

## پیش بینی آسیب پذیری آلودگی نفتی در خلیج فارس با استفاده از روش های هوش محاسباتی در محیط GIS

مقاله پژوهشی

مبین افتخاری<sup>۱</sup> سید احمد اسلامی نژاد<sup>۲</sup> عباسعلی قزل سوفلو<sup>۳</sup> ملیکا راستگو<sup>۴</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

صفحات: ۴۰-۵۳

چکیده

خلیج فارس بخش قابل توجهی از ذخایر نفتی جهان را شامل می‌شود و عموماً آلودگی نفتی یکی از اصلی‌ترین آلودگی‌های این منطقه به شمار می‌رود. اولین گام جهت کنترل و پیشگیری از آلودگی‌های نفتی، تعیین میزان درجه حساسیت مناطق ساحلی به این نوع آلودگی است. پژوهش حاضر به منظور پیش بینی آسیب پذیری آلودگی نفتی در خلیج فارس می‌باشد. لذا در این تحقیق به منظور تعیین مناطق پر ریسک آسیب‌پذیر نفتی در محدوده خلیج فارس معیارهای مؤثر از جمله لوله‌های انتقال نفت، سکوهای نفتی، مسیر عبور و مرور کشتی‌ها، بنادر، فلزات سنگین، نوسانات تراز سطح آب، بارندگی، جریان‌ات دریایی، آلودگی هوا و بادهای موسمی مورد استفاده قرار گرفت. نوآوری تحقیق حاضر ارائه یک رویکرد ترکیبی جدید جهت تعیین معیارهای مؤثر آسیب پذیری خلیج فارس می‌باشد. در این راستا از ترکیب رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (هسته‌های گوسین و مکعبی سه‌گانه) و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات گسسته استفاده گردید. روش ترکیبی با دو خواص منحصر به فرد داده‌های مکانی یعنی خودهمبستگی مکانی و ناپایداری مکانی سازگار است و برای مسائل رگرسیون مکانی مناسب است. مقادیر  $R^2$  و RMSE حاصل از روش GWR با هسته مکعبی سه‌گانه به ترتیب ۰/۹۹۷۱ و ۰/۲۱۴۲ به دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری بالای هسته مکعبی سه‌گانه نسبت به هسته گوسین است. هم‌چنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که لوله‌های انتقال نفت، سکوهای نفتی و مسیر عبور و مرور نفتکش‌ها بیشترین تأثیر را در آسیب پذیری خلیج فارس دارند.

واژگان کلیدی: آلودگی نفتی، خلیج فارس، رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی و عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران،

[Mobineftekhari@yahoo.com](mailto:Mobineftekhari@yahoo.com)

<sup>۲</sup> گروه مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد.

<sup>۴</sup> دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

## مقدمه

اهمیت دریاها و اقیانوس‌ها در حمل‌ونقل، شیلات، تأمین انرژی، برخورداری از منابع عظیم معدنی و سهم آن‌ها در برقراری توازن زیست‌محیطی بر همگان آشکار است. حفظ محیط‌زیست دریایی یک ضرورت طبیعی و کهن است (ضیایی بیگدلی، ۱۳۸۰). اهمیت دریاها تنها به‌خاطر فراهم نمودن امکانات حمل و نقل آسان نبوده بلکه در اقتصاد جهانی و در ادامه زندگی بشر نقش مهمی ایفا می‌کند که حمل‌ونقل دریایی بخشی از آن است. محیط‌زیست ساحلی و دریایی همواره به‌منزله یک اکوسیستم پویا، پناهگاه موجودات متنوع و بسیاری است و ازجمله حساس‌ترین اکوسیستم‌های کره خاکی است که به دلیل وجود منابع ارزنده اقتصادی همواره مورد توجه کارشناسان و دانشمندان علوم زیستی قرار گرفته است (شریفی پور و همکاران، ۱۳۷۸). نواحی ساحلی، محل پیوند آب و خشکی و فصل مشترک دو اکوسیستم با اختصاصات مجزا از یکدیگر است که دارای زیستگاه‌ها و آبریان حساس، منابع معدنی و تفرجگاهی قابل ملاحظه‌ای بوده و پشتوانه بسیار مهمی برای فعالیت‌های اقتصادی، شیلات، صنایع حمل‌ونقل و توریسم به شمار می‌آیند. این ناحیه، منطقه‌ای انتقالی و آسیب‌پذیر و آخرین پذیرنده آلاینده‌های خشکی و دریا می‌باشد و در معرض تجمع آلاینده‌ها و تهدیدات بالقوه آن‌ها قرار دارد. آلاینده‌های دریایی به‌طور کلی شامل پساب‌های صنعتی، زباله‌های شهری، تخلیه آب توازن و شستشوی کشتی‌ها، نشت مواد نفتی ناشی از حوادث دریایی، زباله‌های اتمی و عوامل طبیعی می‌باشند که نشت نفت و مشتقات آن از حیث ساختار متفاوت و نحوه انتشار در زمینه‌های بین‌المللی، سیاسی و اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد (طالع زاری، ۱۳۹۵). مطابق با اطلاعات NOAA<sup>۵</sup> خلیج فارس با

وقوع ۱۰۸ مورد نشت نفت از سال ۱۹۶۰ تاکنون یکی از مناطق دریایی با بیشترین آلودگی نفتی در جهان است. از آنجایی که خلیج فارس دارای یک تجربه رشد سریع در صنعتی سازی جمعیت و شهرسازی بوده است. در دهه‌های گذشته آلودگی زیست‌محیطی یکی از چالش‌های مهم در این پهنه آبی بوده است. همچنین ۶۰ درصد از ذخایر نفتی جهان در خلیج فارس می‌باشد، احداث سکوه‌های نفتی و مجتمع‌ها و پالایشگاه‌ها در اطراف خلیج فارس و ورود نفت، مواد شیمیایی و پساب‌ها به داخل آب از عوامل مهم این آلودگی می‌باشند (حاج رسولیها، ۱۳۹۰). لذا اولین قدم جهت کنترل و پاک‌سازی دقیق و سریع در هنگام آلودگی ناگهانی نفت، تعیین درجه حساسیت مناطق ساحلی به این آلودگی‌ها جهت مدیریت بحران و به حداقل رساندن آسیب‌ها می‌باشد که لازم است که این مرحله با دقت و استفاده از ابزارها و روش‌های مناسب صورت پذیرد. با پیشرفت علم کامپیوتر و قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، مسائلی نظیر تعیین حساسیت مناطق ساحلی به آلودگی‌های نفتی که وابسته به پارامترهای زیادی هستند را می‌توان با سهولت و سرعت بیشتری تجزیه و تحلیل قرارداد (Hadipour et al, 2020; Asif et al, 2022). تصمیم‌گیری چند معیار مکانی فرآیندی است که در آن، اطلاعات جغرافیایی با یکدیگر ترکیب شده و به فرآیند تصمیم‌گیری وارد می‌شوند. تصمیم‌گیری‌های چند معیاره مکانی در مقایسه با روش‌های متداول تصمیم‌گیری چند معیاره پیچیده‌تر و مشکل‌تر هستند، زیرا بایستی تعداد زیادی از فاکتورها و روابط بین آن‌ها شناسایی و لحاظ گردد. تحلیل‌های چند معیاره مکانی، داده‌های مکانی (ورودی) را تلفیق و وارد تصمیم‌گیری نهایی (خروجی) می‌نمایند (Shao et al, 2020). طی این فرآیند رابطه‌ای میان نقشه‌های ورودی و نقشه‌های

