

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1404.11.1.9.8

درصد همانندی: ۳٪

بررسی روند تغییرات آلودگی نفتی در رودخانه کرج با استفاده از مدل سازی عددی

محسن اسدی^۱، امیر حسین جاوید^۲، سارا الهیاری بیک^۳، میر مسعود خیر خواه زرکش^۴

^۱ گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران mohsenasadi827@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. ahjavid@iau.ac.ir

^۳ گروه فیزیک، دانشکده علوم و فناوری های همگرا، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. s.allahyaribeik@iau.ac.ir

^۴ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، مؤسسه تحقیقات حفاظت خاک و آب خیزداری، تهران، ایران. kheirkhahzarkesh96@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

آلودگی نفتی آب های سطحی و رودخانه ها، از مهمترین چالش های محیط زیستی بوده و اثرات مخربی بر اکوسیستم و کیفیت آب دارد. رودخانه کرج، به عنوان یک از منابع تامین آب شرب کرج و بخشی از تهران، طی سال های اخیر شاهد چندین رخداد نشت گازوئیل بوده است. در تحقیق حاضر روند تغییرات مکانی/زمانی آلودگی نفتی ناشی از گازوئیل، در سه کیلومتری رودخانه کرج (سروداران - بیلقان)، با استفاده از مدل سازی عددی یک بعدی در نرم افزار MIKE11، مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی جریان بر پایه حل معادلات پیوستگی و مومنتوم و شبیه سازی رفتار آلاینده بر اساس معادله انتقال-پخش یک بعدی و حل عددی معادلات حاکم با بهره گیری از روش تفاضل های محدود و الگوی ضمنی Abbott-Ionescu صورت گرفت. دو سناریوی عددی شامل نشت آبی و نشت پیوسته گازوئیل با حجم ثابت شبیه سازی شد. نتایج نشان داد در سناریوی نشت آبی، تغییرات غلظت در زمان رفتار شوک مانند داشته و غلظت آلاینده در حدود ۱۰ ثانیه پس از وقوع نشت به مقدار بیشینه $C_{max} = 29/5 \text{ mg/L}$ می رسد و سپس تحت تأثیر فرآیندهای انتقال و زوال با ضریب عددی $k = 0/003 \text{ s}^{-1}$ کاهش یافته و پس از حدود ۱/۵ دقیقه به مقدار $12/6 \text{ mg/L}$ در پایین دست بازه مورد مطالعه می رسد. در سناریوی نشت پیوسته غلظت آلاینده در بالادست $0/2 \text{ mg/L}$ می باشد که به دلیل توزیع زمانی یکنواخت ترو هم زمانی با سرعت جریان متوسط $U = 3/3 \text{ m/s}$ ، غلظت آلاینده سریع تر به شرایط شبه پایدار رسیده و مقدار آن در پایین دست به حدود $3/1 \text{ mg/L}$ می رسد. بر اساس تحلیل های عددی، مدل MIKE ۱۱ با سطح انطباق $R^2 = 0/88$ توانسته است رفتار واقعی آلاینده را با اختلاف کمتر از ۲۵٪ پیش بینی نماید و نتایج بیانگر آن است که مدل سازی عددی می تواند ابزاری قابل اتکا برای تحلیل ریسک، پایش کیفی و طراحی سامانه های مدیریت بحران نشت آلودگی نفتی در رودخانه های تأمین کننده آب شرب ایران باشد.

واژه های کلیدی: رودخانه کرج، آلودگی نفتی، انتقال آلاینده، نشت گازوئیل، مدل سازی عددی، MIKE11

۱. مقدمه

آب شیرین به عنوان یکی از منابع حیاتی برای تداوم حیات، سهمی اندک از کل منابع آب کره زمین را تشکیل می دهد و در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه خشک نظیر ایران، هم زمان با فشارهای کمی، با تهدیدهای جدی کیفی نیز مواجه است [۱]. رودخانه کرج به عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب شهرهای کرج و بخش هایی از تهران، طی سال های اخیر با رخدادهای متعدد نشت گازوئیل روبه رو بوده است، رخدادهایی که حتی در حجم های اندک نیز منجر به تغییر بو و طعم آب و در برخی موارد توقف موقت تأمین آب شرب شده اند. این شرایط، در کنار وابستگی شدید جمعیتی و صنعتی به این منبع، ضرورت توسعه ابزارهای علمی دقیق برای پایش، پیش بینی و مدیریت آلودگی های نفتی را بیش از پیش آشکار می سازد.

مطالعات بین المللی نشان می دهند که نشت های نفتی در محیط های رودخانه ای، به دلیل ماهیت جریان، آشفته گی بالا و قابلیت انتقال سریع آلاینده، پیامدهایی پیچیده تر و ماندگارتر نسبت به محیط های ایستا یا خشکی ایجاد می کنند [۲،۳]. سرنوشت آلودگی نفتی در محیط های آبی تحت تأثیر مجموعه ای از فرآیندها از جمله تبخیر، امولسیون سازی، انتشار، اکسیداسیون نوری، ته نشینی، تجزیه زیستی، انتقال عمودی و گسترش سطحی قرار دارد [۴،۵]. شدت و سرعت این فرآیندها به عوامل هیدرودینامیکی نظیر سرعت جریان، میزان آشفته گی، شرایط دمایی و همچنین ویژگی های فیزیکی- شیمیایی آب و آلاینده وابسته است [۶،۷].

با توجه به محدودیت های مطالعات میدانی از نظر هزینه، پیچیدگی فنی و عدم امکان بازتولید دقیق شرایط نشت، مدل سازی عددی به عنوان ابزاری کارآمد و قابل اتکا برای تحلیل رفتار آلودگی نفتی در رودخانه ها مورد توجه گسترده قرار گرفته است. مدل های عددی یک بعدی، با تکیه بر حل معادلات جریان آزاد و انتقال- پخش آلاینده، این امکان را فراهم می کنند که سناریوهای مختلف نشت و شرایط هیدرولیکی متغیر به صورت کمی، تکرارپذیر و قابل مقایسه بررسی شوند [۸،۹].

در این پژوهش، شبیه سازی هیدرودینامیک جریان و انتقال آلودگی نفتی در رودخانه کرج با استفاده از مدل عددی یک بعدی AD در نرم افزار MIKE ۱۱ انجام شده است. رفتار جریان آزاد در رودخانه بر پایه حل معادلات پیوستگی و مونتوم یک بعدی (معادلات سن ونان) توصیف می شود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

که در آن A سطح مقطع جریان، Q دبی، h تراز سطح آب، S_0 شیب بستر و S_f شیب افت انرژی است.

انتقال و پخش آلودگی نفتی ناشی از گازوئیل نیز با استفاده از معادله انتقال-پخش یک بعدی همراه با ترم زوال مدل سازی شده است:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC \quad (3)$$

که در آن C غلظت آلاینده، U سرعت متوسط جریان، D ضریب پخش طولی و k ضریب زوال عددی آلاینده است. حل عددی معادلات حاکم با استفاده از روش تفاضل های محدود و به کارگیری الگوی ضمنی Abbott-Ionescu انجام شده است. این الگوی عددی به دلیل پایداری بالا و قابلیت حل هم زمان معادلات جریان و انتقال آلاینده، به طور گسترده در شبیه سازی سامانه های رودخانه ای مورد استفاده قرار می گیرد [۸،۱۰].

