به‌صورت ۲۴ ساعته انجام شد. این ۴ روز براساس داده‌های آتش‌سوزی و کیفیت مناسب تصاویر



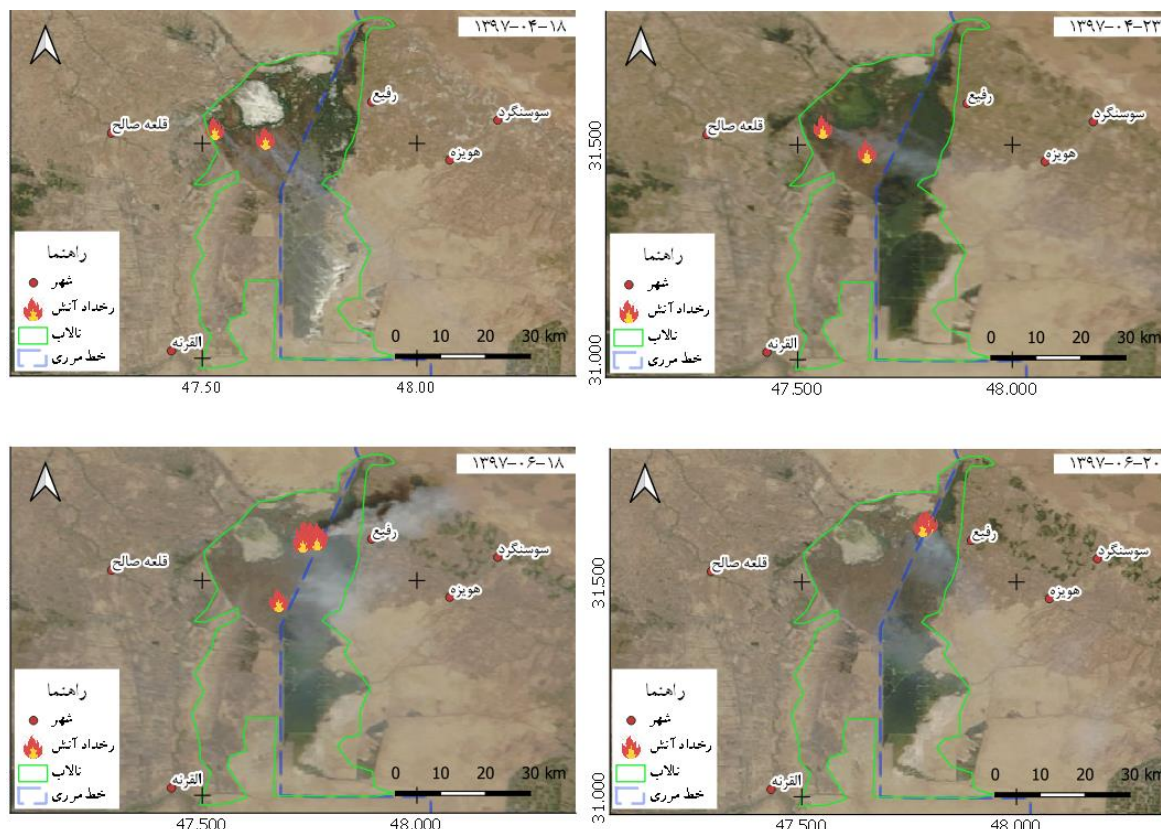
شکل ۲- سری زمانی تعداد آتش سوزی در تالاب هورالعظیم در سال های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹

مودیس از دود ناشی از آتش سوزی انتخاب شدند. در مرحله بعد فایل های خروجی از مدل در بخش CALPOST جهت انجام پس پردازش و تهیه نقشه پراکندگی دود با اندازه تفکیک مکانی ۱ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفتند. **ارزیابی اثر دود آتش سوزی:** تحلیل جمعیت تحت تأثیر از دود آتش سوزی های تالاب هورالعظیم با استفاده از خروجی های مدل در نرم افزار QGIS 3.0 صورت گرفت.

یافته های پژوهش

روند آتش سوزی در تالاب هورالعظیم: روند تغییرات تعداد آتش سوزی در تالاب هورالعظیم در طی دو دهه گذشته نشان می دهد که بیشترین تعداد آتش سوزی در منطقه تالابی به تعداد ۷۹۸ و ۷۹۴ رخداد آتش سوزی به ترتیب در سال های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ اتفاق افتاده است (شکل ۲). همچنین در سال های ۱۳۸۸، ۱۳۸۱ و ۱۳۹۰ به ترتیب ۶۷۴، ۶۷۰ و ۵۳۶ رخداد آتش سوزی براساس تصاویر ماهواره ای مودیس ثبت شده است. با توجه به موقعیت جغرافیایی تالاب هورالعظیم در دو سوی مرز کشورهای ایران و عراق (شکل ۱)، از مساحت تقریبی ۲۰۷۵ کیلومترمربعی تالاب در حدود ۱۳۷۷ کیلومترمربع در خاک عراق قرار دارد که این مقدار نزدیک به ۶۴٪ از مساحت تالاب هورالعظیم می باشد. بر این اساس، توزیع تعداد رخداد های آتش سوزی در طی این مدت نشان می دهد که از مجموع ۶۱۵۰ رخداد آتش سوزی، تعداد ۴۷۶۹ آتش سوزی در بخش عراقی تالاب اتفاق افتاده است که در حدود ۷۷/۵٪ از مجموع آتش سوزی های تالاب هورالعظیم در طی ۲۰ سال گذشته است (شکل ۲). بررسی وضعیت سرعت و جهت وزش باد در دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷ با بیشترین تعداد آتش سوزی ها در محدوده تالاب هورالعظیم نشان می دهد که در هر دو سال جهت باد غالب سالیانه و جهت باد غالب تابستانه به عنوان فصل شاخص آتش سوزی، در جهت جنوب غربی می باشد. اما متوسط سرعت باد غالب در سال ۱۳۹۷ نسبت به سال ۱۳۹۴ بیشتر بوده است که با توجه به موقعیت مکانی مراکز جمعیتی در بخش غربی و جنوب غربی تالاب می تواند بیشتر در معرض آلودگی هوای ناشی از آتش سوزی ها قرار گیرند. در تابستان سال ۱۳۹۷ فراوانی باد با سرعت بیش از ۵ متر بر ثانیه ۴۵/۴٪ بود. اما این مقدار در تابستان سال ۱۳۹۴ در حدود ۳۰/۵٪ بود. در مقایسه ای دیگر، در تابستان سال ۱۳۹۷ در ۳۵/۵٪ از مدت زمان این فصل، باد با سرعت بیش از ۵ متر در ثانیه وزیده است اما در تابستان سال ۱۳۹۴ این مقدار ۲۲/۷٪ درصد بوده است. نتایج نشان می دهد، تالاب هورالعظیم در تابستان سال ۱۳۹۷ با ۵۷۲ رخداد آتش سوزی نسبت به تابستان سال ۱۳۹۴ با ۳۷۹ رخداد آتش سوزی، فصل دشواری را سپری کرده است. بر این اساس در این پژوهش رخداد های آتش سوزی در سال ۱۳۹۷ مورد بررسی قرار گرفت.

