Archive of SID

مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره هجدهم، شماره ٤، سال ١٣٩٧

بررسی آزمایشگاهی انتقال آلودگی در محیط متخلخل با استفاده از مدل ترکیبی عصبی فازی تطبیقی و درون یاب تابع پایه شعاعی

شهرام موسوی[1]

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد میانه

تاریخ دریافت: [۹۷/۰۳/۲۱] تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۱۹]

sh.mousavi@m-iau.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، مدل جدیدی با استفاده از تلفیق روش سیستم عصبی فازی تطبیقی به عنوان یک روش جعبه سیاه برای پیش‌بینی زمانی و روش عددی بدون شبکه به عنوان یک مدل پایه فیزیکی برای پیش‌بینی مکانی غلظت آلاینده در محیط‌های متخلخل توسعه داده شد. برای این منظور یک مدل آزمایشگاهی دو بعدی ساخته شد و اسید نارنجی ۷ (AO7) به عنوان آلاینده انتخاب شد. آلاینده به مخزن بصورت غیریکنواخت وارد و در ۱۰ نقطه مقدار آلاینده در زمان‌های مختلف و با فواصل ۳ دقیقه اندازه‌گیری شد. به منظور کاهش نویز در داده‌های اندازه‌گیری از روش آستانه موجک برای رفع نویز داده‌های مشاهده شده استفاده شد. نتایج نشان داد که روش آستانه موجک توانایی مدل عصبی فازی تطبیقی را می‌تواند تا ۵ درصد افزایش دهد. همچنین نتایج نشان داد که مدل ترکیبی سیستم عصبی فازی تطبیقی و روش بدون شبکه از توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی برخوردار است..

واژگان کلیدی: محیط متخلخل، انتقال آلودگی، سیستم عصبی فازی تطبیقی، تابع پایه شعاعی

۱- مقدمه

روش‌های عددی زیادی از قبیل تفاضل محدود (FDM)، احجام محدود (FVM)، المان محدود (FEM) و المان مرزی (BEM) به طور وسیع برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی مبتنی بر اصول فیزیکی جریان و انتقال مواد محلول در محیطهای متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. البته مسئله اصلی این روش‌ها نیاز به ایجاد شبکه در محدوده محاسباتی یا مرزها و در نتیجه وابستگی آنها به شبکه محاسباتی است. این عامل در مسائل دو بعدی یا سه بعدی یا مسائل مهندسی غیر خطی مرتبه بالا زمانی که محدوده مورد مطالعه نامنظم و پیچیده باشد، کاربرد این روش‌ها را با مشکل مواجه می‌کند [2]. روش درونیابی تابع پایه شعاعی (RBF) یکی دیگر از تکنیک‌هایی است که در حل معادلات دیفرانسیل و جبری برای کل محدوده محاسباتی بدون نیاز به ایجاد شبکه توسعه یافته است. در دهه اخیر روش بدون شبکه در بسیاری از مسائل مهندسی به دلیل آزاد بودن شبکه در آنها و توسعه آسان به ابعاد بالاتر مورد استفاده قرار گرفته است [3].

با وجود توانایی روش‌های عددی مبتنی بر اصول فیزیکی مثل روش‌های بدون شبکه برای شبیه‌سازی زمانی و یا مکانی برخی سیستم‌ها، شرایط واقعی تصادفی و وجود عدم قطعیت از قبیل

www.SID.ir

Archive of SID

ناهمگنی و غیر ایزتروپی، تاثیر اساسی بر جریان و انتقال مواد محلول در محیط متخلخل داشته و کارایی آنها را محدود می-کند. در چنین شرایطی، زمانی که در مدل‌های مبتنی بر فیزیک عدم قطعیت ورودی‌های مدل و خروجی متناظر با آن در پیش بینی یک پدیده پیچیده دارای اهمیت باشد، ممکن است انواع دیگر مدل‌های شبیه‌سازی جایگزین شوند. در این رابطه، زمانی که داده‌های صحرایی کافی نبوده و دقت پیش بینی اهمیت بیشتری نسبت به مفهوم فیزیکی داشته باشد، یک مدل جعبه سیاه می‌تواند گزینه مناسبی باشد [4]. مدل‌های هوش مصنوعی از چنین مدل‌های جعبه سیاه با خواص ویژه برای مدلسازی سیستم‌های پیچیده، به شمار می‌آیند. از جمله چنین مدل‌های جعبه سیاه می‌توان به مدل عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) اشاره کرد که به عنوان توابع تخمین‌گر خود آموز و خود سازگار، توانایی بالایی در مدلسازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی غیر خطی نشان داده است [2].