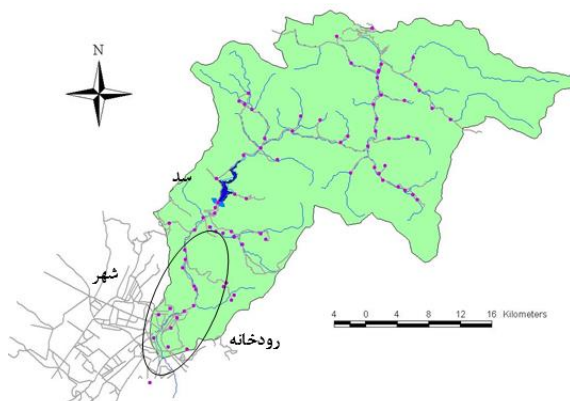
مدل عددی در بازه ای واقعی به طول سه کیلومتر از رودخانه کرج (سروداران- بیلقان) پیاده سازی شد و دو سناریوی نشت آنی^۱ و نشت پیوسته^۲ گازوئیل بر اساس داده های واقعی هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش، ضمن شناسایی الگوهای مکانی- زمانی انتشار آلودگی نفتی و نقاط بحرانی رودخانه، می تواند مبنای علمی مناسبی برای طراحی سامانه های هشدار سریع، پایش کیفی مستمر و مدیریت بحران نشت های نفتی در منابع آب شرب حساس کشور فراهم آورد و به عنوان الگویی قابل تعمیم در سایر حوضه های آبریز ایران مورد استفاده قرار گیرد [۱۱،۱۲].

آب سطحی را فراهم می‌کنند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های هیدرولوژیکی با مدل‌های عددی می‌تواند دقت پیش‌بینی انتشار آلاینده‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد و به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت کیفی منابع آب و برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات آلودگی مورد استفاده قرار گیرد [۱۸].

۲. مواد و روش‌ها

با توجه به مشخصات هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، مسیر عبور جریان و نقاط بالقوه ورود آلودگی نفتی، محدوده مورد مطالعه برای شبیه‌سازی عددی روند تغییرات آلودگی نفتی در رودخانه کرج، حدفاصل روستای سروداران تا آبگیر بیلقان به طول تقریبی ۳ کیلومتر انتخاب شد. این بازه به‌دلیل قرارگیری در پایین‌دست سد تنظیمی کرج و حساسیت بالا از نظر تأمین آب شرب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به‌منظور تعریف هندسه رودخانه، از نقشه‌های ۵۰۰:۱ مطالعات حد بستر و حریم رودخانه کرج تهیه‌شده توسط سازمان آب منطقه‌ای تهران استفاده شد، نقشه‌های ۲ و ۱ این نقشه‌ها پس از رقوم‌سازی، یکپارچه‌سازی و ایجاد سامانه مختصات مرجع یکنواخت، برای استخراج محور رودخانه و مقاطع عرضی مورد استفاده قرار گرفتند.



نقشه ۱. محدوده مطالعه رودخانه کرج [۱۹]

در سال‌های اخیر، آلودگی‌های نفتی و هیدروکربنی در بسیاری از رودخانه‌های کشور به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای کیفی منابع آب مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این میان، رودخانه اروند رود به‌دلیل قرارگیری در منطقه‌ای با فعالیت‌های گسترده نفتی، کشتیرانی و صنایع پتروشیمی از جمله سامانه‌های آبی حساس کشور محسوب می‌شود. مطالعات انجام‌شده در این منطقه نشان داده‌اند که ورود ترکیبات نفتی و هیدروکربنی می‌تواند باعث افزایش غلظت آلاینده‌های آلی، کاهش کیفیت زیستی آب و ایجاد مخاطرات جدی برای اکوسیستم‌های آبی شود. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که بر اساس استانداردهای جهانی، سواحل رودخانه اروند از نظر هیدروکربن‌های نفتی در شرایط فاقد آلودگی و کمی آلوده قرار دارند. پخش و انتشار لکه نفتی در اروند رود تابع وسعت منطقه و شرایط محیطی از جمله تنش باد و جریان جزرو مدی، مکان و زمان است [۱۳، ۱۴].

علاوه بر اروند رود، بررسی آلودگی‌های نفتی و شیمیایی در سایر رودخانه‌های کشور نیز مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، مطالعات انجام‌شده در رودخانه کارون نشان داده‌اند که ورود پساب‌های صنعتی، فعالیت‌های نفتی و حمل‌ونقل آبی می‌تواند منجر به افزایش غلظت ترکیبات هیدروکربنی و فلزات سنگین در آب و رسوبات رودخانه شود [۱۵، ۱۶]. همچنین پژوهش‌هایی در رودخانه‌ها از جمله زاینده‌رود نشان داده‌اند که انتشار آلاینده‌ها در محیط‌های رودخانه‌ای به شدت تابع شرایط هیدرولیکی جریان، ضریب پخش طولی و فرآیندهای رقیق‌سازی است و استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی رفتار آلاینده‌ها در سناریوهای مختلف آلودگی باشد [۱۷]. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های عددی هیدرودینامیکی و انتقال-پخش، از جمله مدل‌هایی نظیر MIKE ۱۱، به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌ها در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل‌ها با شبیه‌سازی همزمان جریان و فرآیند انتقال آلاینده، امکان بررسی سناریوهای مختلف آلودگی و ارزیابی ریسک انتشار آلاینده‌ها در منابع

در قالب فایل های مستقل با پسوندهای مشخص تعریف شده و از طریق فایل شبیه ساز به یکدیگر مرتبط می شوند. مهم ترین فایل های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده اند.

جدول ۲. انواع فایل های مورد استفاده در Mike ۱۱ و پسوند آنها

انواع فایل های Mike 11	پسوند فایل ها
فایل شبکه	*.NWK11
فایل سطح مقطع	*.XNS11
فایل شرایط مرزی	*.BND11
فایل سری زمانی	*.DFS0
فایل پارامترهای HD	*.HD11
فایل پارامترهای AD	*.AD11
فایل پارامترهای WQ	*.WT
فایل پارامترهای ST	*.ST
فایل پارامترهای FF	*.FF
فایل بارندگی و رواناب	*.RR
فایل شبیه ساز	*.SIM11
فایل نتایج	*.RES11

جهت تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان، ابتدا مشخصات هیدرولیکی، شامل بده جریان، ضریب مانینگ و هندسه مقطع رودخانه، که به عنوان اطلاعات ورودی مورد نیاز جهت شبیه سازی ریاضی و فیزیکی رودخانه ها و محاسبات هیدرولیکی جریان مورد نیاز می باشد، محاسبه شدند [۲۰، ۲۱]. سپس مدل سازی و شبیه سازی جریان با استفاده از نرم افزار ۱۱ MIKE انجام گرفته و نتایج مربوط به اجرای سناریوهای نشت و تحلیل غلظت مواد نفتی در پایین دست رودخانه در مدل عددی انجام گرفت. فرضیات مدل سازی عبارتند از:

- ۵ مقطع شاخص در بازه ۳ کیلومتری روستای سروداران تا ایستگاه آبگیر بیلقان جهت مدل سازی در نظر گرفته شد.
- جریان رودخانه بصورت یکنواخت و ماندگار و دبی جریان متوسط بدلیل خروجی سد تنظیمی پایین دست بصورت ثابت ۱۵/۳۲ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد.