نرخ انتشار ذرات معلق: محاسبه نرخ انتشار دود براساس اندازه گیری مقدار توان تابشی آتش و عمق نوری ذرات هواویزه با استفاده از داده های ماهواره ای مودیس براساس زمان تصویربرداری برای دو نوبت صبح (Terra) و بعدازظهر (Aqua) انجام شد. موقعیت مکانی تمامی رخداد های آتش سوزی در محدوده تالاب هورالعظیم در روز های انتخاب شده براساس تصاویر ماهواره ترا در شکل ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه فاصله زمانی بین دو تصویربرداری در یک روز در حدود ۳ ساعت می باشد بنابراین تنها



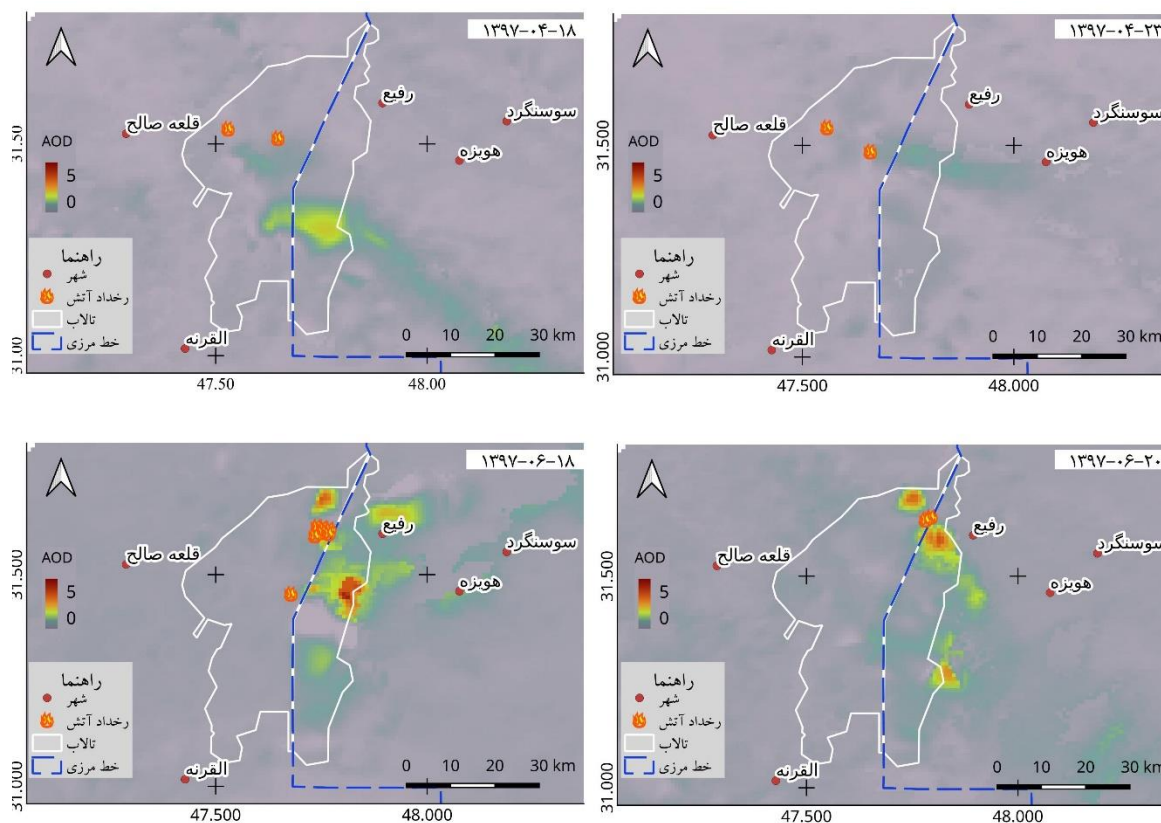
شکل ۳- تصاویر ماهواره‌ای ترا از موقعیت مکانی آتش‌سوزی‌ها و دود ناشی از آن‌ها در تاریخ‌های مورد بررسی

تصاویر صبح مربوط به ساعت ۱۰:۳۰ ارائه شده است.