مدل‌های جعبه سیاه مثل مدل ANFIS و مدل‌های عددی مثل FDM، FEM و MESH FREE داده محور است و کارایی مدل‌های داده محور به شدت به کمیت و کیفیت داده‌ها بستگی دارد؛ به علاوه وجود نویزهای پنهان در داده‌ها ممکن است بر کارایی مدل تاثیر گذارد. به همین دلیل رفع نویز داده‌ها به عنوان روشی قدرتمند برای زدودن خطا از داده‌ها مطرح است [5]. از روش‌های موثر برای درک مفهوم حرکت و انتقال مواد محلول در محیط متخلخل استفاده از ابزار آزمایشگاهی است. در دهه‌های اخیر کارهایی در زمینه اعتبار سنجی مدل‌های عددی آبهای زیرزمینی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته است. رادولف و همکاران (۱۹۹۶) نفوذ و انتقال مواد محلول را با استفاده از مدل آزمایشگاهی در شن و ماسه غیر اشباع بررسی نمودند [6]. پانتلیت و همکاران (۲۰۰۲) نفوذ آب دریا را به سفره ساحلی با استفاده از آزمایش تانک ماسه در حالت دو بعدی مطالعه نمودند [7]. تورنز (۲۰۰۲) با استفاده از آزمایش‌های تانک ماسه اعتبار سنجی مدل عددی المان محدود را بررسی نمود [8]. یک تانک ماسه مستطیلی توسط جالبرت و همکاران (۲۰۰۰) به منظور اعتبار سنجی حل بی‌بعد اندرکنش آب شور و شیرین بکار گرفته شد [9].

بیشتر مدل‌های بکار رفته در زمینه شبیه‌سازی انتقال مواد محلول با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی با در نظر گرفتن شرایط فرضی اجرا شده‌اند و نتایج این مدل‌ها بر اساس روش‌های عددی دیگر کالیبره و بکار گرفته شده است. با در نظر گرفتن مزایا و محدودیت‌های روش‌های عددی و مدل‌های جعبه سیاه، ترکیبی از دو روش به عنوان مدل ترکیبی می‌تواند در مدلسازی انتقال مواد محلول موثر باشد. پس در این پژوهش به عنوان نوآوری از توانایی مدل هوش مصنوعی و روش بدون شبکه، باهم استفاده شده‌است. به منظور اعتبار سنجی مدل پیشنهادی در این پژوهش از مدل آزمایشگاهی استفاده شده-است.

ویژگی‌های منحصر به فرد متدولوژی پیشنهادی که آن را از سایر مدلها متمایز می‌سازد به شرح زیر است:

الف- روش رفع نویز موجکی به عنوان پیش پردازش داده‌ها می‌تواند کارایی مدلسازی انتقال آلودگی در محیط متخلخل را افزایش دهد.

ب- مدل‌های عددی رایج مورد استفاده از قبیل FEM، FDM، BEM و روش بدون شبکه بیشتر از بسط تیلور به عنوان یک طرح گسسته‌سازی خطی برای گام‌های زمانی در حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌کنند، اما در روش پیشنهادی از روش هوش مصنوعی برای مدلسازی زمانی فرآیند استفاده شده‌است.

ج- توانایی اصلی مدل پیشنهادی، استفاده از توانایی هر دو مدل جعبه سیاه (ANFIS) و بدون شبکه در حل معادلات دیفرانسل جزئی مبتنی بر فیزیک در شبیه‌سازی انتقال آلودگی است.

د- به دلیل عدم قطعیت پارامترهای فیزیکی مانند ضریب پخش در مدل پیشنهادی مقدار غلظت آلودگی بدست آمده از روش هوش مصنوعی در مدل MQ-RBF برای به روز کردن شرایط داخلی در هر زمان برای تخمین غلظت آلودگی در هر نقطه مورد نظر، اعمال می‌شود.