<sup>۵</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration

حفاظت، جلوگیری از تخریب و آلودگی دریایی با توجه به رشد فزاینده این استان در صنایع نفت و گاز بیان شده است. در این مطالعه از داده‌های سال ۲۰۰۴ سنجنده pan از تصاویر ماهواره‌ای IRS با قدرت تفکیک ۸/۵ متر و همچنین اطلاعات ماهواره لندست (ETM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر، مربوط به سال ۲۰۰۲ استفاده شد. داده‌های مورد استفاده ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ تصحیح مختصات گردید، سپس نوار ساحلی مورد مطالعه، با تفسیر چشمی هر دو تصویر ماهواره‌ای به واحدهای مستقل تفکیک و شناسایی اولیه ساحل از نظر فرم و جنس ساحل صورت پذیرفت، سپس برای تفکیک نوع ساحل از طبقه‌بندی ارائه شده توسط NOAA استفاده و واحدهای اولیه شناسایی شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای پس از بازبینی زمینی نهایی گردید و در پایان اطلاعات فوق پس از انتقال به سامانه جغرافیایی جهت تهیه میزان حساسیت فیزیکی سواحل استان بوشهر با توجه به معیارهای ESI مورد استفاده قرار گرفت (دانه‌کار و شریفی پور، ۱۳۸۴). در تحقیق دیگری به منظور برنامه‌ریزی مدیریت ساحلی و جلوگیری از زیان‌های وارده به منابع طبیعی و توسعه پایدار، حساسیت زیست‌محیطی ناهمواری‌های ساحلی استان هرمزگان توسط بذل راد و دانه‌کار (۱۳۸۸) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق به ارتباط بین ناهمواری‌های ساحلی، جنس سواحل و موجودات زنده پرداخته شده است، به علت اینکه این موجودات، سازگار با اندازه ذرات و به تبع آن لندفرم مشخصی در ساحل می‌باشند حساسیت زیستی لندفرم‌های مختلف در ساحل تعیین شده است، به همین منظور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و با توجه به انواع طبقه‌های لندفرم ساحلی از جمله: زبانه، دستک، کولاب ساحلی، خور، مصب، جزیره سدی و ... لندفرم‌های این بخش شناسایی اولیه شد، سپس با بازدیدهای نهایی لندفرم‌های

خروجی تعریف شده و داده‌های مکانی و اولویت‌های تصمیم‌گیرندگان بر اساس قوانین معینی تجزیه و تحلیل می‌شوند. از نتایج آنالیز تعیین حساسیت محیطی مناطق ساحلی به آلودگی نفتی، جهت شناسایی منابع در معرض خطر و واکنش به آلودگی‌های ناگهانی نفت استفاده می‌شود. در این آنالیز پارامترهای مؤثر جهت حساسیت نواحی ساحلی به آلودگی نفتی در نظر گرفته می‌شود، هر یک از این پارامترها دارای ارزش و امتیازی در منطقه ساحلی مورد نظر هستند که هر پارامتر پس از وزن دهی به یک لایه اطلاعاتی تبدیل می‌شود. سپس برای محاسبه میزان حساسیت قسمت‌های مختلف منطقه مورد مطالعه باید لایه‌های اطلاعاتی را با توجه به ارزش‌های محاسبه شده برای هر لایه، با یکدیگر تلفیق نمود. با تلفیق این لایه‌ها، لایه کاربری مورد نظر به دست می‌آید که بیانگر ارزش حساسیت نسبی هر نقطه از منطقه ساحلی به آلودگی‌های نفتی می‌باشد (Vafai et al, 2013).

با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌توان نقش و اهمیت معیارهای گوناگون را لحاظ نموده و همچنین سناریوهای متعددی را برای حساسیت مناطق ساحلی به آلودگی نفتی در نظر گرفت که این امر می‌تواند نقش مهمی در اتخاذ تصمیم‌های صحیح توسط مدیران داشته باشد (غیائی و همکاران، ۱۳۹۴).

### مبانی نظری تحقیق

دانه‌کار و شریفی پور در سال ۱۳۸۴ حساسیت فیزیکی نوار ساحلی استان بوشهر نسبت به آلودگی نفتی را بر اساس شاخص حساسیت محیطی (ESI) مورد بررسی قرار دادند. هدف از انجام این تحقیق ارائه روش‌های مدیریتی در سواحل استان بوشهر جهت

به عنوان یک عامل تأثیرگذار در ماندگاری نفت در منطقه ساحلی به طور کامل توصیف و در قالب نقشه های ESI طبقه بندی شده است. هدف اصلی این تحقیق تعیین حساسیت نسبی انواع منطقه ساحلی، الویت بندی خطوط ساحلی و منابع ساحلی جهت محافظت در هنگام آلودگی ناگهانی نفتی می باشد (Inbar and Adler, 2007). در تحقیق دیگری آسیب پذیری سواحل آمازون به آلودگی نفتی در کشور برزیل، به منظور توسعه مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی توسط Andrade و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق تنها شاخص های فیزیکی و اقتصادی - اجتماعی در تعیین حساسیت مانند وضعیت بیولوژیکی در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه پس از تجزیه و تحلیل مورفولوژیکی منطقه ساحلی، مناطق ماهیگیری مراکز جمعیتی، سطح تحصیلات و درآمد، شاخص آسیب پذیری بر اساس روابط بین پارامترهای ذکر شده و با استفاده از نرم افزار GIS و تصاویر با کیفیت تولید شده توسط سیستم سنجش از دور، تخمین زده شد و نقشه های مربوط به آسیب پذیری به دست آمد. این نقشه ها جهت الویت حفاظت از مناطق ساحلی در هنگام آلودگی نفتی مورد استفاده قرار گرفت (Andrade et al, 2010).

Guo و همکاران در سال ۲۰۱۹ برای بررسی میزان آلودگی توسط لکه های نفتی یک مدل احتمالی برای شبیه سازی نشت های فرضی متعدد از ۲۰ مکان میدان نفتی در دریای بوهای چین توسعه داد. سپس با ادغام نقشه توزیع مکانی عوامل محرک محیطی و آسیب پذیری ساحلی/دریایی نقشه ای از خطر نشت نفت در دریای بوهای ارائه داد (Guo et al, 2019). Balogun و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک مدل آسیب پذیری نشت نفت برای پیش بینی الگوی مسیر لکه های نفتی در مالزی توسعه دادند. بدین منظور از مدل ریاضی GNOME استفاده نمودند.