نقشه ۲. رودخانه کرج حدفاصل روستای سروداران تا آبگیر بیلقان [۱۹]

به منظور تحلیل آبدهی رودخانه، آمار ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۰) ایستگاه های هیدرومتری مرتبط با حوضه رودخانه کرج بررسی شد. مقادیر دبی محدوده مورد مطالعه در پایین دست سد کرج برای دوره های بازگشت مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر دبی های محدوده مطالعاتی رودخانه کرج در پایین دست سد با دوره بازگشت مختلف [۱۹]

دوره بازگشت (سال)	دبی (m ³ /s)
۲	۶۳
۵	۱۰۳
۱۰	۱۳۰
۲۵	۱۶۳
۵۰	۱۸۷
۱۰۰	۲۱۰
۲۰۰	۲۳۳

با توجه به عملکرد تنظیمی سد کرج، دبی جریان در دوره شبیه سازی به صورت ماندگار و ثابت و برابر با ۱۵/۳۲ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد. به منظور مدل سازی عددی انتقال و پخش آلودگی نفتی، از ماژول انتقال-پخش (AD)^۳ نرم افزار ۱۱ MIKE استفاده شد. این نرم افزار یک مدل عددی یک بعدی مبتنی بر حل معادلات سنو نان و معادله انتقال-پخش است و برای شبیه سازی رودخانه ها و کانال های روباز به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد [۸، ۱۰]. در ۱۱ MIKE، اطلاعات مورد نیاز مدل

پایین دست به حدود $C_d \approx 10/2 \text{ mg/L}$ ثبت/برآورد شد. این سناریو ماهیت گذرای شدید داشته و حساس به تعریف صحیح شرط مرزی زمانی (پالس) است.

- سناریوی نشت پیوسته: تزریق یکنواخت و با شدت ثابت، با $C_0 \approx 0/2 \text{ mg/L}$ در محل ورود، که در پایین دست مقادیر به $3/1 \text{ mg/L}$ افزایش یافته است. در این حالت استفاده از شرط مرزی با غلظت ثابت در بالادست از نظر فیزیکی قابل دفاع است.

هر دو سناریو در یک بازه زمانی شبیه سازی کافی اجرا شدند تا عبور کامل جبهه آلودگی از مقاطع هدف ثبت شده و پارامترهایی شامل پیک غلظت، دنباله زمانی، زمان رسیدن اوج و میزان پخش مؤثر طولی در خروجی ها استخراج شود.

۳-۱. مبانی تئوری ماژول AD در MIKE 11

ماژول (AD) در نرم افزار MIKE 11 به منظور شبیه سازی تغییرات غلظت یک یا چند مؤلفه کیفی (مانند TPH) در امتداد محور طولی رودخانه، تحت اثر جریان هیدرودینامیکی محاسبه شده در ماژول HD، طراحی شده است. اساس این ماژول، حل عددی معادله حاکم بر انتقال-پخش یک کمیت اسکالر با در نظر گرفتن فرآیندهای واپاشی یا تجزیه بیولوژیکی است [۱۰].

در حالت کلی، تغییرات غلظت $C(x,t)$ در یک رودخانه با دبی منحنی دار و سطح مقطع متغیر به صورت زیر بیان می شود [۸،۲۰]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U(x,t) \frac{\partial C}{\partial x} = D_L(x,t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC + S(x,t) \quad (4)$$

که در آن:

$U(x,t)$: سرعت جریان در محور طولی (m/s) - از خروجی ماژول HD استخراج می شود.

$D_L(x,t)$: ضریب انتشار طولی (m^2/s)، تابع هندسه و رژیم جریان.

k : ضریب زوال (s^{-1}) یا نرخ تجزیه مرتبه اول هیدروکربن ها. $S(x,t)$: چشمه یا منبع آلودگی جانبی ($mg/L \cdot s^{-1}$)، که برای این مطالعه صفر است مگر در شرایط مرزی بالادست. حل

- زبری بستر و ضریب مانینگ مسیر رودخانه براساس مشاهدات مطابق با واقعیت میدانی و محاسباتی $0/35$ در نظر گرفته شد.

- متوسط جریان $H \approx 2/44 \text{ m}$ ، و سرعت متوسط مقطع $U \approx 3/3 \text{ m/s}$ در نظر گرفته شد.

- ضرایب انتشار طولی در بازه $[0/80, 0/25] \text{ m}^2/s$ و ضریب زوال مرتبه اول $k = 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ تنظیم شدند، شرط کورانت در محدوده پایدار $0/22 \leq Cr \leq 0/15$ حفظ گردید [۷،۸،۱۰].

- مسیر رودخانه از نوع کوهستانی با شیب زیاد می باشد.

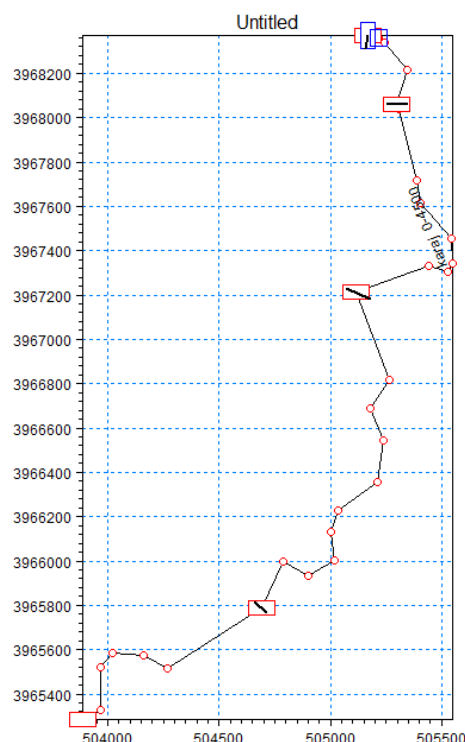
- دو سناریو برای ریزش گازوئیل با حجم معین ثابت 4000 لیتری به رودخانه شامل تخلیه آنی و سناریو دوم نشتی مستمر می باشد. در هر دو سناریو، انتقال و پخش آلاینده در طول رودخانه به صورت عددی شبیه سازی و تغییرات غلظت در مقاطع پایین دست مورد تحلیل قرار گرفت [۱۲].

در این پژوهش گام مکانی و گام زمانی مدل با توجه به شرایط پایداری عددی معادله انتقال-پخش تعیین شدند. برای این منظور مقدار عدد کورانت به عنوان یکی از معیارهای پایداری مورد بررسی قرار گرفت و با انتخاب مناسب گام زمانی و مکانی، مقدار آن در محدوده $0/22 \leq Cr \leq 0/15$ نگه داشته شد تا پایداری و دقت حل عددی مدل تضمین شود.

۳. مدل سازی و سناریوهای شبیه سازی کیفی

هدف اصلی مدل سازی کیفی در این پژوهش، برآورد تغییرات زمانی-مکانی غلظت کل آلودگی نفتی (TPH) در بازه مورد مطالعه رودخانه کرج و مقایسه پاسخ هیدرودینامیکی-کیفی رودخانه تحت دو الگوی متفاوت رهاسازی آلودگی، شامل نشت آنی و نشت پیوسته، است. به منظور دستیابی به این هدف، انتقال و پخش آلاینده در امتداد محور طولی رودخانه با استفاده از مدل عددی MIKE 11 و ماژول انتقال-پخش (AD) شبیه سازی شد [۱۰].