معمولا مدل‌های عددی مانند FDM، FEM، BEM و RBF از بسط خطی تیلور (روابط تفاضل محدود ضمنی و صریح) برای گسسته سازی زمانی معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده

www.SID.ir

Archive of SID

می‌کنند، اما روش غیر خطی ANFIS در مدل حاضر برای مدلسازی زمانی مورد استفاده قرار گرفته‌است.

به دلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرودینامیکی خاک، در مدل ترکیبی ANFIS-RBF، میزان غلظت در محل‌های اندازه‌گیری در هر گام زمانی با استفاده از مدل هوش مصنوعی به روز رسانی شده و سپس مقادیر بدست آمده به عنوان شرایط داخلی در روش بدون شبکه وارد و در نهایت میزان غلظت در نقاط مختلف تعیین شده‌است. از روش رفع نویز موجکی به عنوان عامل پیش پردازش کننده در ساختار مدل هوش مصنوعی به منظور کاهش خطای داده‌ها در شبیه‌سازی انتقال مواد محلول استفاده شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی کاربرد مدل پیشنهادی ANFIS-RBF در مسئله انتقال آلودگی در محیط‌های متخلخل، مطالعه آزمایشگاهی تحت شرایط کنترل شده انجام گرفت. در این آزمایش از اسید نارنجی ۷ (AO7) به عنوان عامل آلودگی استفاده شد. به منظور آزمایش انتقال آلودگی در محیط متخلخل، مخزنی با قاب فلزی و بدنه از جنس اکریلیک با ۱۰ نقطه آزمایش (پیزومتر)، ورودی در بالادست، سه شیر تنظیم جریان در خروجی، یک سرریز در ورودی و یک شیر تخلیه در کف مطابق شکل ۱ تهیه شد. به منظور تامین جریان از آب شرب شهری و برای تامین آلودگی از یک مخزن هیدرولیکی برای اختلاط ماده آلاینده به همراه دو پمپ شناور استفاده شد. یکی از پمپ‌ها برای برقراری جریان پیوسته و دبی مشخص در مواقع اضطراری در صورت خرابی پمپ اصلی در نظر گرفته شد. ابعاد مدل فیزیکی ۰/۲۰×۱/۳۰×۲/۰۰ متر مکعب و با ضخامت دیواره ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد. برای اندازه‌گیری نمونه آلاینده از پیزومترهای نصب شده روی بدنه مخزن ماسه (شیرهای کنترل موجود روی پیزومترها) استفاده شد.

به منظور انجام آزمایش انتقال آلاینده در محیط متخلخل از ماسه تهیه شده از سفره آب زیرزمینی واقعی استفاده شد. مشخصات ماسه مورد استفاده و پارامترهای فیزیکی مدل در جدول (۱) ارائه شده‌است. برای اندازه‌گیری میزان جریان خروجی به دلیل پایین بودن مقدار دبی از روش حجمی و با استفاده از استوانه مدرج انجام شد. برای تامین جریان ورودی و آلاینده محلول از دو پمپ شناور که یکی از پمپ‌ها در حالت ذخیره است، استفاده شد. به گونه‌ای که از مخزن هیدرولیکی برای تامین غلظت مورد نیاز و اختلاط AO7 استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان AO7 برای ترکیب با آب از ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌گرم استفاده شد. برای مشاهده روند پیشرفت آلودگی در تانک ماسه، یک دوربین فیلم‌برداری در طول آزمایش به کار گرفته شد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری غلظت آلودگی (AO7)، از دستگاه اسپکتروفوتومتر (DR5000, HACH Company, USA) استفاده شد، که مقدار فوتون‌ها (شدت نور) را پس از عبور از داخل نمونه در ناحیه UV-Vis اندازه‌گیری می‌کند. بدین منظور در ابتدا برای تعیین طول موج ماکزیمم (λ_{max})، طیف جذبی محلولی AO7 به غلظت تقریبی ۲۰ میلی گرم در لیتر در محدوده ۸۰۰-۲۳۰ نانومتر به وسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر رسم شد (شکل ۲). به گونه‌ای که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، ماکزیمم طول موج محلول AO7 در ناحیه مرئی جذب بیشینه، ٤٨٥ نانومتر است. پس از تعیین طول موج ماکزیمم، محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت (۰ تا ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) از AO7 تهیه و جذب آنها در طول موج ٤٨٥ nm اندازه گیری شد و منحنی کالیبراسیون رسم شد. همچنین برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، مقاومت ویژه و دمای نمونه‌های محلول AO7، دستگاه اندازه‌گیری هدایت **الکتریکی** (EC600, FLIR Company, USA) به کار گرفته شد.