ساحلی نهایی و جنس سواحل تعیین شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق حاکی از آن است که در سواحل هرمزگان از غرب به شرق حساسیت زیست محیطی ناهمواری های ساحلی کمتر می شود. در مناطق با مقدار انرژی کم و ذرات ریز نیز به علت نفوذ جریانات نفتی به داخل لایه های زیرین، حساسیت زیستی ناهمواری های ساحلی افزایش می یابد. از لندفرم هایی که به طور گسترده در سواحل این استان یافت می شوند می توان به خور، مصب و جزیره سدی اشاره نمود (بذل راد و دانه کار، ۱۳۸۸). در سال ۱۹۹۷ در تحقیقی که توسط سازمان ملی هواشناسی و اقیانوس شناسی (NOAA) و با همکاری اداره ارزیابی و حفاظت از منابع اقیانوسی صورت پذیرفت حساسیت محیطی سواحل دریاچه اونتاریوی کانادا به آلودگی نفتی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف از انجام این تحقیق، تعیین حساسیت نسبی سواحل بر اساس پارامترهای فیزیکی (نوع ساحل، الگوهای انتقال رسوب، جنس بستر، موج، جریان جزر و مدی و ... منابع بیولوژی (پرندگان، ماهیان، پستانداران و ...) و منابع قابل استفاده توسط انسان (تفرجگاه ساحلی، مناطق ماهیگیری، مکان های تاریخی، معدن و ...) عنوان شده است. در مرحله بعد نقشه های حساسیت محیطی هر کدام از این پارامترها تولید و در نهایت حساسیت کلی منطقه ساحلی به آلودگی نفتی تهیه شده است. نقشه های تولیدی در این مرحله به عنوان ابزاری در اختیار کارشناسان، جهت واکنش به آلودگی نفتی قرار می گیرد (Joanne et al, ۱۹۹۷). به منظور تعیین حساسیت محیطی سواحل جنوب شرقی دریای مدیترانه به آلودگی نفتی، Adler و Inbar در سال ۲۰۰۷ سواحل فلسطین اشغالی را با استفاده از GIS مورد ارزیابی قرار داده و آسیب پذیری منابع ساحلی (اکوسیستم های طبیعی و منابع اقتصادی - اجتماعی) به این آلودگی ناگهانی را آنالیز نمودند. در این تحقیق ژئومورفولوژی منطقه ساحلی

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

خلیج فارس از سوی سازمان بین‌المللی دریانوردی و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد با استناد به کنوانسیون حقوق دریاها، دریای کم‌عمق و نیمه بسته اعلام شد که بین شبه جزیره عربستان و ایران واقع شده است و از راه تنگه هرمز با محور اصلی متمایل به جهت شمال غربی-جنوب شرقی به اقیانوس هند متصل شده است. خلیج فارس بعد از خلیج مکزیک و هودسن، سومین خلیج بزرگ جهان می‌باشد که در ۲۴ تا ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ تا ۵۶ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. طول تقریبی خلیج فارس ۹۹۰ کیلومتر بوده و بیشترین عرض آن در حدود ۳۳۸ کیلومتر می‌باشد. مساحت تقریبی منطقه در حدود ۲۳۷۴۷۳ کیلومترمربع گزارش شده و بیشترین عمق در حدود ۱۰۰ متر، در نزدیکی تنگه هرمز با خلیج عمان می‌باشد. خلیج فارس گرم‌ترین پهنه آبی دنیا با ریزش سالانه ۱۵۲ میلی‌متر در سال، شناخته شده و از نظر آب و هوایی شرایط خشک و نیمه‌استوایی دارد. نوسانات دمایی روزانه و فصلی در این ناحیه به علت احاطه شدن توسط دشت‌های خشک بالاست. خلیج-فارس تقریباً یک سوم نیازهای نفتی دنیا را فراهم می‌کند و به‌علت تعدد تاسیسات دریایی، کارگاه‌های پتروشیمی، کشتی‌های نفتی و... آلودگی نفتی بزرگ-ترین تهدید برای محیط‌زیست دریایی این منطقه محسوب می‌شود، همچنین به موجب کنوانسیون مارپول خلیج فارس «منطقه ویژه» معرفی شده است. مناطق ویژه دریایی مناطقی هستند که به دلایل شناخته شده فنی در ارتباط با شرایط اقیانوسی، اکولوژیکی و ویژگی‌های ترافیک دریایی در آن نیازمند حفاظت بیشتری هستند (حاج رسولیها، ۱۳۹۰؛ زرگر و نوروزی، ۱۳۹۵).

۱۲ سناریو در سه فصل آب و هوایی (موسمی شمال شرقی، موسمی جنوب غربی و پیش از مونسون) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تغییرات آب و هوایی به‌طور قابل توجهی بر آسیب پذیری منابع ساحلی در برابر ریزش‌های نفتی تأثیر می‌گذارد (Balogun et al, 2021).

آسیب‌پذیری سواحل خلیج فارس در برابر ریزش‌های نفتی در پژوهشی توسط آقاجانلو و همکاران در سال ۱۴۰۱ بررسی شد. در این پژوهش، براساس یک ساختار تصادفی، سناریوهای ریزش آبی از کشتی‌ها در فصول مختلف و با نوع نفت‌های متفاوت شبیه سازی شدند سپس با تلفیق نتایج مدل ریاضی سریع پردازنده GNOME و نرم‌افزار GIS، تجزیه و تحلیل نتایج بر اساس میزان مواجهه نواحی ساحلی با آلودگی، زمان ماند نفت در ساحل و ضریب پتانسیل آسیب رسانی انجام گرفت. در نهایت منطقه به ۵ سطح آسیب‌پذیر طبقه‌بندی شد. بندرهای بوشهر و عسلویه بالاترین ضریب پتانسیل آسیب‌رسانی به منطقه را به خود اختصاص دادند. همچنین بر اساس نتایج این پژوهش، آسیب‌پذیری سواحل به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات فصلی شرایط اقلیمی منطقه و وضعیت جریان قرار دارد (آقاجانلو و همکاران، ۱۴۰۱) در میان مطالعات صورت پذیرفته، ترکیب مناسب و کافی از معیارها برای مکان‌یابی آسیب‌پذیری خلیج فارس در نظر گرفته نشده است. بنابراین در این تحقیق سعی شد تا ضمن برطرف شدن کاستی‌های مطالعات پیشین، از روش مکانی رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی<sup>۷</sup> مکان‌یابی آسیب‌پذیری نفتی خلیج فارس استفاده شود.

<sup>۷</sup>Geographically weighted regression (GWR)

روش‌شناسی

داده‌های مکانی دارای ویژگی‌های خودهمبستگی مکانی و نایستایی مکانی هستند، از این رو کم‌تر می‌توان از رگرسیون‌های پایه استفاده کرد ( Murray et al, 2020). خودهمبستگی مکانی بر اساس قانون تابلر بیانگر رابطه معکوس وابستگی‌ها با فاصله است (Wen et al, 2019). نایستایی مکانی مفهومی مرتبط با خودهمبستگی مکانی است که بیانگر تغییر خودهمبستگی مکانی در فضا و ناهمگونی محیط است (Ye et al, 2020). اگر در مطالعه پدیده‌ای، خودهمبستگی مکانی موجود میان داده‌ها در ناحیه مورد مطالعه، از مکانی به مکان دیگر تغییر نماید، فرآیند مورد مطالعه را یک فرآیند نایستا یا ناهمگون می‌گویند. از طرف دیگر اگر همبستگی مکانی به دست آمده از مطالعه پدیده مورد نظر در تمام فضای مطالعه ثابت باشد، به آن پدیده، یک پدیده ایستا گفته می‌شود. در روش GWR، وابستگی‌های مکانی مشاهدات به صورت ماتریس‌های وزن در نظر گرفته می‌شوند و به دلیل ناهمگونی محیط و وجود نایستایی مکانی، ضرایب رگرسیون به صورت محلی به دست می‌آیند (Wu, 2020; Murakami, et al., 2020). معادله روش GWR از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (Fotheringham and Oshan, 2016; Zhou et al, 2020):

$$y_i = \sum_{j=0}^m \beta_j(u_i, v_i)x_j + \varepsilon_i \quad (1)$$

که  $y_i$  متغیر وابسته،  $x_j$  متغیرهای مستقل،  $m$  تعداد متغیرهای مستقل،  $\varepsilon_i$  باقیمانده مدل و  $\beta_j$  ضرایب رگرسیون هستند. در این روش، جهت محاسبه ماتریس وزن مکانی نیاز به مشخص کردن تابع هسته است. بر اساس نتایج تحقیقات پیشین، در این تحقیق از دو هسته گوسین و مکعبی سه‌گانه استفاده شد که