- سناریوی نشت آنی: تزریق پالس کوتاه مدت آلودگی با غلظت اولیه نزدیک منبع $C_0 \approx 29/5 \text{ mg/L}$ که در



شکل ۱. پروفیل طولی بستر رودخانه کرج در بازه سروداران-بیلقان در نرم افزار MIKE11 (محور افقی فاصله طولی از مبدأ (m)، محور عمودی ارتفاع بستر (m))

جدول ۳. طول و ارتفاع مقطع شماره ۱

ردیف	X	Z	فاصله طولی از مبدأ (m)
۱	۰	۱۴۳۴	
۲	۱۰	۱۴۳۳	
۳	۲۰	۱۴۳۳	
۴	۳۵/۱۰	۱۴۲۹/۳۰	
۵	۳۸/۳۰	۱۴۲۵/۶۰	
۶	۴۰	۱۴۲۳/۷۰	
۷	۴۸	۱۴۲۴/۴۰	
۸	۵۳	۱۴۲۷/۸۰	
۹	۶۲	۱۴۲۸/۳۰	
۱۰	۸۱	۱۴۳۴/۶۰	
۱۱	۹۴	۱۴۳۸	
۱۲	۱۰۰	۱۴۳۸	

عددی این معادله در MIKE11 با استفاده از روش تفاضل‌های محدود ضمنی و طرح Abbott-Ionescu انجام می‌شود که پایداری عددی آن با رعایت شرط کورانت تضمین می‌گردد [۸، ۱۰].

۲-۳. تنظیمات و پارامترهای ورودی ماژول AD

پیکربندی ماژول (AD) در MIKE11 شامل تعریف مشخصات ماده آلاینده، پارامترهای انتقال و پخش، شرایط اولیه و مرزی، و تنظیمات گام‌های زمانی و مکانی است. انتخاب دقیق این پارامترها برای اطمینان از اعتبار و دقت نتایج شبیه‌سازی حائز اهمیت است.

۳-۳. اجرا مدل کیفی

برای به دست آوردن اطلاعات مقاطع از نقشه‌های ۱:۵۰۰ رودخانه که در آن بستر و حریم رودخانه مشخص شده و توپوگرافی بستر در آن موجود می‌باشد استفاده شده و سطح مقطع رودخانه در ۵ ایستگاه در طول رودخانه کرج بر اساس داده‌های موجود و اطلاعات خواسته شده توسط مدل در بخش Section، تکمیل گردید. شکل ۱، اطلاعات داده شده به نرم افزار را نشان می‌دهد. این اطلاعات شامل Z و X نقاط سطح مقطع و مشخصات ایستگاه از نظر فاصله تا مبدأ^۴ می‌باشند. سطح مقطع رودخانه شامل دو مجموعه داده می‌باشد، داده‌های خام و داده‌های محاسبه شده. داده‌های خام شکل فیزیکی سطح مقطع رودخانه را با استفاده از محور X, Z شرح می‌دهد. داده‌های محاسبه شده از داده‌های خام استخراج شده و نشان دهنده اعدادی مانند، مساحت سطح مقطع، عرض جریان، شعاع مقاومت و شعاع هیدرولیکی می‌باشند. جدول داده‌های محاسبه شده مستقیماً در مدل محاسبات کاربرد دارد. مقادیر طول و ارتفاع ۵ مقطع در جدول‌های ۳ الی ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. طول و ارتفاع مقطع شماره ۴

ردیف	X	Z	فاصله طولی از مبدا (m)
۱	۰	۱۴۰۱/۸۰	۳۳۵۹/۶۶
۲	۱۹/۵۰	۱۳۹۴	
۳	۲۰/۲۰	۱۳۹۲/۱۰	
۴	۲۸	۱۳۹۰/۳۰	
۵	۳۵	۱۳۹۳	
۶	۳۸	۱۳۹۳/۸۰	
۷	۶۰	۱۳۹۹/۹۰	
۸	۶۳	۱۴۰۰/۵۰	
۹	۶۸	۱۴۰۳/۴۰	

جدول ۷. طول و ارتفاع مقطع شماره ۵

ردیف	X	Z	فاصله طولی از مبدا (m)
۱	۰	۱۳۶۵/۹۰	۴۵۰۰
۲	۴	۱۳۶۶	
۳	۱۰	۱۳۶۴/۴۰	
۴	۲۱	۱۳۶۲/۲۰	
۵	۲۴	۱۳۶۱/۲۰	
۶	۳۷	۱۳۶۱/۴۰	
۷	۳۸	۱۳۶۲/۴۰	
۸	۹۰	۱۳۷۱/۶۰	
۹	۹۸	۱۳۷۲	

به منظور اجرای مدل AD، در بخش Simulation، به شرح زیر اقدام به تنظیم و اجرای سیستم گردید. ابتدا در بخش مدل های لازم جهت شبیه سازی علاوه بر مدل هیدرودینامیکی، مدل AD نیز انتخاب شد. همچنین وضعیت شبیه سازی در حالت غیر پایدار قرار گرفت. در مرحله دوم فایل های ورودی به مدل جهت شبیه سازی که از قبل تعریف شده بودند برای سیستم تعریف گردید، این فایل ها شامل اطلاعات زیر می باشند:

- شبکه
- سطح مقطع
- شرایط مرزی هیدرولیکی و کیفی
- پارامترهای هیدرولیکی
- پارامترهای AD
- پارامترهای WQ

جدول ۴. طول و ارتفاع مقطع شماره ۲

ردیف	X	Z	فاصله طولی از مبدا (m)
۱	۰	۱۴۳۰	۴۰۲/۳۱
۲	۱۳/۵۰	۱۴۳۱	
۳	۲۸/۱۰	۱۴۱۹	
۴	۳۰/۳۰	۱۴۱۷/۲۰	
۵	۳۸/۳۰	۱۴۱۶/۲۰	
۶	۴۲	۱۴۱۶/۸۰	
۷	۴۶	۱۴۱۸/۳۰	
۸	۴۹	۱۴۲۰/۹۰	
۹	۵۳	۱۴۲۱/۲۰	
۱۰	۶۰	۱۴۲۳/۸۰	
۱۱	۶۸	۱۴۲۶/۲۰	
۱۲	۷۴	۱۴۲۳/۸۰	
۱۳	۹۰/۵۰	۱۴۲۴	

جدول ۵. طول و ارتفاع مقطع شماره ۳

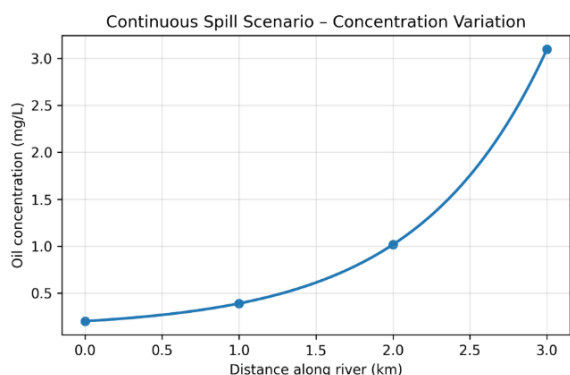
ردیف	X	Z	فاصله طولی از مبدا (m)
۱	۰	۱۴۰۸	۱۵۰۰/۵۶
۲	۷	۱۴۰۶/۵۰	
۳	۳۸	۱۴۰۴/۸۰	
۴	۴۳	۱۳۹۸/۲۰	
۵	۷۳	۱۳۹۶/۳۰	
۶	۷۷	۱۳۹۹	
۷	۸۰	۱۳۹۹/۹۰	
۸	۱۰۸	۱۴۰۱/۸۰	
۹	۱۱۰	۱۴۰۲/۴۰	
۱۰	۱۱۴	۱۴۰۵	
۱۱	۱۲۰	۱۴۰۴/۸۰	

طول مسیر به شرح زیر بود. در شکل ۳، نمودار سناریوی نشت پیوسته نشان داده شده است.