به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری جریان و تراز آب، شیرهای کنترل در خروجی به صورت مکرر کنترل شد. قرائت دستگاه اسپکتروفوتومتر و EC سنج در مواقع مشکوک چندین بار تکرار، و همچنین، در این پژوهش به منظور کاهش عدم قطعیت سری‌های زمانی اندازه‌گیری از روش رفع نویز موجکی به عنوان یک روش کارآمد در برطرف نمودن اطلاعات ناخواسته و غیر مفید در فرآیند مدلسازی استفاده شد.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱. مدل آزمایشگاهی انتقال آلودگی در محیط متخلخل



Fig. 1. Experimental model for contaminant transport in porous media

جدول ۱. منحنی دانه‌بندی و پارامترهای فیزیکی برای مدل‌سازی انتقال آلودگی

Parameter		Value
Grain Size	D_{10}	0.33 mm
	D_{50}	1.70 mm
	D_{60}	2.20 mm
Hydraulic Conductivity	K	0.0062 m/min
Constant head level at the left boundary		120 cm
Constant head level at the right boundary		110 cm
Flow Rate	q	0.061 lit/s
AO7 concentration in source	0th -60th minute	100 mg/lit
	60th -120th minute	50 mg/lit
	120th -180th minute	25 mg/lit
	180th -300th minute	0

Table. 1. Grid size curve and Physical parameters for experimental contaminant transport modeling

شکل ۲. تغییرات طیف جذبی محلولAO7

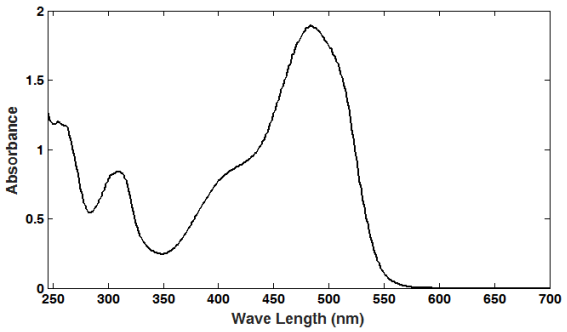

Fig. 2. Change of the AO7 absorption spectrum

۲-۲- مدل ترکیبی عصبی فازی تطبیقی و درون یاب تابع پایه شعاعی

در مدل پیشنهادی برای تخمین میزان آلودگی در پیزومترهای نصب شده در مخزن آزمایشگاهی از ترکیب روش ANFIS به عنوان یک مدل جعبه سیاه و روش RBF به عنوان یک روش عددی بدون شبکه استفاده شده‌است. برای این منظور، در گام اول سری‌های زمانی غلظت آلاینده (AO7) برای کلیه پیزومترها با استفاده از روش آستانه موجک، رفع نویز می‌شوند. در گام دوم، غلظت AO7 در پیزومترهای مورد مطالعه با استفاده از مدل ANFIS آموزش و درستی‌آزمایی می‌شوند. برای این منظور پارامترهای ورودی مدل که شامل هدایت الکتریکی، مقاومت و غلظت آلاینده در پیزومترها در زمان‌های قبل است، لحاظ شده‌اند. به بیان دیگر، از مدل جعبه سیاه (ANFIS) برای پیش‌بینی زمانی غلظت آلاینده در یک گام زمانی بعد استفاده می‌شود. در گام سوم، با استفاده از غلظت آلاینده به دست آمده از مرحله دوم، روش تابع پایه شعاعی استاندارد چند جمله‌ای مولتی کوادریک (MQ-RBF) به عنوان یک روش بدون شبکه برای حل معادله دیفراسیل جزئی انتقال-پخش به کار گرفته می‌شود. در مدل MQ-RBF، ورودی‌های مدل شامل غلظت آلاینده، مختصات پیزومترها، ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب پخش و ضریب شکل است. در این گام، برای یک گام زمانی بعد، غلظت آلاینده در هر نقطه دلخواه از مخزن مورد مطالعه که پیزومتر مشاهده شده وجود ندارد تخمین زده می‌شود. همچنین مقدار بهینه ضریب شکل در MQ-RBF (c_s) (برای معادله انتقال-پخش) در هر گام زمانی با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل تعیین می‌شود. شکل (۳) فلوچارت مدل پیشنهادی ANFIS-RBF را نشان می‌دهد.