از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شود (Fotheringham and Oshan, 2016; Oshan et al, 2019):

$$W(u_i, v_i) = \varphi\left(\frac{d_{ij}}{b}\right) \quad (2)$$

$$W(u_i, v_i) = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right)^2 & |d_{ij}| < b \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

که  $d_{ij}$  فاصله دو نقطه  $i$  و  $j$ ،  $\varphi$  تابع توزیع نرمال استاندارد و  $b$  پهنای باند است. در روش GWR، نایستایی مکانی ضرایب توسط انحراف استاندارد از رابطه (۴) به دست می‌آید (Wu, 2020; Hong & Yoo, 2020):

$$SE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\beta_{ij} - \beta_j)^2}{n}} \quad (4)$$

که  $\beta_{ij}$  ضریب رگرسیون عامل  $j$  ام در مشاهده  $i$  ام،  $\beta_j$  میانگین ضریب رگرسیون عامل  $j$  ام در کل مشاهدات و  $n$  تعداد مشاهدات است. خروجی GWR شامل پارامترهای متعددی است که از آن میان معمولاً پارامتر ضریب تشخیص  $R^2$  برای سنجش مناسبیت برازش مدل و پارامتر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) جهت سنجش توزیع باقیمانده‌های مدل به کار می‌روند که به ترتیب، طبق روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند (Fotheringham and Oshan, 2016; Zeng et al, 2016):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

که  $n$  تعداد مشاهدات، مشاهده  $i$  ام، مقدار پیش‌بینی شده مشاهده  $i$  ام و میانگین مشاهدات است.

<sup>۱</sup>Root mean square error

<sup>۲</sup>Heterogeneity

### یافته‌های تحقیق

معیارهای مکانی (متغیرهای مستقل) مورد استفاده در این تحقیق شامل ۱۰ معیار می‌شود، که در جدول (۱) نمایش داده می‌شود.

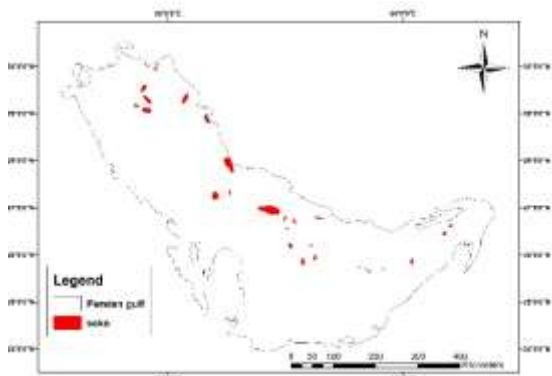
لایه‌های اطلاعاتی مربوط به سکوه‌های نفتی و مسیر عبور و مرور کشتی‌ها و نفتکش‌ها با استفاده از اطلاعات سازمان بنادر و کشتی‌رانی، لایه اطلاعاتی لوله‌های انتقال میعانات نفتی با استفاده از داده‌های وزارت نفت، لایه اطلاعاتی فلزات سنگین با استفاده از آمار و اطلاعات سازمان محیط‌زیست، لایه اطلاعاتی بنادر با استفاده از آمار سرشماری سال ۱۳۹۵ تهیه گردید.

به‌منظور تهیه لایه بارش از داده‌های سنجش از دور و تصاویر TRMM استفاده شد. همچنین لایه اطلاعاتی آلودگی هوا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel5

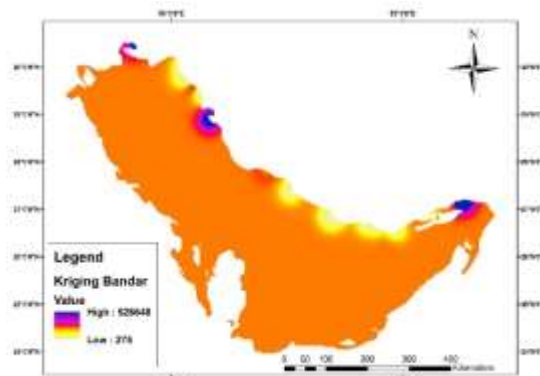
تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی نوسانات تراز آب، جریان‌ات دریایی و باد نیز با استفاده از Google Earth Engine تهیه گردید.

جدول ۱: معیارهای مورد مطالعه در این پژوهش

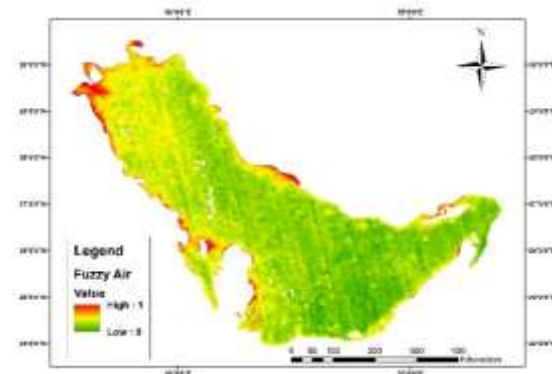
شماره	معیار مکانی
۱	بنادر
۲	سکوه‌های نفتی
۳	نوسانات تراز آب
۴	بارش
۵	باد
۶	جریان‌ات دریایی
۷	مسیر عبور و مرور کشتی و نفت کش‌ها
۸	آلودگی هوا
۹	فلزات سنگین
۱۰	لوله‌های انتقال میعانات نفتی