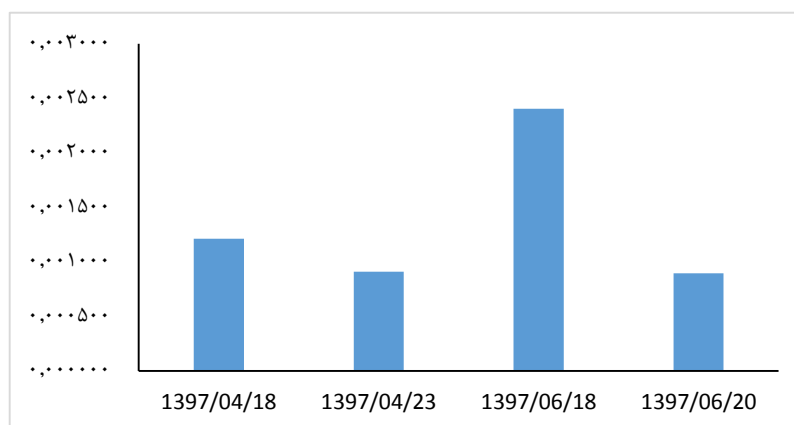
موقعیت مکانی آتش‌سوزی‌های رخ داده و دود ناشی از آن‌ها در طی این چهار روز نشان می‌دهد که تمامی آتش‌سوزی‌ها در خارج از مرز ایران و در بخش عراقی تالاب هورالعظیم اتفاق افتاده است. همچنین بررسی داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک نزدیک منطقه مطالعاتی شامل اهواز (ایران) و العماره (عراق) نشان می‌دهد که جهت وزش باد غالب در روزهای آتش‌سوزی، غربی-شرقی و شمال غربی-جنوب شرقی می‌باشد که با امتداد گسترش دود ناشی از آتش‌سوزی در تصاویر همخوانی دارد. آتش‌سوزی در روزهای مورد بررسی در بخش شمالی و مرکزی محدوده تالاب هورالعظیم (مرز سبزنگ در شکل ۳) اتفاق افتاده‌اند. رخدادهای آتش‌سوزی ثبت شده در این بازه‌های زمانی نشان می‌دهد که در حدود ۵۴٪ از این رخدادهای در زمان بعدازظهر بوده است. عمق نوری هواویزه (AOD) به دست آمده برای روزهای مورد بررسی در شکل ۴ ارائه شده است. نقشه‌ها نشان‌دهنده متوسط روزانه شاخص AOD حاصل از تصاویر ترا و آکوا می‌باشد. مقایسه گستره پراکنش دود ناشی از آتش‌سوزی در تصاویر شکل ۳ با گستره پراکنش شاخص AOD در تصاویر شکل ۴ نشان‌دهنده انطباق آن‌ها، دامنه گسترش دود در امتداد غربی-شرقی و غربی-جنوب شرقی می‌باشد.

براساس روش بیان شده، میزان نرخ انتشار دود برآورد شده برای رخدادهای آتش‌سوزی در چهار روز مورد نظر و برای دو نوبت صبح و بعدازظهر محاسبه شد (شکل ۵). با توجه به وسعت منطقه مورد نظر و وجود چندین رخداد آتش‌سوزی هم‌زمان در یک روز برای نوبت‌های صبح و بعدازظهر، تمام نقاط آتش‌سوزی که در داخل یک پیکسل عمق نوری ذرات هواویزه قرار می‌گرفتند به‌عنوان یک رخداد آتش‌سوزی در نظر گرفته شده‌اند. بیشترین رخدادهای آتش‌سوزی استخراج شده از تصاویر مودیس ۱۴ و ۱۴ در ۵ رخداد در ۱۸ شهریورماه اتفاق افتاده است. بر همین اساس، بیشترین مقدار نرخ انتشار دود ناشی از آتش‌سوزی، با 0.0024 گرم بر مترمربع در ثانیه، در روز ۱۸ شهریورماه برآورد شده است. نرخ انتشار برآورد شده براساس تصاویر ترا و آکوا در این روز برای صبح و بعدازظهر به ترتیب 0.0033 و 0.0014 گرم بر مترمربع در ثانیه بوده است. کمترین مقدار نرخ انتشار در روز ۲۰ شهریورماه و به میزان 0.0009 گرم بر مترمربع در ثانیه برآورد شده است.

پراکنش ذرات معلق: محدوده پراکنش ذرات معلق کوچک‌تر از 10 میکرون (PM_{10}) براساس نرخ انتشار به دست آمده از تصاویر