۲-۳- روش رفع نویز موجکی

مدل‌های جعبه سیاه مثل ANFIS داده محور است و کارایی مدل‌های داده محور به شدت به کمیت و کیفیت داده‌ها بستگی دارد؛ به علاوه وجود نویزهای پنهان در داده‌ها ممکن است بر کارایی مدل‌های پیش‌بینی انتقال آلاینده‌ها تاثیر گذارد. به همین دلیل رفع نویز داده‌ها به‌عنوان روشی قدرتمند برای زدودن خطا

www.SID.ir

Archive of SID

از داده‌ها مطرح است. روش آستانه موجک برای رفع نویز که ویژگی‌های موضعی سیگنال‌های غیرایستا را در هر دو دامنه فرکانسی و زمانی روش می‌سازد، به عنوان یک فیلتر قدرتمند نسبت به سایر روش‌های رفع نویز (برای نمونه فیلتر کالمن و واینر فقط در سیستم‌های خطی کاربرد دارد؛ فیلتر کالمن مجموع برای خطاهای گوسین مناسب بود و فقط دو ممان اول خطا را پوشش داد و تاثیر محدودی در ارزیابی عدم قطعیت غیرخطی دارد) مطرح است [10].

دوناهو (۱۹۹۵) روش رفع نویز موجکی را بر اساس آستانه‌ها برای بدست آوردن سیگنال‌های رفع نویز شده صحیح ارائه داد. این روش که متداول‌ترین روش رفع نویز موجکی است، بدین گونه انجام می‌گیرد [11]:

الف- یک مادرموجک مناسب و تعداد سطح تفکیک‌پذیری انتخاب می‌شود. سری‌های زمانی یک بعدی اصلی (x_i) به زیرسری تخمین در سطح تفکیک‌پذیری M و زیرسری های جزء در سطوح تفکیک پذیری مختلف تا سطح M با استفاده از تبدیل موجک تجزیه می‌شوند. مقادیر مطلق زیر سری‌های جزء در صورت کمتر بودن از آستانه‌های مشخص 'T در هر سطح تفکیک پذیری به صفر تبدیل می‌شوند. اگر مقادیر مطلق زیرسری‌های جزء بزرگتر ازمقدار آستانه 'T در آن زیر سری باشند، آنگاه اختلافشان با 'T مانند رابطه (۱) جایگزین مقادیر زیرسری‌های جزء می‌شود:

$$dj(t) = \begin{cases} \text{sgn}\ (dj(t))\ (\ |dj(t)| - T') & |dj(t)| > T' \\ 0 & |dj(t)| \le T' \end{cases} \qquad (۱)$$

که $d_j(t)$ $(j=1,2,\ldots, M)$ مقادیر مطلق زیر سری‌های جزء (زیروند j نشانگر سطوح تفکیک پذیری jام) را نشان می‌دهد. رابطه (۱) مقادیر آستانه را برای رفع نویز موجکی در هر سطح تفکیک در زیرسری های جزء بکار می‌گیرد. زیرسری تخمین آستانه‌گذاری نمی‌شود.

دوناهو و جانستون (۱۹۹۵) بر مبنای مقیاس کمترین خطای مربعات، یک روش بهینه برای حذف خطای گوسین از طریق آستانه کل ارائه کردند. در این روش مقدار آستانه از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [12].

$$T' = \hat{\sigma}\sqrt{2\ln(n)} \qquad (۲)$$

که n تعداد نمونه‌های خطادار سیگنال و $\hat{\sigma}$ انحراف معیار کلی خطا است. ازآنجاکه مقدار واقعی واریانس خطا $\hat{\sigma}$در دسترس نیست، در مورد خطای گوسین می‌توان انحراف معیار $\hat{\sigma}$ را با توجه به رابطه (۳) از روی ضرایب موجک تخمین زد.

$$\hat{\sigma} = \left\lceil \frac{median\ (|d_j(t)|)}{0.6745} \right\rceil \qquad (۳)$$