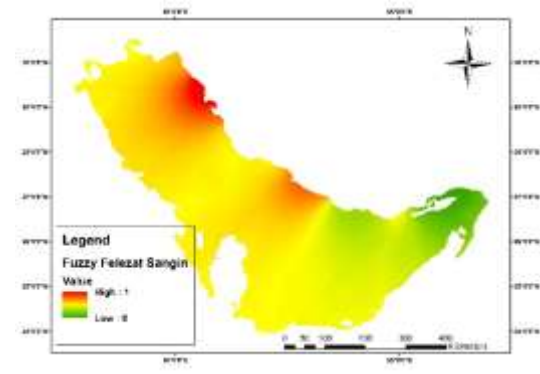
ب- سکوه‌های نفتی



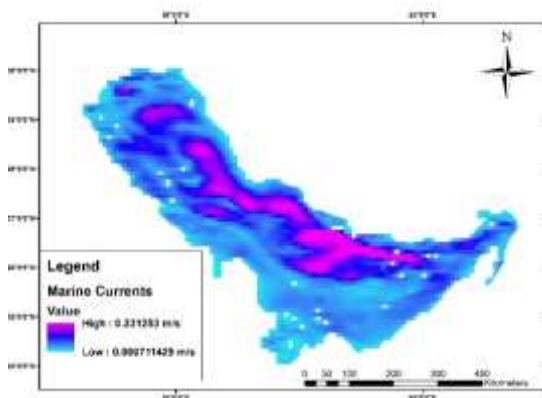
الف- جمعیت بندادر



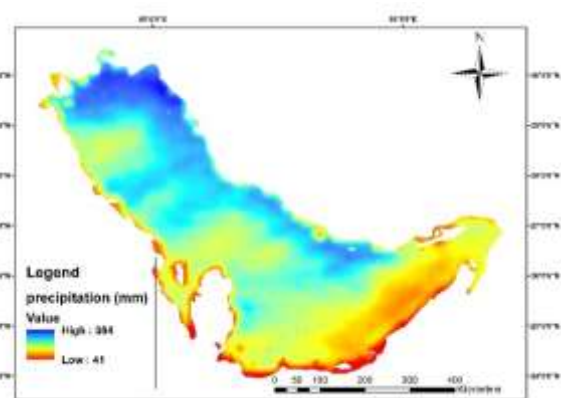
ت- آلودگی هوا



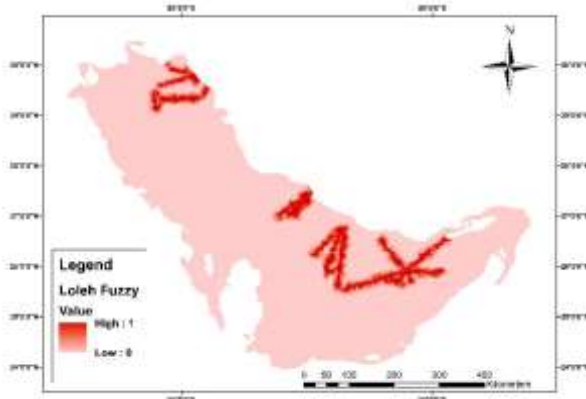
پ- فلزات سنگین



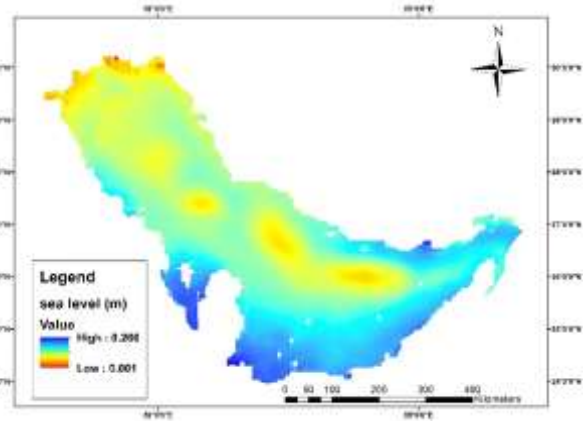
ج- جریانات دریایی



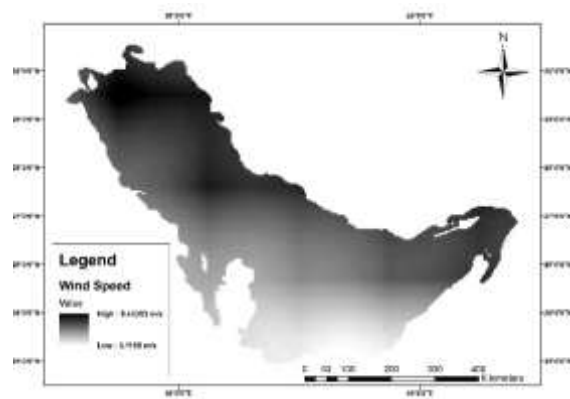
ث- بارندگی



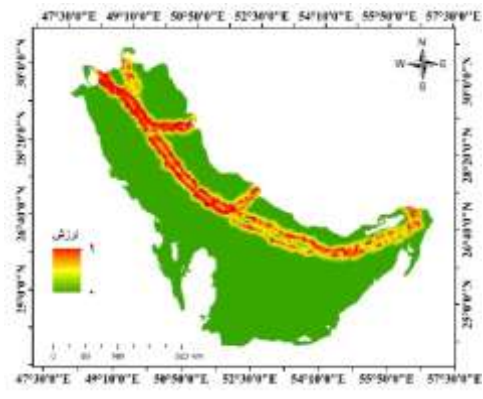
ح- مسیر عبور لوله های انتقال نفت



چ- نوسانات دریا



د- سرعت بادهای موسمی



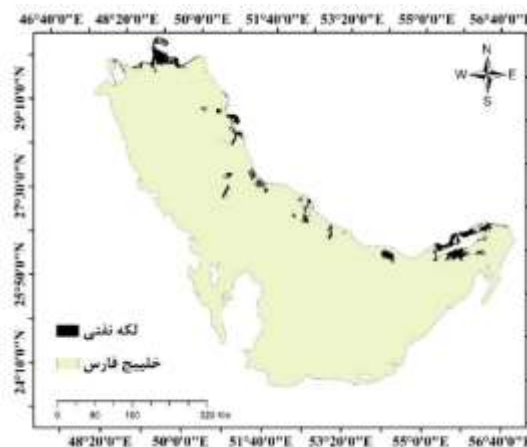
خ- مسیر عبور و مرور نفتکش ها

شکل ۱: نقشه نرمال شده معیارهای مکانی به کار برده شده در این تحقیق



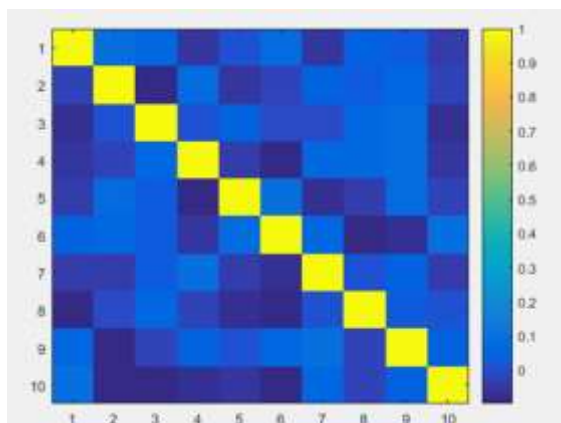
## آلودگی نفتی

جهت انتخاب لایه وابسته از طریق ماهواره سنتینل ۲ با استفاده از نسبت طیفی در محیط گوگل ارث انجین به پایش آلودگی نفتی منطقه پرداخته شده است. جهت تعریف متغیر وابسته با توجه به هدف این تحقیق به این گونه عمل شد که اطلاعات مربوط به آلودگی نفتی منطقه طی بازه زمانی سال های ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۰ توسط ماهواره سنتینل ۲ در محیط گوگل ارث انجین اخذ گردید. پس از مشخص کردن لایه آلودگی نفتی در محیط Arc Gis، نقاط تصادفی ایجاد شده‌ای که در این مناطق قرار گرفته باشند، مقدار یک و سایر نقاط مقدار صفر تخصیص داده می‌شوند.



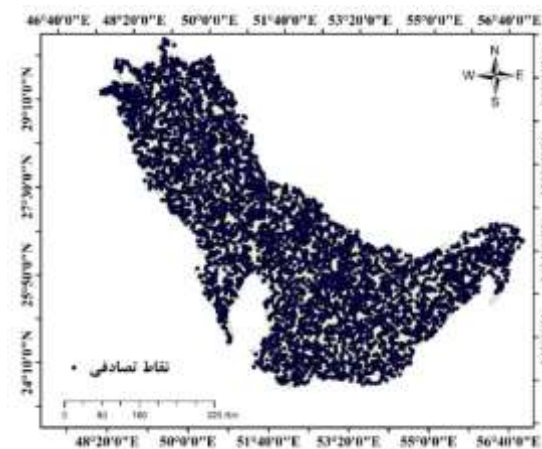
شکل ۲: نقشه آلودگی نفتی در محدوده خلیج فارس

پیش از اجرای الگوریتم GWR، ابتدا همبستگی بین معیارهای ذکر شده بررسی گردید. شکل (۳) ماتریس همبستگی (همبستگی پیرسون) معیارهای مکانی (ترتیب معیارها بر اساس جدول (۱)) را نشان می‌دهد (Aad et al, 2014). مقادیر ضریب همبستگی بین معیارها بین اعداد ۰/۳ و ۰ به دست آمد که نشان از عدم همبستگی بین معیارها مورد استفاده می‌باشد. بنابراین از تمام معیارها در الگوریتم‌ها استفاده گردید.