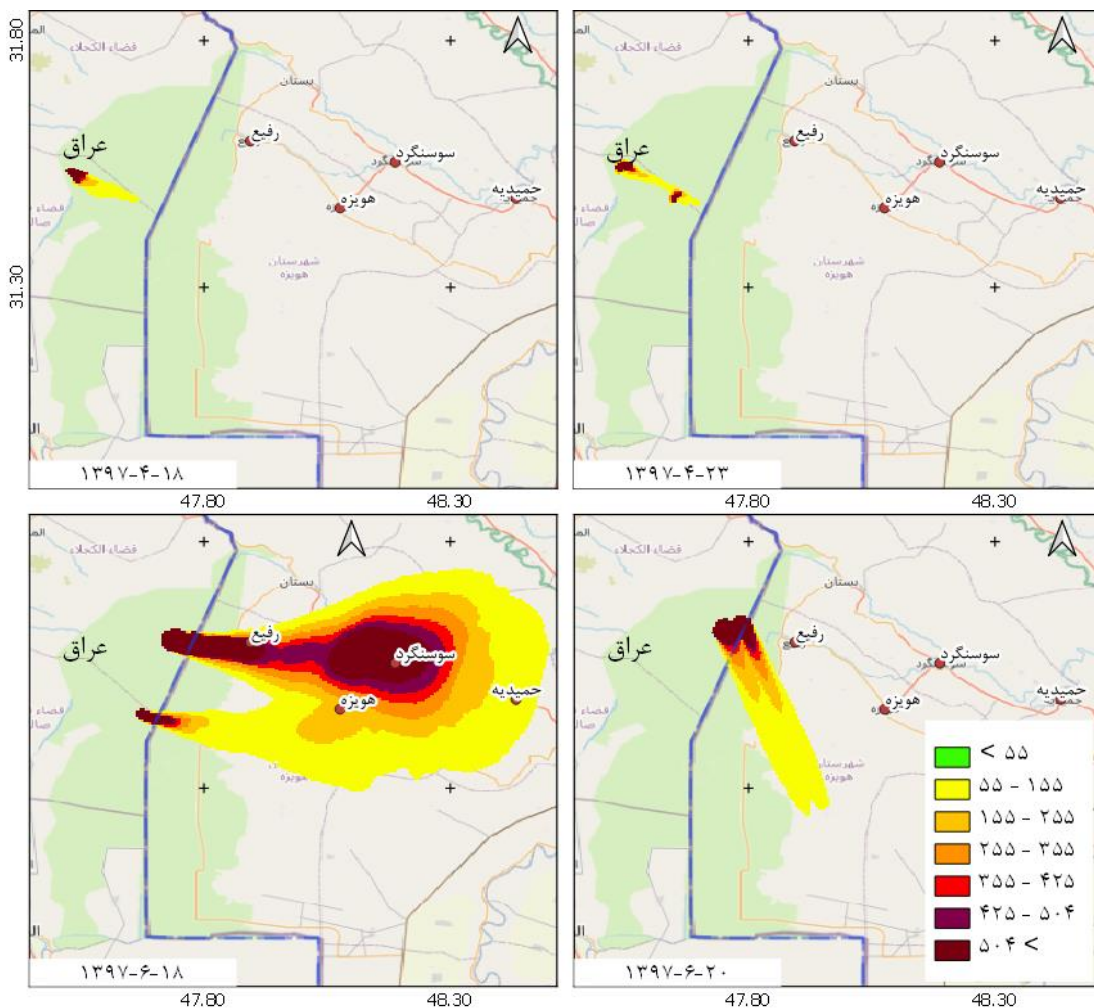
شکل ۴- مقادیر متوسط روزانه AOD (ترا و آکوا) ناشی از آتش سوزی در تاریخ‌های مورد بررسی



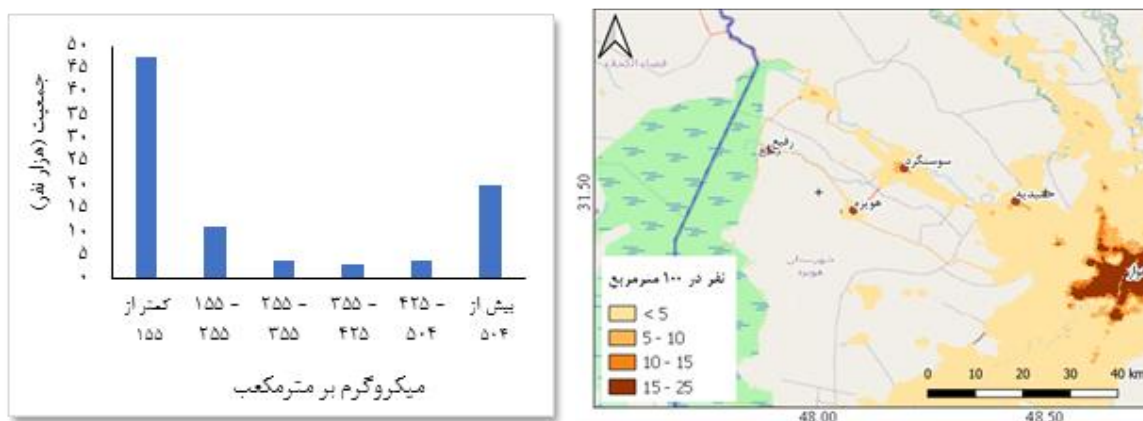
شکل ۵- نرخ انتشار ذرات معلق ناشی از رخداد‌های آتش سوزی در روزهای مورد بررسی (گرم بر متر مربع در ثانیه)

مودیس بر اساس مدل CALPUFF برای چهار روز مورد مطالعه، شبیه‌سازی گردید (شکل ۶). براساس استاندارد کیفیت هوای آزاد سازمان حفاظت محیط‌زیست، ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون در بازه زمانی ۲۴ ساعته دارای اهمیت می‌باشد. بر همین اساس، خروجی مدل پراکنش ذرات معلق برای حداکثر غلظت ۲۴ ساعته ارائه شده است. طبقه‌بندی مورد استفاده برای نمایش شدت آلاینده‌ی ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون براساس طبقات شاخص کیفیت هوا (AQI) برای این آلاینده می‌باشد (EPA, 2009). برای نمایش بهتر طبقه اول با مقادیر کمتر از ۵۵ میکروگرم بر مترمکعب (رنگ سبز در راهنمای نقشه) نمایش داده نشده است.

جمعیت تحت تأثیر: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی پراکنش ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون و نحوه پراکنش آن‌ها (شکل ۶)، جمعیت تحت تأثیر ناشی از آتش‌سوزی روز ۱۸ شهریور مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از روی هم‌گذاری نقشه پراکنش جمعیت براساس آمار جمعیتی سال ۱۳۹۵ با نقشه پراکنش ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون استفاده شد (شکل



شکل ۶- نقشه پراکنش ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون ۲۴ ساعته در تابستان ۱۳۹۷ (میکروگرم بر مترمکعب)



شکل ۷- نقشه پراکنش جمعیت در سال ۱۳۹۵ و نمودار توزیع جمعیت در طبقات مختلف غلظت‌های ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون ناشی از رخداد آتش‌سوزی در تاریخ ۱۸ شهریورماه

۷). براساس نتایج شکل ۴ و توزیع جمعیتی شهرستان‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه، بیشترین جمعیت تحت تأثیر در این روز مربوط به شهرستان‌های دشت آزادگان و هویزه می‌باشد. در مجموع جمعیتی بالغ بر ۴۲۷۰۰ نفر در این روز در معرض غلظت‌های بالای ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون قرار داشتند.