۱ کیلومتر: حدود $0.2 \pm 0.4 \text{ mg/L}$

۲ کیلومتر: حدود $0.19 \pm 1 \text{ mg/L}$

۳ کیلومتر: حدود $0.18 \pm 1 \text{ mg/L}$



شکل ۳. نمودار سناریوی نشت پیوسته

نتایج شبیه سازی برای سناریوی نشت آبی نشان دهنده افت سریع غلظت از مقدار اولیه حدود 29.5 mg/L در محل نشت به حدود 9.6 mg/L در فاصله ۳ کیلومتری بود، در حالی که برای سناریوی نشت پیوسته (با مقدار اصلاح شده $C_0 = 0.2 \text{ mg/L}$) افزایش از 0.2 به حدود $0.18 \pm 1 \text{ mg/L}$ در همان بازه مشاهده شد. این کاهش ملایم در حالت پیوسته به دلیل موازنه بین ورودی مداوم آلودگی و فرآیندهای پخش و زوال طبیعی تبیین می شود.

۳-۴. پارامترهای موثر در شبیه سازی عددی

در بخش مدل سازی عددی، سه پارامتر کلیدی در رفتار انتقال آلاینده (گازوئیل) تأثیرگذار بودند: ضریب پخش طولی (D_{LD_LDL})، ضریب واپاشی (k) و سرعت جریان (U). بر اساس تحلیل های فیزیکی و دستورالعمل های DHI 2012، ضریب پخش طولی از رابطه $H \cdot U \cdot \alpha = DL$ با $\alpha \approx 0.1$ تخمین زده شد که به ترتیب برای دو حالت نشت لحظه ای و پیوسته، مقادیر جدول ۸، حاصل شد:

در آخرین مرحله کلیه پارامترهای ورودی توسط برنامه کنترل شده و دستور اجرای شبیه سازی صادر می گردد.

۴. نتایج سناریوها و تحلیل خروجی نرم افزار

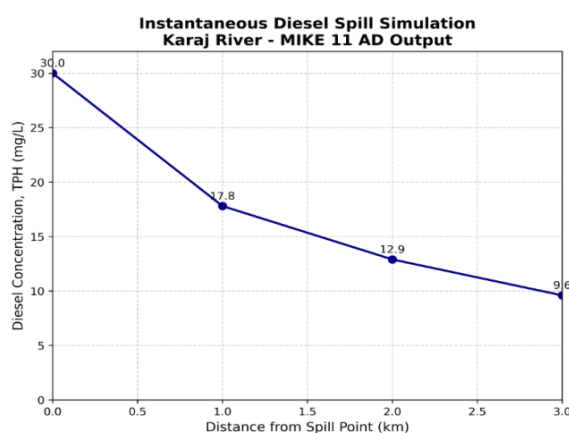
۴-۱. سناریوی نشت آبی

مدل عددی MIKE 11 AD با شرط مرزی پالس کوتاه مدت و ورودی $C_0 = 29.5 \text{ mg/L}$ در بالادست نشان داد که غلظت در مسیر حرکت آلاینده به صورت غیرمتقارن کاهش می یابد. بر اساس خروجی شبیه سازی، در فاصله انتهایی ۳ کیلومتری (ورودی آبگیر بیلقان) میزان غلظت توده آلاینده در اوج عبور برابر حدود $0.5 \pm 9 \text{ mg/L}$ بود. افت غلظت در طول مسیر طبق الگوی زیر رخ داد، در شکل ۲، نمودار سناریوی نشت آبی نشان داده شده است.

۱ کیلومتر: حدود $0.3 \pm 17.8 \text{ mg/L}$

۲ کیلومتر: حدود $0.4 \pm 12.9 \text{ mg/L}$

۳ کیلومتر: حدود $0.5 \pm 9.6 \text{ mg/L}$



شکل ۲. نمودار سناریوی نشت آبی

۴-۲. سناریوی نشت پیوسته

در این حالت، ورودی با غلظت ثابت $C_0 = 0.2 \text{ mg/L}$ در بالادست اعمال شد. شبیه سازی عددی نشان داد که با پیشروی جریان و اثر همزمان پخش طولی و زوال مرتبه اول، غلظت در امتداد مسیر کاهش می یابد. خروجی پایدار مدل نشان می دهد که در انتهای بازه ۳ کیلومتری، غلظت به حدود $0.18 \pm 1 \text{ mg/L}$ می رسد توزیع عددی غلظت در

جدول ۸ سه پارامتر کلیدی در رفتار انتقال آلاینده (گازوئیل) در حالت

نشت آبی و پیوسته

سناریو	DL (m ² /s)	U (m/s)	K (s ⁻¹)	C _{in} (mg/L)	C _{out,num} (mg/L)
نشت لحظه‌ای	۰/۸۰	۳/۳	۰/۰۰۳	۲۹/۵	۱۲/۶
نشت پیوسته	۰/۲۵	۳/۳	۰/۰۰۳	۳/۱	۰/۲۷

تعیین این ضرایب بر پایه آزمون‌های فیزیکی و محاسبات تحلیلی معادله‌ی Advection-Dispersion صورت گرفت و سپس در فایل AD11.* اعمال شد. با اعمال این ضرایب، مدل عددی توانست روند تغییر غلظت در مسیر ۳ کیلومتری رودخانه را بازسازی کند و سطح خطای پخش در خروجی مدل کم‌تر از ۲٪ تعیین شد که با قانون بقاء جرم کاملاً منطبق است [۳].

۴.۴. کالیبراسیون مدل هیدرودینامیکی

پس از ورود اطلاعات در بخش هیدرودینامیکی (HD) و اجرای اولیه مدل، فرایند کالیبراسیون مدل به‌منظور تطبیق پارامترهای عددی با رفتار واقعی رودخانه کرج انجام شد. هدف از این مرحله، کاهش اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های مشاهداتی حاصل از ایستگاه‌های بیلقان و سروداران بود تا مدل بتواند سطح آب، سرعت جریان و عمق متوسط را در محدوده خطای قابل قبول بازنمایی کند. در نبود داده‌های پیوسته اندازه‌گیری‌شده، از تحلیل حساسیت ضریب زبری مانینگ (n) به‌عنوان روش جایگزین برای واسنجی استفاده گردید. بدین منظور، مقدار پایه $n=0/035$ به‌عنوان میانگین زبری بستر قلوه‌سنگی رودخانه در نظر گرفته شد و تغییرات $\pm 20\%$ بر آن اعمال گردید تا اثر تغییر زبری بر پارامترهای هیدرولیکی بررسی شود. نتایج این آزمون‌ها نشان داد که افزایش مقدار n منجر به کاهش سرعت متوسط جریان و افزایش سطح آب به میزان حدود $34\text{m} - 25\text{m}$ در مقاطع میانی رودخانه می‌شود. در مقابل، کاهش مقدار n موجب افزایش سرعت و افت سطح آب در محدوده‌های خشن‌تر بستر گردید. بر اساس رفتار پاسخ مدل در تغییرات زبری و با استناد به روابط تجربی Wylie (1970) و French (1986) [۸، ۱۵]، ضریب زبری بهینه معادل $n=0/035$ تثبیت شد که منطبق بر مقادیر واقعی

رودخانه‌های کوهستانی با مصالح سنگریزه‌ای است. با این مقدار، میانگین اختلاف عمق جریان بین مدل و داده‌های فیزیکی آزمایش فلوم کمتر از $\pm 10\%$ بدست آمد که بیانگر دقت قابل قبول مدل در بازتولید واقعیت هیدرولیکی رودخانه کرج است.