شکل ۳: ماتریس همبستگی متغیرهای مستقل

پس از بررسی همبستگی میان داده‌ها، تعداد ۱۰۰۰۰۰ داده آموزشی تولید شد (شکل (۴)). در تمام الگوریتم‌ها از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و از ۳۰ درصد باقی‌مانده برای آزمایش استفاده شده است. همچنین کلیه روش‌ها در محیط برنامه نویسی متلب پیاده سازی گردید.



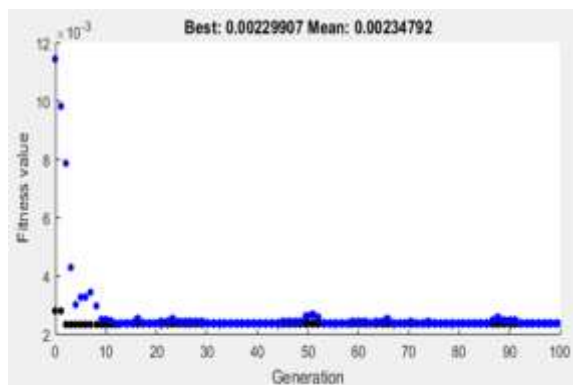
شکل ۴: نقاط تصادفی ایجاد شده

برای پیاده‌سازی روش GWR، مختصات نقاط تصادفی ایجاد شده نیز در راستای وزندهی به صورت هسته گوسین و مکعبی سه‌گانه به کار گرفته شده است.

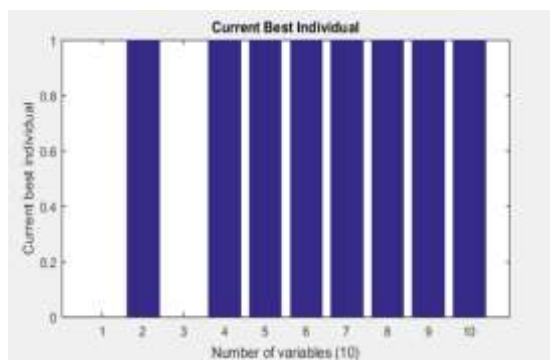
## رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR)

در تحقیق حاضر از هر دو هسته گوسین و مکعبی سه‌گانه در الگوریتم GWR استفاده گردید. پس از اجرای الگوریتم GWR با هسته گوسین، مقدار تابع

شناخته شد. شکل های (۸) و (۹) نتایج حاصل از رگرسیون وزن دار جغرافیایی را با هسته مکعبی سه گانه نشان می دهد.



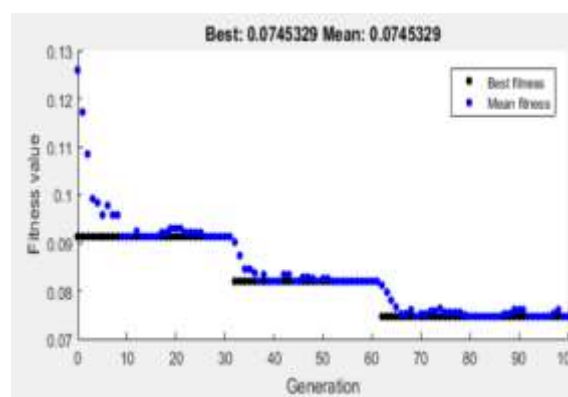
شکل ۸: بهترین مقدار و میانگین مقادیر تابع برازش برای ترکیب رگرسیون وزن دار جغرافیایی با هسته مکعبی سه گانه و الگوریتم ژنتیک



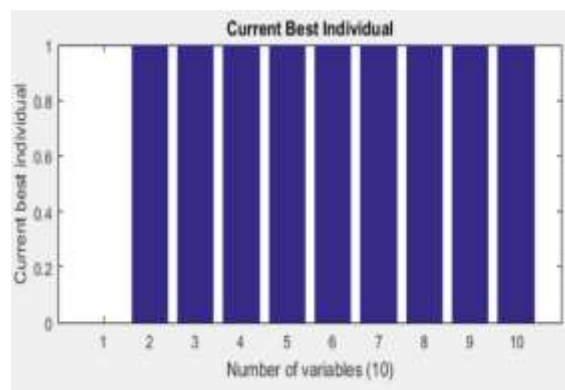
شکل ۹: بهترین ترکیب انتخاب شده از معیارها توسط الگوریتم ژنتیک با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی با هسته مکعبی سه گانه

شکل (۱۰) نقشه ریسک آسیب پذیری آلودگی نفتی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش GWR با دو هسته گوسین و مکعبی سه گانه را نشان می دهد.

برازش برابر با ۰/۰۷۴۵ به دست آمد و ۹ معیار بنادر، سکوهای نفتی، نوسانات تراز آب، بارش، جریانات دریایی، مسیر عبور و مرور نفت کش ها و کشتی ها، آلودگی هوا، فلزات سنگین، لوله های انتقال نفت به عنوان معیارهای مؤثر بر آسیب پذیری شناخته شد. شکل های (۶) و (۷) نتایج حاصل از رگرسیون وزن دار جغرافیایی را با هسته گوسین نشان می دهد.



شکل ۶: بهترین مقدار و میانگین مقادیر تابع برازش برای ترکیب رگرسیون وزن دار مکانی و الگوریتم ژنتیک



شکل ۷: بهترین ترکیب انتخاب شده از معیارها توسط الگوریتم ژنتیک با استفاده از رگرسیون وزن دار جغرافیایی با هسته گوسین

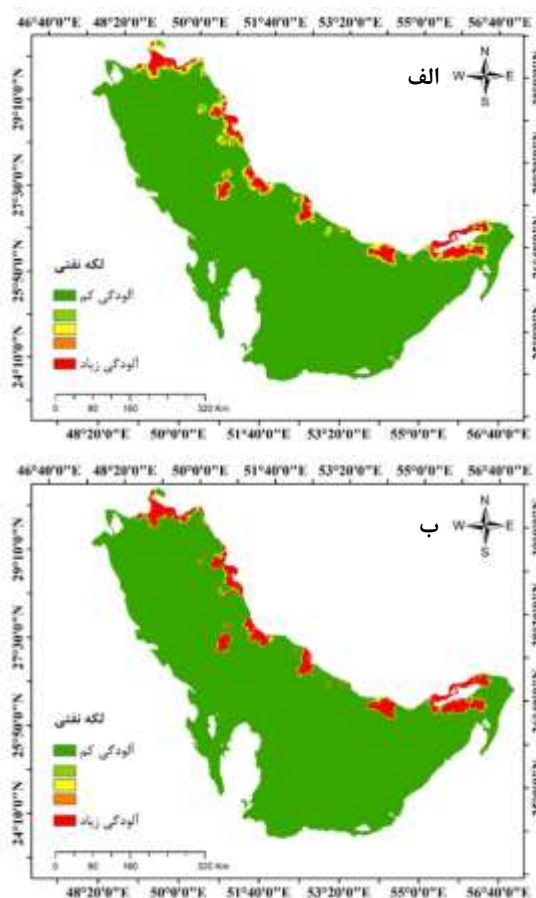
همچنین برای هسته مکعبی سه گانه مقدار تابع برازش برابر با ۰/۰۰۲۲ به دست آمد و ۸ معیار بنادر، سکوهای نفتی، بارش، جریانات دریایی، مسیر عبور و مرور کشتی ها، آلودگی هوا، فلزات سنگین و لوله های انتقال نفت به عنوان معیارهای مؤثر بر آلودگی