بحث و نتیجه گیری

تالاب هورالعظیم به عنوان یک منطقه ویژه محیط زیستی در منطقه مرزی بین دو کشور ایران و عراق، دارای کارکردهای مختلف اکولوژیک، اقتصادی و اجتماعی است. وجود این تالاب در شرایط مطلوب هم در مقیاس محلی بر جوامع ساکن در محدوده تالاب و هم در مقیاس منطقه ای بر شرایط اکولوژیک و زیستی دو کشور همسایه دارای تأثیرات مثبت زیادی می باشد. ایجاد شرایط مطلوب خرد اقلیمی، تضعیف جریان حرکت طوفان های گردوغباری، تأمین علوفه، کنترل جریان های سیلابی منطقه، پالایش آب ورودی از کرخه، دجله و فرات، فراهم آوری زیستگاه مناسب زادآوری و زیست انواع پرندگان، جلوگیری از پیشروی آب شور خلیج فارس به آبخوان های ایران و عراق از عمده اثرات مثبت این تالاب می باشد. دو عامل مهم تغییر اقلیم و عدم وجود مدیریت یکپارچه (به دلیل قرار داشتن در دو کشور) در تالاب هورالعظیم (Garstecki and Amr, 2011)، باعث تغییر در کارکردهای مطلوب این تالاب می شود. به دلیل اثر هم افزایی این دو عامل، تغییرات صورت گرفته می تواند منجر به ایجاد بحران های مهم در منطقه شود. یکی از این بحران های مرتبط با تالاب هورالعظیم، آتش سوزی و اثرات ناشی از آن می باشد. بررسی روند تغییرات تعداد رخدادهای آتش سوزی در دو بخش ایرانی و عراقی تالاب هورالعظیم (شکل ۲) نشان می دهد که هر دو بخش تقریباً از الگوی مشابهی تبعیت می کنند و به طور کلی تعداد آتش سوزی ها همواره در بخش عراقی تالاب بیشتر از بخش ایرانی بوده است. Dehcheshmeh و Ghaedi (۲۰۲۰) نیز در بررسی اثر تغییر اقلیم بر مهاجرت اکولوژیک در استان خوزستان بر افزایش آتش سوزی ها به ویژه در تالاب هورالعظیم بین سال های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ اشاره داشته اند. پراکندگی مکانی آتش سوزی ها در طی این مدت در تمامی پهنه تالابی به جز دو منطقه در شمال و شمالی غربی تالاب که در خاک عراق قرار دارد، مشاهده می شود. بررسی روند تغییرات پوشش اراضی توسط تصاویر ماهواره ای بین سال های ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۲ میلادی توسط Muhsin (۲۰۱۱) و همچنین بین سال های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ میلادی توسط Ismail و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که این دو بخش عاری از رخدادهای آتش سوزی در طی این مدت، همواره به شکل یک مخزن آب عمل کرده است. می توان گفت که بخش عمیق تالاب هورالعظیم در این دو منطقه قرار داشته که محل ورود یکی از شاخه های فرعی رودخانه دجله می باشند. بر این اساس، فارغ از وجود عوامل عمدی یا غیر عمدی در شروع آتش سوزی در تالاب هورالعظیم، آنچه اهمیت دارد بسترسازی مناسب برای ادامه آتش سوزی و گسترش آن در پهنه های وسیع است. این بسترسازی می تواند به دلایل مختلفی نظیر میزان رطوبت خاک، دما و رطوبت هوا، میزان زی توده، سرعت و شدت وزش باد، دوری و نزدیکی به مناطق مسکونی، جاده های دسترسی و عدم مدیریت یکپارچه سرزمین باشد (Garstecki and Amr, 2011; Dehcheshmeh and Ghaedi, 2020). علاوه بر این، عوامل دیگری نظیر شرایط سیاسی حاکم در منطقه عراق که در طی دهه های گذشته دستخوش تغییرات زیادی بوده است نیز می تواند بر بحران آتش سوزی در تالاب هورالعظیم مؤثر بوده باشد (Kadhim et al., 2020). نتایج به دست آمده از بررسی شرایط غالب هواشناسی شامل سرعت و جهت باد، توزیع رخدادهای آتش سوزی در فصل تابستان در سال های مختلف و همچنین کیفیت داده های ماهواره مودیس، زمینه ساز انتخاب روزهای محدود و مناسب برای تحلیل رخدادهای آتش سوزی در تالاب هورالعظیم در مطالعه حاضر شد. انتشار دود ناشی از آتش سوزی در تمامی این روزها به سمت ایران، اما با جهت های مختلف وزش باد بوده است. تصویر رنگی طبیعی که از ترکیب باندهای ۱، ۴ و ۳ مودیس به دست آمده است نقش مهمی در تشخیص دود (smoke) داشته (Li et al., 2015)، همچنین موقعیت مکانی آتش سوزی که با استفاده از تصاویر مود ۱۴ و مید ۱۴ به دست آمده است بر وقوع رخدادهای آتش سوزی در نقطه شروع انتشار دود به شکل زنگوله ای تأکید دارد. بیشترین حجم دود که به صورت چشمی از روی تصویر رنگی طبیعی قابل تشخیص است در تاریخ ۱۸ شهریورماه ۱۳۹۷ اتفاق افتاده است. تعیین ضرایب نرخ انتشار براساس روش ارائه شده توسط Jordan و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تصاویر ماهواره ای مودیس به عنوان یکی از روش های شناخته شده و پر کاربرد (Ichoku and Kaufman, 2005; Williamson et al., 2013; Liu et al., 2015; Lu et al., 2019) به خوبی توانست نرخ انتشار ذرات معلق برای رخدادهای آتش سوزی را برآورد کند. همان گونه که انتظار می رفت با توجه به حجم دود ناشی از آتش سوزی در ۱۸ شهریور ماه میزان نرخ انتشار برآورده شده در این روز نیز بیشتر از دیگر روزها می باشد (شکل ۶). با توجه به وجود پوشش اراضی علفزار و نیزار به صورت یکپارچه و عدم وجود تنوع به لحاظ پوشش گیاهی و