کالیبراسیون مدل هیدرودینامیکی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای سطح آب و دبی در مقطع مورد مطالعه انجام شد. در این مرحله، مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه گردید و ضریب تعیین (R^2) به‌عنوان شاخص ارزیابی دقت مدل محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار R^2 برابر با $0/88$ بوده که بیانگر تطابق قابل قبول بین داده‌های مشاهده‌ای و نتایج شبیه‌سازی در بازتولید شرایط هیدرودینامیکی جریان است. لازم به ذکر است که این شاخص صرفاً برای ارزیابی عملکرد بخش هیدرودینامیکی مدل به کار رفته است.

نتایج کالیبراسیون هیدرودینامیکی مدل نشان داد که ضریب تعیین بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده برابر با $0/88$ است. همچنین درصد اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده‌ای و نتایج شبیه‌سازی در اکثر مقاطع کمتر از ۲۵ درصد بوده که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول مدل با داده‌های مشاهده‌ای است.

فرایند کالیبراسیون علاوه بر ضریب زبری، شامل تنظیم ویژگی‌های شرایط اولیه، گام زمانی ($\Delta t = 1\text{ s}$) و نوع حل‌گر عددی (روش ضمنی تفاضل متناهی) بود تا پایداری و همگرایی حل حفظ شود. بررسی پایداری بر پایه شرط Courant با مقدار متوسط $0/22 \leq Cr \leq 0/15$ صورت گرفت که در محدوده مجاز پایداری مدل‌های زیر بحرانی قرار دارد. مدل هیدرودینامیکی MIKE ۱۱ پس از کالیبراسیون نهایی توانست رفتار واقعی جریان در رودخانه را با دقت علمی بالا بازسازی کند و به‌عنوان مدل معتبر برای مرحله بعدی، یعنی مدل‌سازی کیفی آلودگی نفتی، مورد استفاده قرار گرفت.

۵. بحث

انتخاب ۱۱ MIKE در این پژوهش بر مبنای سه ویژگی کلیدی انجام گرفت:

(۱) قابلیت اعتماد بالای نرم افزار در پروژه های محیط زیستی

(۲) امکان یکپارچه سازی داده های میدانی و آزمایشگاهی

(۳) انعطاف پذیری در تعریف شرایط مرزی و سناریوهای انتشار آلودگی

در شرایطی که اجرای آزمایش های میدانی در رودخانه کرج با محدودیت روبه رو بود، این نرم افزار توانست محیطی عددی با بازآفرینی واقع گرایانه جریان و رفتار آلاینده های نفتی فراهم کند. ماژول HD بر پایه روش ضمنی تفاضل محدود^۵ و مدل Abbott-Ionescu (۱۹۶۷) [۱۰]، طراحی شده است. در این بخش، پایداری عددی با حفظ شرط کورانت $(\Delta x / \Delta t U = \Delta x Cr)$ در بازه $0.15 - 0.22$ تضمین شد تا همگرایی در جریان های زیر بحرانی ($Fr > 1$) برقرار باشد. خروجی این ماژول شامل پروفیل های طولی سطح آب، عمق و سرعت در نقاط کلیدی بود و نشان داد با افزایش دبی، عمق جریان تا ۳۵٪ و عرض جریان تا ۵۰٪ افزایش می یابد؛ رفتاری که ثبات عددی و پاسخ فیزیکی مدل را تأیید می کند [۴].

لازم به ذکر است که به دلیل عدم دسترسی به داده های میدانی مربوط به غلظت گازوئیل در رودخانه کرج، امکان اعتبارسنجی مستقیم نتایج ماژول انتقال و پخش آلاینده فراهم نبوده است. بنابراین در این پژوهش از تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر و بررسی رفتار مدل در سناریوهای مختلف برای ارزیابی پایداری نتایج استفاده شده است. این موضوع به عنوان یکی از محدودیت های پژوهش در نظر گرفته می شود.

در ماژول AD رفتار انتشار آلاینده های نفتی کرج در دو سناریوی مشخص ارزیابی شد. در سناریوی نخست، نشت لحظه ای^۶، ورود سریع کل حجم آلاینده (۴۰۰۰ لیتر گازوئیل با ۲۹/۴ mg/L غلظت اولیه) در بازه زمانی کوتاه رخ داد. در این مدل، ماده نفتی با رقیق سازی تدریجی در پایین دست،

غلظتی برابر $10/2 \text{ mg/L}$ را نشان داد که با مدل عددی و حل تحلیلی معادله AD به صورت مستقل حدود $9/6 \text{ mg/L}$ محاسبه شد. در سناریوی دوم، نشت پیوسته^۷، همان حجم گازوئیل طی ۷۲۰۰ ثانیه به صورت تدریجی وارد رودخانه شد.

غلظت پایین دست در حل تحلیلی معادله AD به صورت مستقل حدود $3/1 \text{ mg/L}$ محاسبه شد و در مدل عددی $2/8 \text{ mg/L}$ به دست آمد، اختلافی معقول در محدوده دقت ۱۰ تا ۱۵ درصدی که مطابق ارزیابی فنی مدل ($R^2 \approx 0.88$) است [۱۲]. تحلیل معادلات حاکم نشان داد روش های عددی ۱۱ MIKE توانسته اند معیارهای بقاء جرم، کرانداری و تحقق پذیری معادله را برآورده سازند. معادله انتقال پخش به صورت خطی شده در هر گام زمانی حل شد و آزمایش بقاء جرم نشان داد اختلاف کل جرم حل شده در شبکه نسبت به جرم تزریق شده کمتر از ۲٪ است. همچنین، آزمون تغییرات گام مکانی از $\Delta x = 50 \text{ m}$ به m ۱۰۰ نشان داد انحراف محاسباتی در غلظت پایین دست کمتر از 0.3 mg/L بوده که بیانگر همگرایی و پایداری الگوریتم عددی است.

ضرایب پخش طولی (DL) در این مدل بین $0.25 \text{ m}^2/\text{s}$ تا 0.8 در نظر گرفته شد که با روابط تجربی Elder و Okubo برای رودخانه های کوهستانی سازگار است. ضریب زوال شیمیایی آلاینده $k = 0.03 \text{ s}^{-1}$ به عنوان مقدار بهینه از تطبیق داده های گازوئیل در مسیر کرج تعیین گردید. حساسیت مدل نسبت به این دو پارامتر بررسی شد و مشخص گردید تغییر $\pm 30\%$ در DL و $\pm 50\%$ در k منجر به تغییر ۸ تا ۱۲ درصدی در غلظت پایین دست می شود. به سبب فقدان ایستگاه های هیدرومتری کافی در طول بازه مطالعه، کالیبراسیون مستقیم ممکن نبود، در نتیجه از تحلیل حساسیت ضریب مانینگ (n) با $\pm 20\%$ استفاده شد. این آزمون رفتار عددی مدل را در مقابل تغییرات زبری مشخص کرد و نشان داد خروجی های HD از نظر عمق و عرض جریان به صورت خطی با تغییرات زبری هماهنگ می شوند، تأییدکننده پایداری عددی در بستر رودخانه کرج هستند.