معیارهای مؤثر	هسته	هسته
لوله های انتقال نفت	۰/۰۶۸۹	مکعبی سه-گانه
سکوهای نفتی	۰/۰۳۵۶	
مسیر عبور و مرور کشتی ها	۰/۰۲۸۵	
بنادر	۰/۰۰۵۵	
فلزات سنگین	۰/۰۰۹۳	
نوسانات تراز سطح آب	۰/۰۱۵۴	
بارندگی	۰/۰۳۲۵	
جریانات دریایی	۰/۰۰۱۱	
آلودگی هوا	۰/۰۰۲۱	
بادهای موسمی	۰/۰۰۶۵	

با توجه به جدول (۳) در روش GWR با هسته گوسین، رابطه بین جریانات دریایی و ریسک آسیب پذیری کمتر تغییر خواهد کرد، اما رابطه بین معیار ریسک و لوله های انتقال نفت تغییرات بیشتری خواهد کرد. همچنین برای هسته مکعبی سه‌گانه، رابطه بین بارندگی و آسیب پذیری خلیج فارس کمتر تغییر خواهد کرد، اما رابطه بین معیار سکوهای نفتی و ریسک آسیب پذیری تغییرات بیشتری خواهد کرد. در نهایت از شاخص سراسری موران جهت تعیین خودهمبستگی مکانی باقیمانده‌های مدل GWR استفاده شد که از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Zemestani and Soori, 2019; Pu et al, 2017):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{X})(x_j - \bar{X})}{S_0 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

که  $x_i$  و  $x_j$  به ترتیب مقادیر میزان امن بودن نقاط تصادفی  $i$  و  $j$ ،  $W_{ij}$  وزن مکانی بین دو نقطه تصادفی  $i$  و  $j$ ،  $S_0$  مجموع کلیه وزن‌ها،  $\bar{X}$  متوسط مقادیر میزان امن بودن برای نقاط تصادفی و  $n$  تعداد کل نقاط تصادفی در منطقه مورد مطالعه است. جدول (۴) مقادیر شاخص سراسری موران را برای باقیمانده‌های مدل GWR با هسته مکعبی سه‌گانه نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: (الف) نقشه ریسک آلودگی با استفاده از روش GWR با کرنل گوسین، (ب) نقشه ریسک آلودگی با استفاده از روش GWR با کرنل مکعبی سه‌گانه

جدول (۲) نشان می‌دهد که هسته مکعبی سه‌گانه دقت و سازگاری بالاتری را نسبت به هسته گوسین در مکان‌یابی ریسک آسیب پذیری آلودگی نفتی در خلیج فارس داشته است. جدول (۳)، انحراف استاندارد ضرایب رگرسیون در روش GWR با دو هسته گوسین و مکعبی سه‌گانه را جهت محاسبه میزان تغییرات محلی و نایستایی مکانی نشان می‌دهد.

جدول ۲: معیارهای مورد مطالعه در این پژوهش

هسته	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE
گوسین	۰/۹۲۵۵	۰/۳۶۲۵	۰/۳۴۳۸
مکعبی سه‌گانه	۰/۹۹۷۸	۰/۲۱۴۲	۰/۱۹۹۲

جدول ۳: انحراف استاندارد ضرایب رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی با هسته گوسین و مکعبی سه‌گانه

نشان دهنده دقت بالای هسته مکعبی سه گانه است. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که لوله های انتقال نفت، سکوه های نفتی و مسیر عبور و مرور نفتکش ها تاثیر بسزایی در آسیب پذیری خلیج فارس دارد. با توجه به موفقیت روش ادغام داده محور مکانی به کار برده شده در این تحقیق پیشنهاد می گردد برای تحقیقات آتی از دیگر روش های مکانی مانند تخمین گشتاورهای تعمیم یافته برای مدل خود برگشت پذیر مکانی (GMM-SAR) و ماتریس نمایی مشخصات مکانی (MESS) استفاده نمود.

### منابع

آقاچانلو، کامله، محمدی، میرعلی، یادگارآزادی، و قاطعی. (۱۴۰۱). ارزیابی آسیب پذیری سواحل شمالی خلیج فارس در برابر ریزش های نفتی. محیط زیست و مهندسی آب، ۱۸(۱)، ۴۷-۶۲.

حاج رسولیها، امید. (۱۳۹۰). تاثیر فرایند فیزیکی بر بخش آلودگی های نفتی در خلیج فارس، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان.

دانه کار، ا، نیکو بذل راد، ا، (۱۳۸۸)، حساسیت زیست محیطی ناهمواری های ساحلی استان هرمزگان، دومین سمپوزیوم بین المللی مهندسی محیط زیست، تهران

زرگر، علی اصغر و نوروزی کلر می، زینب. (۱۳۹۵). مسئولیت و نقش دولت های حوزه خلیج فارس در حفاظت از محیط زیست، فصلنامه مطالعات روابط بین الملل، ۹(۳۳)، ۲۵۱-۲۸۱.

شریفی پور رزیتا؛ دانه کار افشین و دانه کار جعفرنوری. (۱۳۸۴). ارزیابی حساسیت فیزیکی نوار ساحلی استان بوشهر بر اساس شاخص حساسیت زیست محیطی ESI مجله علوم محیطی، شماره ۷، صص ۴۵-۵۲

شریفی پور رزیتا؛ دانه کار افشین و نوری جمشید. (۱۳۸۷). ارزیابی حساسیت زیست محیطی سواحل شمالی خلیج فارس با توجه به ارزشهای حفاظتی و کانون های آلوده ساز، فصلنامه محیط شناسی، ۴۸، ۱۰۲.

ضیائی بیگدلی، محمدرضا. (۱۳۸۰)، حقوق بین المللی عمومی. تهران: گنج دانش.

چنانچه فرآیند سرشکنی خطاها به درستی انجام شود، می باید باقیمانده های مدل دارای توزیع مکانی تصادفی باشند و مقدار این آماره نزدیک به صفر شود که در این صورت نشان دهنده توانایی بالای GWR در مدل سازی خودهمبستگی مکانی مشاهدات می باشد.

جدول ۴: مقایسه شاخص سراسری موران برای روش GWR با

دو هسته گوسین و مکعبی سه گانه

نوع هسته	شاخص موران	شاخص مورد انتظار	Z-Score	P-Value
گوسین	۰/۱۰۹	۰/۰۰۰۷۵۱	۱۵/۷۴۵	۰
مکعبی سه گانه	۰/۰۸۷	۰/۰۰۰۷۵۱	۱۶/۲۱۱	۰

طبق جدول (۴) برای روش GWR با هسته مکعبی سه گانه، شاخص موران دارای مقدار نزدیک تری به صفر (نسبت به هسته گوسین) است که نشان از توانایی بالای هسته مکعبی سه گانه در مدل سازی خودهمبستگی مکانی مشاهدات دارد.