همچنین استفاده از ضرایب تجربی به‌دست‌آمده در این نوع کاربری (Jordan *et al.*, 2008)، در خصوص عدم قطعیت نرخ‌های به‌دست‌آمده به میزان عدم قطعیت این مقادیر به منبع مورد استفاده ارجاع داده می‌شود. براساس موقعیت مکانی آتش‌سوزی‌های صورت گرفته (شکل ۳)، با توجه به گستردگی منطقه تحت تأثیر از دود ناشی از آتش‌سوزی و همچنین نقش مثبت داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های متعدد به‌جای یک ایستگاه هواشناسی در آنالیز و شبیه‌سازی پراکنش دود انتخاب مدل CALPUFF گزینه مناسبی برای این هدف بوده است (Scire, 2000). با توجه به محدودیت مدل ایرمود (Aermod) در استفاده از داده‌های بیش از یک ایستگاه هواشناسی و همچنین عدم توانایی در آنالیز داده‌ها در حریم بیش از ۵۰ کیلومتری از منبع انتشار دود، عملاً امکان استفاده از این مدل در این مطالعه نمی‌توانست درست باشد (Rood, 2014). بررسی خروجی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل CALPUFF در مناطقی که فاقد اطلاعات زمینی مناسب از غلظت ذرات معلق در زمان آتش‌سوزی هستند، از نقاط ضعف این گونه پژوهش‌ها به‌شمار می‌رود (Henderson, 2008). با توجه به اینکه وجود ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای آزاد تنها به محیط‌های شهری محدود می‌شود بنابراین عدم وجود اطلاعات کافی در محدوده تالاب هورالعظیم و همچنین به‌دلیل شرایط بحرانی شکل گرفته در زمان وقوع آتش‌سوزی و تلاش سازمان‌های مربوط در کنترل و مهار آتش‌سوزی مانع از انجام نمونه‌برداری-های میدانی در سنجش کیفیت هوا شده است. از سوی دیگر، علی‌رغم وجود ایستگاه سنجش کیفیت هوا در شهر سوسنگرد به‌عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه برداشت آلاینده، متأسفانه در تاریخ‌های مورد نظر هیچ‌گونه اطلاعاتی در این خصوص در سامانه پایش کیفی هوای کشور وجود ندارد. براساس شکل ۶، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در تاریخ ۱۸ شهریور ۱۳۹۷ بیشترین غلظت ذرات معلق در محدوده شهر سوسنگرد وجود داشته است. همچنین شهرهای رفیع و هویزه نیز مهم‌ترین مراکز جمعیتی بودند که در این روز به شدت تحت تأثیر دود ناشی از آتش‌سوزی تالاب قرار گرفتند. در روزهای ۱۸ و ۲۳ تیرماه غلظت بالای ذرات معلق کوچک‌تر از ۱۰ میکرون ناشی از آتش‌سوزی در داخل محدوده تالاب بوده است و در تاریخ ۲۰ شهریورماه به‌دلیل جهت باد شمال غربی-جنوب شرقی مرکز جمعیتی خاصی تحت تأثیر نبوده است. وجود اطلاعات کافی و ثبت‌شده در خصوص تعداد افراد مراجعه‌کننده ناشی از مشکلات تنفسی در روزهای مورد بررسی و به‌ویژه در تاریخ ۱۸ شهریور می‌تواند بر صحت و سقم نتایج حاصل از مدل تأثیر مثبت داشته باشد که متأسفانه عدم ارائه چنین اطلاعاتی می‌تواند مطالعات این‌چنینی را خدشه‌دار نماید. کنترل دستگاه‌های سنجش کیفیت هوا و کالیبره بوده چنین دستگاه‌هایی به‌ویژه در مناطق حساس و در فصول شاخص آتش‌سوزی علاوه بر ارائه اطلاعات درست از وضعیت منطقه در زمان بحران به‌عنوان داده‌های مناسب در تحلیل کوتاه‌مدت و درازمدت مطالعات ارزیابی سلامت می‌تواند نقش مهمی داشته باشد. با این وجود، مقایسه نتایج حاصل از استخراج داده‌های مقادیر متوسط روزانه AOD حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مودیس (شکل ۴) و نتایج حاصل از مدل‌سازی پراکنش ذرات معلق با استفاده از مدل CALPUFF (شکل ۶) نشان داد که چنین روشی می‌تواند در مناطقی که با کمبود اطلاعات زمینی و مشکل دسترسی مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرد. یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر عدم امکان دسترسی به منطقه مرزی به‌ویژه در بخش عراقی آن بوده است. بر این اساس، به‌نظر می‌رسد استفاده از شاخص‌های مناسب پوشش گیاهی، رطوبت خاک و حرارت استخراج‌شده از داده‌های سنجش‌ازدور بتواند تا حد زیادی کمبود اطلاعاتی منطقه را جبران نماید. وقوع رخداد‌های آتش‌سوزی به‌دلایل مختلف از جمله تغییر اقلیم و اثرات آن‌ها امروزه یکی از چالش‌های مهم در حفظ کیفیت سلامت اکوسیستم‌های طبیعی و جوامع انسانی هم‌جوار می‌باشد. استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور برای برآورد نرخ انتشار ذرات معلق ناشی از آتش‌سوزی در چنین مناطقی به‌دلیل عدم امکان استقرار تجهیزات اندازه‌گیری کیفیت هوا از بهترین گزینه‌های حال حاضر می‌باشد. تلفیق مدل‌سازی انتشار دود ناشی از آتش‌سوزی با داده‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان یک رویکرد ترکیبی می‌تواند نقش مؤثری در شناسایی و بهبود سلامت عمومی جوامع تحت تأثیر داشته باشد. رویکرد CALPUFF-MODIS مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در فصول رخداد‌های آتش‌سوزی در مناطق حساس زیستی کاربرد داشته باشد. هر چند وجود داده‌های میدانی می‌تواند در کاهش عدم قطعیت نتایج به‌دست‌آمده مؤثر باشد اما به‌عنوان روشی با پوشش گسترده‌های زمانی و مکانی مختلف دارای مزیت است.