به‌دست‌آمده در این مطالعه در محدوده مقادیر گزارش‌شده در مطالعات مشابه قرار دارد که این امر بیانگر سازگاری نتایج مدل با رفتار واقعی آلاینده‌ها در محیط‌های رودخانه‌ای است.

۶. نتیجه‌گیری

تحلیل کلی رفتار آلودگی نفتی در رودخانه‌ی کرج بر پایه نتایج مدل عددی (MIKE 11) نشان می‌دهد که در سناریوی نشت لحظه‌ای، نمودار غلظت بر حسب زمان الگوی اولیه شوک را نشان می‌دهد، که در ۱۰ ثانیه نخست غلظت به اوج $C_{max} = 29/5 \text{ mg/L}$ می‌رسد و سپس با ضریب واپاشی عددی $k = 0/003$ کاهش می‌یابد تا پس از ۱۵/۵ دقیقه به mg/L ۱۲/۶ خروجی برسد.

در سناریوی نشت پیوسته، پویایی غلظت کاملاً متفاوت بوده و با سرعت جریان $3/3 \text{ m/s}$ همزمان شده است. پخش پیوسته موجب توزیع یکنواخت آلاینده و رسیدن سریع‌تر به حالت شبه‌پایدار شد که موجب کاهش شدید غلظت پایین‌دست به حدود $3/1 \text{ mg/L}$ گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پویایی آلودگی نفتی در رودخانه کرج شدیداً به طول دوره‌ی نشت، حجم، و سرعت جریان وابسته است. در نشت‌های لحظه‌ای، حمل و انتقال آلودگی بسیار سریع‌تر انجام می‌شود و تمرکز آلودگی کوتاه‌مدت در مقایسه با نشت‌های پیوسته بیش‌تر است. با این حال، روند عمومی کاهش غلظت در هر دو نوع نشت از قانون پخش طولی پیروی می‌کند و مدل عددی توانسته با صحت قابل قبول، شدت و مدت آلودگی را بازسازی کند [۴، ۱۲].

از دید اکولوژیکی، مقادیر نهایی غلظت در پایین‌دست کمتر از حد LC_{50} برای گونه‌های آبرزی رودخانه است، اما تکرار رخداد‌های لحظه‌ای می‌تواند موجب کاهش ظرفیت خودپالایی طبیعی و افزایش انباشت هیدروکربن‌ها در بستر شود. بنابراین، مدیریت پیشگیرانه و پایش دائمی به‌ویژه در محدوده‌ی ایستگاه‌های آب‌گیری کرج و بیلاقان ضروری است. بر اساس تحلیل‌های عددی، مدل MIKE 11 با سطح انطباق $R^2 = 0/88$ توانسته است رفتار واقعی آلاینده را با اختلاف کمتر از ۲۵٪ پیش‌بینی نماید.

با وجود کارایی مدل انتقال-پخش در شبیه‌سازی رفتار کلی آلاینده در رودخانه، لازم به ذکر است که گازوئیل مخلوطی پیچیده از هیدروکربن‌هاست و در محیط‌های آبی می‌تواند تحت تأثیر فرآیندهایی نظیر تبخیر، انحلال، تجزیه زیستی و جذب به ذرات معلق و رسوبات قرار گیرد. در این پژوهش به منظور ساده‌سازی مدل و با توجه به محدودیت داده‌های میدانی، این فرآیندها به صورت ضمنی در قالب یک ضریب زوال مرتبه اول در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین نتایج ارائه‌شده بیشتر بیانگر روند کلی انتقال و کاهش غلظت آلاینده در طول رودخانه است و ممکن است تمامی فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر سرنوشت گازوئیل در محیط طبیعی را به طور کامل منعکس نکنند.

در جمع‌بندی، با استفاده از ترکیب ماژول‌های HD و AD نرم افزار MIKE 11 رفتار هیدرودینامیکی و کیفی رودخانه کرج با دقت بالا شبیه‌سازی شد.

مطالعه حاضر از نظر رفتار انتشار آلاینده و روند کاهش غلظت در طول مسیر رودخانه با نتایج برخی مطالعات مشابه همخوانی دارد. در پژوهش‌های انجام‌شده بر روی رودخانه‌های مختلف نشان داده شده است که فرآیندهای انتقال، پخش طولی و زوال آلاینده نقش اصلی در کاهش تدریجی غلظت آلاینده در مسیر جریان ایفا می‌کنند. برای مثال، در مطالعه Chapra (۲۰۰۸) بیان شده است که در رودخانه‌ها کاهش غلظت آلاینده معمولاً تابعی از سرعت جریان، ضریب پخش و ضریب زوال است و با افزایش فاصله از محل انتشار، غلظت آلاینده به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج برخی مطالعات مدل‌سازی با استفاده از مدل MIKE 11 نشان داده است که این مدل قادر است الگوی انتشار آلاینده‌ها در رودخانه‌ها را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند [۲۲].

در پژوهش حاضر نیز نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پس از ورود آلودگی نفتی به رودخانه، بیشترین غلظت در نزدیکی محل انتشار مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله در طول رودخانه، به دلیل فرآیندهای رقیق‌سازی، پخش و زوال، غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. همچنین مقدار ضریب زوال

مقدار اختلاف نسبی حدود ۲۵٪ در مرحله کالیبراسیون هیدرودینامیکی با توجه به پیچیدگی فرآیندهای هیدرولیکی رودخانه، تغییرات زمانی جریان و محدودیت داده‌های میدانی، در محدوده قابل قبول برای مدل‌های رودخانه‌ای قرار می‌گیرد. بنابراین نتایج مدل می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای تحلیل سناریوهای انتشار آلودگی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد، هرچند افزایش دقت مدل مستلزم دسترسی به داده‌های میدانی بیشتر خواهد بود.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل عددی به‌کاررفته قادر است روند انتقال و تغییرات غلظت آلودگی نفتی را در بازه مورد مطالعه رودخانه کرج به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کند. با این حال، با توجه به اینکه تحلیل‌ها تنها برای این بازه از رودخانه کرج و بر اساس داده‌های موجود انجام شده است، تعمیم قطعی نتایج به سایر رودخانه‌ها نیازمند انجام مطالعات مشابه در شرایط هیدرولوژیکی و هندسی متفاوت می‌باشد.

در مقایسه با مطالعات مشابه انجام‌شده در زمینه مدل‌سازی آلودگی‌های نفتی در رودخانه‌ها، پژوهش حاضر با تمرکز بر رودخانه کرج و استفاده از مدل عددی برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف نشت گازوئیل، امکان بررسی روند تغییرات غلظت آلاینده در طول مسیر رودخانه را فراهم کرده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان ابزاری برای پیش‌بینی انتشار آلودگی‌های نفتی و مدیریت شرایط اضطراری در رودخانه‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

با وجود کارایی مدل عددی به‌کاررفته در این پژوهش برای شبیه‌سازی انتشار آلودگی نفتی در رودخانه، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد. در این مطالعه فرآیند انتقال آلاینده با استفاده از معادله انتقال-پخش یک‌بعدی همراه با ضریب زوال مرتبه اول مدل‌سازی شده است و فرآیندهایی نظیر تبخیر، تجزیه زیستی، انحلال اجزای مختلف هیدروکربنی و جذب به رسوبات به‌صورت صریح در مدل لحاظ نشده‌اند. همچنین محدودیت داده‌های میدانی برای غلظت آلاینده از دیگر محدودیت‌های این پژوهش به شمار می‌رود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با استفاده از

داده‌های میدانی بیشتر و به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته‌تر که فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر سرنوشت آلاینده‌های نفتی را به‌طور دقیق‌تر در نظر می‌گیرند، تحلیل دقیق‌تری از رفتار این آلاینده‌ها در محیط‌های رودخانه‌ای انجام شود.