### نتیجه گیری

همان طور که ذکر شد، آلودگی نفتی یکی از اصلی ترین آلودگی های خلیج فارس می باشد. لذا شناسایی مناطق آسیب پذیر و پر ریسک از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. جهت نیل به هدف این تحقیق، از روش مکانی رگرسیون وزن دار جغرافیایی (هسته گوسین و مکعبی سه گانه) جهت مکان یابی آسیب پذیری آلودگی نفتی خلیج فارس بر اساس معیارهای مؤثر استفاده شد. نتایج نشان داد که هسته مکعبی سه گانه نتایج بهتری را نسبت به هسته گوسین در اختیار قرار می دهد. مقدار  $R^2$  حاصل از روش GWR با هسته گوسین و مکعبی سه گانه به ترتیب برابر ۰/۹۲۵۵ و ۰/۹۹۷۱ به دست آمد که نشان دهنده سازگاری بالای هسته مکعبی سه گانه با داده های این تحقیق می باشد. همچنین مقدار RMSE حاصل از روش GWR با هسته گوسین و مکعبی سه گانه به ترتیب برابر ۰/۳۶۲۵ و ۰/۲۱۴۲ به دست آمد که

<sup>۱</sup>Generalized Method of Moments Estimation for Spatial Autoregressive Matrix Exponential Spatial Specification

- Oshan, T. M., Li, Z., Kang, W., Wolf, L. J., & Fotheringham, A. S. (2019). mgwr: A Python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial heterogeneity and scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6), 269.
- Pu, H., Luo, K., Wang, P., Wang, S., & Kang, S. (2017). Spatial variation of air quality index and urban driving factors linkages: Evidence from Chinese cities. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4457-4468.
- Shao, M., Han, Z., Sun, J., Xiao, C., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. *Renewable Energy*, 157, 377-403.
- Wen, H., Zhang, X., Zeng, Q., Lee, J., & Yuan, Q. (2019). Investigating spatial autocorrelation and spillover effects in freeway crash-frequency data. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 219.
- Vafai, F., Hadipour, V., & Hadipour, A. (2013). Determination of shoreline sensitivity to oil spills by use of GIS and fuzzy model. Case study-The coastal areas of Caspian Sea in north of Iran. *Ocean & Coastal Management*, 71, 123-130.
- Wu, D. (2020). Spatially and temporally varying relationships between ecological footprint and influencing factors in China's provinces Using Geographically Weighted Regression (GWR). *Journal of Cleaner Production*, 261, 121089.
- Ye, X., Yu, X., & Wang, T. (2020). Investigating spatial non-stationary environmental effects on the distribution of giant pandas in the Qinling Mountains, China. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00894.
- Zemestani, A., & Soori, H. (2019). Relationship between fatal road traffic injury rates and Human Development Index in Iran. *Journal of Injury and Violence Research*, 11(4 Suppl 2).
- Zeng, C., Yang, L., Zhu, A. X., Rossiter, D. G., Liu, J., Liu, J., ... & Wang, D. (2016). Mapping soil organic matter concentration at different scales using a mixed geographically weighted regression method. *Geoderma*, 281, 69-82.
- طالع زاری، م، ۱۳۹۵. آیا صنعت کشتیرانی برای مدیریت پالایش آب توازن کشتی‌ها آماده است؟ کنوانسیون جدید در راه است. پیام دریا، ۲۳۸، ۹۲-۹۵.
- غیاثی رضا؛ زهره حیدریها جمشید و محمودی مقدم امین. (۱۳۹۴). شبیه سازی عددی مدل آلودگی نفتی در سواحل شمال غربی خلیج فارس. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۱۷۴-۱۶۵، (۱)۴۷.
- Aad, G., Abbott, B., Abdallah, J., Khalek, S. A., Aben, R., Abi, B., ... & Barlow, N. (2014). Measurements of spin correlation in top-antitop quark events from proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV using the ATLAS detector. *Physical Review D*, 90(11), 112016.
- Adler, E., & Inbar, M. (2007). Shoreline sensitivity to oil spills, the Mediterranean coast of Israel: Assessment and analysis. *Ocean & Coastal Management*, 50(1-2), 24-34.
- Asif, Z., Chen, Z., An, C., & Dong, J. (2022). Environmental Impacts and Challenges Associated with Oil Spills on Shorelines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(6), 762.
- Balogun, A.L., Yekeen, S. T., Pradhan, B., & Yusof, K. B. W. (2021). Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS. *Environmental Pollution*, 268, 115812.
- Fotheringham, A. S., & Oshan, T. M. (2016). Geographically weighted regression and multicollinearity: dispelling the myth. *Journal of Geographical Systems*, 18(4), 303-329.
- Guo, W., Zhang, S. and Wu, G., 2019. Quantitative oil spill risk from offshore fields in the Bohai Sea, China. *Science of the total environment*, 688, pp.494-504.
- Hadipour, V., Vafaie, F., & Deilami, K. (2020). Coastal flooding risk assessment using a GIS-based spatial multi-criteria decision analysis approach. *Water*, 12(9), 2379.
- Hong, I., & Yoo, C. (2020). Analyzing spatial variance of Airbnb pricing determinants using multiscale GWR approach. *Sustainability*, 12(11), 4710.
- Joanne N, Halls, "Sensitivity of Coastal Environments and Wildlife to Spilled Oil: Lake Ontario", National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Office of Ocean Resources Conservation and Assessment, Seattle, Washington 98115; and Research Planning, Inc., 1200 Park Street, Post Office Box 328, Columbia, South Carolina 29202, April 1997.
- de Andrade, M. M. N., Szlafsztein, C. F., Souza-Filho, P. W. M., dos Reis Araújo, A., & Gomes, M. K. T. (2010). A socioeconomic and natural vulnerability index for oil spills in an Amazonian harbor: a case study using GIS and remote sensing. *Journal of environmental management*, 91(10), 1972-1980.
- Murakami, D., Tsutsumida, N., Yoshida, T., Nakaya, T., & Lu, B. (2020). Scalable GWR: A linear-time algorithm for large-scale geographically weighted regression with polynomial kernels. *Annals of the American Association of Geographers*, 111(2), 459-480.
- Murray, A. T., Xu, J., Baik, J., Burtner, S., Cho, S., Noi, E., ... & Zhou, E. (2020). Overview of Contributions in Geographical Analysis: Waldo Tobler. *Geographical Analysis*, 52(4), 480-493.

## **Predicting the vulnerability of oil spill in the Persian Gulf using artificial intelligence methods in the GIS**

**Mobin Eftekhari<sup>1</sup> Seyed Ahmad Eslaminezhad<sup>2</sup> AbbasAli Ghezsofloo<sup>3</sup> Melika Rastgoo<sup>4</sup>**

Master of Science (MSc), Civil Engineering, Water and Hydraulic Structures, Young Researchers and Elite Club, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

[Mobineftekhari@yahoo.com](mailto:Mobineftekhari@yahoo.com)

### **Abstract**

The Persian Gulf contains a significant part of the world's oil reserves. Generally, oil spill is one of the main pollutions in this region. Determining the degree of sensitivity of coastal areas to this type of pollution is the first step to control and prevent oil pollution. The aim of this research is to predict the vulnerability of oil spill in the Persian Gulf. Therefore, in this research the criteria of oil pipelines, oil platforms, shipping lanes, ports, heavy metals, water level fluctuations, rainfall, sea currents, air pollution and monsoons were used to determine the high-risk areas vulnerable to oil in the Persian Gulf. The innovation of the current research is to provide a new hybrid approach to determine the effective vulnerability criteria of the Persian Gulf. In this regard, the combination of geographic weighted regression (Gaussian and triple cubic kernels) and particle swarm optimization algorithm were used. The proposed hybrid method is suitable for spatial regression problems because it is compatible with two unique properties of spatial data, namely spatial autocorrelation and spatial non-stationary. The values of R<sup>2</sup> and RMSE obtained from the GWR method with the triple cube kernel were 0.9971 and 0.2142, respectively, which indicates the high consistency of the triple cube kernel compared to the Gaussian kernel. Also, the obtained results showed that oil transfer pipes, oil platforms and the passage of oil tankers have a significant impact on the vulnerability of the Persian Gulf.

**Key words:** Geographically weighted regression (GWR), Oil spill, Persian Gulf.