References

- CCI, E. L.C., 2017. Product user guide version 2.0. UCL-Geomatics, London, UK, 105 p.
- Chu, D.A., Kaufman, Y.J., Zibordi, G., Chern, J.D., J., Mao, C. Li, Holben, B.N., 2003. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(21), 1-

- 18.
- Dehcheshmeh, M.M., Ghaedi, S., 2020. Climate Change and Ecological Migration: A Study of Villages in the Province of Khuzestan, Iran, *Environmental Research. Engineering and Management* 76(1), 6-19.
- Ellicott, E., Vermote, E., Giglio, L., Roberts, G., 2009. Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE. *Geophysical Research Letters* 36(13), 1-5.
- EPA, 2009. *AQI: A Guide to Air Quality and Your Health*. USA, EPA, 12 p.
- Freeborn, P.H., Wooster M. J., Roy D. P., Cochrane M. A., 2014. Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation. *Geophysical Research Letters* 41(6), 1988-1994.
- Garstecki, T., Amr, Z., 2011. Biodiversity and ecosystem management in the Iraqi Marshlands—screening study on potential World Heritage Nomination. IUCN (International Union for Conservation of Nature), Amman, Jordan, 189 p.
- Global Modeling & Assimilation Office (GMAO), 2015. MERRA-2 tavg1_2d_lnd_Nx: 2D, 1-Hourly, Time-averaged, Single-level, Assimilation, Land Surface Diagnostics V5.12.4. Accessed 2 March 2017. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), Greenbelt, MD, USA.
- Hauptman, M., Balmes, J.R., Miller, M.D., 2020. The hazards of wildfire smoke exposure for children. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care* 100756.
- Henderson, S.B., Burkholder, B., Jackson, P.L., Brauer, M., Ichoku, C., 2008. Use of MODIS products to simplify and evaluate a forest fire plume dispersion model for PM10 exposure assessment. *Atmospheric Environment* 42(36), 8524-8532.
- Hsu, N.C., Tsay, S.C., King, M.D., Herman, J.R., 2004. Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(3), 557-569.
- Ichoku, C., Kaufman, Y.J., 2005. A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43(11), 2636-2649.
- Ichoku, C., Giglio, L., Wooster, M.J., Remer, L.A., 2008. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. *Remote Sensing of Environment* 112, 2950-2962.
- Ismail, R.R., Al-Abudi, B.Q., Hussein, Z.F., 2020. Land cover change detection using satellite images based on modified spectral angle mapper method. *Plant Archives* 20(1), 2363-2371.
- Jarvis A, Reuter, H., Nelson, A., Guevara, E., 2019. Hole-filled SRTM for the globe version 4. Available from the *cgiar-csi SRTM 90m Database*.
- Jordan, N.S., Ichoku, C., Hoff, R.M., 2008. Estimating smoke emissions over the US Southern Great Plains using MODIS fire radiative power and aerosol observations. *Atmospheric Environment* 42(9), 2007-2022.
- Kadhim, A.A., Shortridge, A., Al-Nasrawi, A.K., 2021. Causes and consequences of environmental degradation along the Shatt Al-Arab River: a coupled human and natural systems (CHANS) perspective. *GeoJournal* 86, 2709-2722.
- Kaiser, J.W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J.-J., 2012. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences* 9(1), 527-554.
- Kaufman, Y.J., Remer, L. A., Ottmar, R.D., Ward, D.E., Li, R.R., Kleidman, R., Fraser, R.S., Flynn, L. P., McDougal, D., Shelton, G., 1996. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment, *Global Biomass Burning*, pp. 685-696.
- Kaufman, Y.J., Justice, C.O., 1998. Algorithm technical background document MODIS FIRE PRODUCTS, version 2, 30-35.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D., 1998. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS, *NASA MODIS Algorithm Theoretical Basis Document*, Goddard Space Flight Center 85, 3-68.
- Kaufman, Y.J., Ichoku, C., Giglio, L., v, S. x, Chu, D.A., Hao, W.M., Li, R.R., Justice, C.O., 2003. Fire and smoke observed from the Earth Observing System MODIS instrument products, validation, and operational use. *International Journal of Remote Sensing* 24(8), 1765-1781.
- Lassman, W., Ford, B., Gan, R. W., Pfister, G., Magzamen, S., Fischer, E. V., Pierce, J. R., 2017. Spatial