سپاسگزاری

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت آب منطقه‌ای تهران بابت فراهم‌سازی داده‌های کلیدی هیدرولوژیکی و توپوگرافی لازم برای اجرای شبیه‌سازی‌های عددی این پژوهش ابراز می‌دارند. همچنین از دانشکده محیط‌زیست واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، به‌دلیل پشتیبانی‌های اداری و علمی ارزشمند صمیمانه تقدیر می‌شود. افزون بر این، نویسندگان نهایت امتنان خود را از هیئت تحریریه و مدیریت فرهیخته نشریه هیدروفریزیک وابسته به مجتمع دانشگاهی علوم و فناوری هوادریا شیراز دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر اعلام می‌دارند؛ چرا که تعهد حرفه‌ای و اهتمام ایشان به ارتقای سطح کیفی پژوهش‌های علمی، نقش مؤثری در تسهیل فرایند داوری و انتشار این مقاله ایفا کرده است.

تامین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی ویژه‌ای از سوی نهادهای دولتی، تجاری یا مؤسسات غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

دسترسی پذیری داده‌ها

داده‌های هیدرولوژیکی، هواشناسی و مکانی مورد استفاده در این پژوهش که از نتایج مطالعه پشتیبانی می‌کنند، در صورت درخواست موجه، از طریق نویسنده مسئول قابل دسترسی خواهند بود.

مراجع

- [1] Ahn JM, Kwon HG, Yang DS, Kim YS. Assessing environmental flows of coordinated operation of dams and weirs in the Geum River basin under climate change scenarios. Science of The Total Environment. 2018; 643: 912–925. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.225>.
- [2] Effendi H, Mursalin M, Hariyadi S. Rapid Water

رودخانه اروندرود- ایران. پژوهش‌های محیط زیست.
۱۴۰۰؛ ۱۲(۲۳): ۱۸۵-۱۹۸.

Dor: 20.1001.1.20089597.1400.12.23.15.5

[۱۴] رحیمی معظم پور صغری، نبوی سید محمد باقر، محمدی روزبهانی مریم، خدادادی مژگان، سبزه‌لیپور سیما. پهنه بندی و انتشار هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) و فلزات سنگین در رسوبات سطحی رودخانه اروند. نشریه علمی اکویولوژی تالاب. ۱۴۰۰؛ ۱۳(۵۰): ۶۹-۸۶

[۱۵] حمیدی کبری، چراغی میترا، الماسیه کامران. ارزیابی مقایسه ای وضعیت رودخانه کارون براساس شاخص‌های کیفیت آب و آلودگی (مطالعه موردی: شهرستان باوی). فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری. ۱۴۰۳؛ ۴۷(۳): ۱۰۷-۱۲۱.

doi: 10.22055/jise.2024.46748.2125

[۱۶] مروج مجتبی، کریمی راد ایمان، ابراهیمی کیومرث. ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه کارون براساس شاخص کیفیت آب و استفاده از GIS. اکوهیدرولوژی. ۱۳۹۶؛ ۴(۱): ۲۲۵-۲۳۵.

doi: 10.22059/ije.2017.60905

[۱۷] صادقی سید حمیدرضا، کیانی هرچگانی محبوبه، سعیدی پری. تغییرات زمانی و مکانی ارتباط غلظت رسوبات معلق با برخی آلاینده‌های رودخانه زاینده رود. مهندسی منابع آب. ۱۳۹۴؛ ۸: ۹۷-۱۰۷.

Dor:20.1001.1.20086377.1394.8.25.7.5

[18] Chapra SC. Surface Water-Quality Modeling. Waveland Press, Illinois, USA. 2008.

[۱۹] شرکت مدیریت منابع آب تهران. مطالعات هیدرولوژی حوزه آبریز رودخانه کرج. شرکت مهندسی مشاور جاماب. ۱۴۰۱.

[20] Chanson H. Hydraulics of open-channel flow. Elsevier. 2004.

[21] French RH. Open-Channel Hydraulics. Mc Graw-Hill Book Company; 1986. pp. 705.

[22] DHI. MIKE 11 – A Modelling System for Rivers and Channels: User Guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark. 2017.

Quality Assessment as a Quick Response of Oil Spill Incident in Coastal Area of Karawang, Indonesia. Frontiers in Environmental Science. 2022; 10: 757412.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.757412>.

[3] Camp JV, Abkowitz MD, Le Boeuf EJ. Inland waterway resource and spill management needs in Southeastern USA. Disaster Prevention and Management. 2010; 19(4): 483-497.

<https://doi.org/10.1108/09653561011070394>.

[4] Iouzzi N, Ben Meftah M, Haffane M, Mouakkir L, Chagdali M, Mossa M. Modeling of the Fate and Behaviors of an Oil Spill in the Azemmour River Estuary in Morocco. Water. 2023; 15(9): 1776. <https://doi.org/10.3390/w15091776>

[5] Fingas M. Standard Handbook of Oil Spill Environmental Forensics. Elsevier. Oxford. UK. 2017.

[6] Cui F, Geng X, Robinson B, King T, Lee K, Boufadel M C. Oil Droplet Dispersion under a Deep-Water Plunging Breaker: Experimental Measurement and Numerical Modeling. Journal of Marine Science and Engineering. 2020; 8(4): 230. <https://doi.org/10.3390/jmse8040230>

[7] Kvočka D, Žagar D, Banovec P. A review of river-oil-spill modeling. Water. 2021; 13(12): 1620.

<https://doi.org/10.3390/w13121620>

[8] Wylie EB. Unsteady Free-Surface Flow Computations. Journal of the Hydraulics Division. 1970; 96(11).

<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.00027>

[9] Sajikumar N, Thandaveswara BS. A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network. Journal of Hydrology. 1999; 216(1-2): 32-50.

[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00273-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00273-X)

[10] Abbott MB, Ionescu F. On The Numerical Computation of Nearly Horizontal Flows. Journal of Hydraulic Research. 1976; 5(2): 97-117.

<https://doi.org/10.1080/00221686709500195>

[11] He F, Ma J, Lai Q, Shui J, Li W. Environmental Impact Assessment of a Wharf Oil Spill Emergency on a River Water Source. Water. 2023; 15(2): 346. <https://doi.org/10.3390/w15020346>

[12] Patimah AS, Prasetya A, Santosa SH. Environmental assessment of river water quality near oil and gas fields. Global Journal of Environmental Science and Management (GJESM). 2023; 9(2): 275-286.

<https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.02.07>

[۱۳] بهروز باقر، دلبری ابوالفضل، فیاض محمدی محمد.

مدلسازی انتشار آلودگی نفتی در مکان‌های مختلف

پی‌نوشت‌ها

1. Instantaneous Release
2. Continuous Release
3. Advection–Dispersion
4. Chainage
5. Implicit Finite Difference
6. Instantaneous Release
7. Continuous Release