- and temporal estimates of population exposure to wildfire smoke during the Washington state 2012 wildfire season using blended model, satellite, and in situ data. *GeoHealth* 1(3), 106-121.
- Li, X., Song, W., Lian, L., Wei, X., 2015. Forest fire smoke detection using back-propagation neural network based on MODIS data. *Remote Sensing* 7(4), 4473-4498.
- Liu J.C., Pereira, G., Uhl, S.A., 2015. A systematic review of the physical health impacts from nonoccupational exposure to wildfire smoke. *Environmental Research* 136, 120-132.
- Liu, M., Song, Y., Yao, H., Kang, Y., Li, M., Huang, X., Hu, M., 2015. Estimating emissions from agricultural fires in the North China Plain based on MODIS fire radiative power. *Atmospheric Environment* 112, 326-334.
- Long J.W., Tarnay, L.W., North, M.P., 2018. Aligning smoke management with ecological and public health goals. *Journal of Forestry* 116, 76-86.
- Lu, X., Zhang, X., Li, F., Cochrane, M.A., 2019. Investigating Smoke Aerosol Emission Coefficients Using MODIS Active Fire and Aerosol Products: A Case Study in the CONUS and Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124(6), 1413-1429.
- Lumbierres, M., Méndez, P.F., Bustamante, J., Soriguer, R., Santamaría, L., 2017. Modeling biomass production in seasonal wetlands using MODIS NDVI land surface phenology. *Remote Sensing* 9(4), 392-410.
- Mazzoni, D., Logan, J.A., Diner, D., Kahn, R., Tong, L., Q., 2007. A data-mining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements. *Remote Sensing of Environment* 107(1-2), 138-148.
- Mills, D., Jones, R., Wobus, C., Ekstrom, J., Jantarasami, L., Juliana, A. Crimmins, A., 2018. Projecting age-stratified risk of exposure to inland flooding and wildfire smoke in the United States under two climate scenarios. *Environ Health Perspect* 126(4), 047007.
- Mitsch W.J., Gosselink, J.G., 2007. *Wetlands*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 582 p.
- Muhsin, I.J., 2011. Al-hawizeh marsh monitoring method using remotely sensed images, *Iraqi Journal of Science* 52(3), 381-387.
- Myers-Pigg, A.N., Griffin, R.J., Louchouart, P., Norwood, M.J., Sterne, A. Cevik, B.K., 2016. Signatures of biomass burning aerosols in the plume of a saltmarsh wildfire in South Texas. *Environmental Science & Technology* 50(17), 9308-9314.
- Naeher LP, Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J.T., Simpson, C.D., Koenig, J.O., Kirk, R.S., 2007, Woodsmoke health effects: a review. *Inhalation Toxicology* 19(1), 67-106.
- Reid, C.E., Brauer, M., Johnston, F.H., Jerrett, M., Balmes, J.R., Elliott, C.T., 2016. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives* 124(9), 1334-1343.
- Reid, J.S., Eck, T.F., Christopher, S.A., R., Koppmann, Dubovik, O., Eleuterio, D.P., Holben, B.N., Reid, E.A., Zhang, J., 2005. A review of biomass burning emissions part III: intensive optical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 827-849.
- Reid, C.E., Maestas, M.M., 2019. Wildfire smoke exposure under climate change: impact on respiratory health of affected communities. *Current Opinion in Pulmonary Medicine* 25(2), 179-187.
- Reid, C., Jerrett, M., Tager, I., Petersen, M., Morefield, P., Balmes, J. R., 2013. Spatiotemporal modeling of wildfire smoke exposure in Northern California using satellite data and chemical transport models. In ISEE Conference, Basel, Switzerland. 4826 p.
- Remy, S., Kaiser, J.W., 2014. Daily global fire radiative power fields estimation from one or two MODIS instruments. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 13377-13390.
- Rice M.B., Thurston, G.D., Balmes, J.R., Pinkerton, K.E., 2014. Climate change. A global threat to cardiopulmonary health. *American Journal of Respiratory and critical Care Medicine* 189(5), 512-519.
- Rood, A.S., 2014. Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset. *Atmospheric Environment* 89, 707-720.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000. A user's guide for the CALPUFF dispersion model, Earth Technical Incorporated. pp. 1-521.
- Settele, J., Scholes, R., Betts, R.A., Bunn, S., Leadley, P., D., Nepstad, Overpeck, J., Taboada, M.A., Fischlin, A., Moreno, J.M., Root, T., 2015. Terrestrial and inland water systems, In *Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects*, Cambridge University Press, 89 p.
- Smith, A.M.S., Wooster, M.J., 2005. Remote classification of head and backfire types from MODIS fire

- radiative power observations. *International Journal of Wildland Fire* 14, 249-254.
- US Environmental Protection Agency, 2012. Report to Congress on Black Carbon (EPA-450/R-12-001), US Environmental Protection Agency. Washington, DC, 388 p.
- Val Martin, M., Logan, J.A., Kahn, R.A., Leung, F.-Y., Nelson, D.L., Diner, D.J., 2010. Smoke injection heights from fires in North America: Analysis of 5 years of satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 1491-1510.
- Vermote, E., Ellicott, E., Dubovik, O., Lapyonok, T., Chin, M., Giglio, L., Roberts, G.J., 2009. An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, D18205.
- Weise, D.R., Wright, C.S., 2014. Wildland fire emissions, carbon and climate: characterizing wildland fuels. *Forest Ecology and Management* 317, 26-40.
- Westerling AL, Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., Swetnam, T.W., 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science* 313(5789), 940-943.
- Wiedinmyer, C., Quayle, B., Geron, C., Belote, A., McKenzie, D., X., Zhang, O'Neill, S., Wynnen, K.K., 2006. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. *Atmospheric Environment* 40(19), 3419-3432.
- Williamson, G.J., Price, O.F., Henderson, S.B., Bowman, D.M., 2013. Satellite-based comparison of fire intensity and smoke plumes from prescribed fires and wildfires in south-eastern Australia. *International Journal of Wildland Fire* 22(2), 121-129.
- William J. Mitsch, Bernal, B., Hernandez, M.E., 2015. Ecosystem services of wetlands, *International Journal of Biodiversity Science. Ecosystem Services & Management* 11(1), 1-4.
- Williamson GJ, Bowman, D., Price, O.F., Henderson, S.B., Johnston, F.H., 2016. A transdisciplinary approach to understanding the health effects of wildfire and prescribed fire smoke regimes. *Environmental Research Letters* 11(12), 125009.
- Wooster, M.J., Zhang, Y.H., 2004. Boreal forest fires burn less intensely in Russia than in North America. *Geophysical Research Letters* 31(20), L20505.