۲-۴- مدل شبکه عصبی فازی تطبیقی

مدل ANFIS به عنوان یک تابع تخمین‌گر عمومی در بسیاری از مسائل کاربردی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در این پژوهش، به منظور غلبه بر عدم قطعیت پدیده از مدل شبکه عصبی فازی تطبیقی برای مدل‌سازی انتقال آلودگی استفاده شده‌است. این مدل در برگیرنده دو مدل فازی و عصبی در یک ساختار است. بخش فازی رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی بوسیله شبکه عصبی تعیین می‌شود. بنابراین ویژگی‌های هر دو مدل فازی و عصبی در شبکه عصبی- فازی تطبیقی نهفته است [13]. ممدانی-آسیلین و تاکاگی-سوگنو دو نوع تکنیک شناخته شده‌ای است که به صورت وسیع به کار برده شده‌اند و در سیستم فازی مطلوب بوده‌اند [14]. در این پژوهش از روش فازی مرتبه اول سوگنو برای مدلسازی زمانی جریان آب و انتقال آلودگی استفاده شده‌است. برای یک مدل فازی مرتبه اول سوگنو با دو ورودی، یک خروجی و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌ها، یک مدل شبکه عصبی- فازی تطبیقی معمولی تشکیل می‌شود [15]. در این حالت فرض می‌کنیم که سیستم فازی دارای ورودی $\mathbf{x}$ و$\mathbf{y}$ و یک خروجی f است.

برای چنین مدلی قوانین معمولی با در نظر گرفتن دو قانون فازی اگر- سپس (If-then rules) به صورت زیر تعریف می‌شود.

Rule 1: If $\mu(x)$ is A_1 and $\mu(y)$ is B_1; then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Rule 2: If $\mu(x)$ is A_2 and $\mu(y)$ is B_2; then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

www.SID.ir

Archive of SID

که متغیرهای A1، A2، B1 و B2 به ترتیب توابع عضویت برای ورودی های x و y هستند و p1، q1، r1، p2، q2 و r2 پارامترهای تابع خروجی است. بنابراین در این حالت فرمول‌بندی در شبکه عصبی- فازی تطبیقی از یک آرایش شبکه عصبی پنج لایه پیشرو پیروی می‌کند. اطلاعات بیشتر در زمینه مدل ANFIS را می‌توان در منبع [13] ملاحظه نمود.

۲-۵- روش عددی بدون شبکه

روش هم‌جایگی توابع پایه شعاعی اولین بار توسط کانزا (۱۹۹۰) برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی مطرح شد **[16]**. این تکنیک بسیار عمومی، ساده و موثر است و در بسیاری از مسائل مهندسی بصورت موفقیت آمیز مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل ۳. فلوچارت مدلسازی انتقال آلودگی در محیط متخلخل با استفاده از مدل ANFIS-RBF

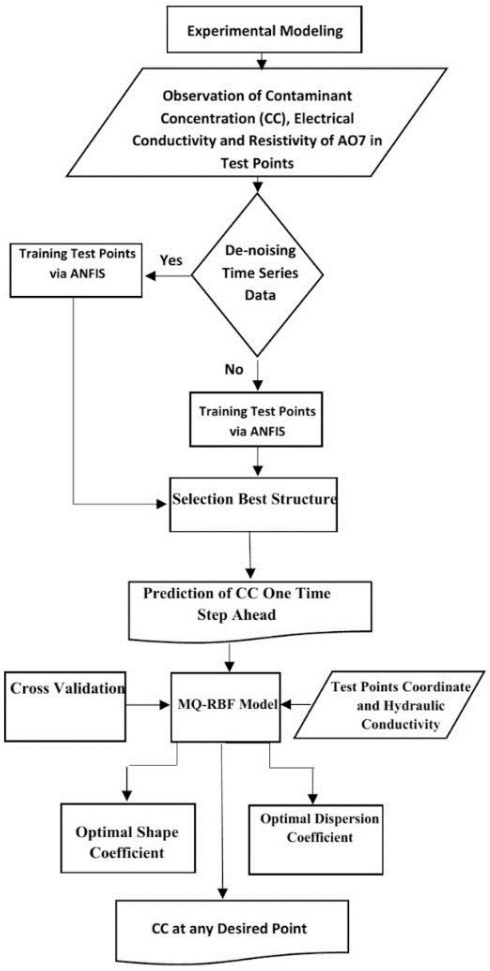

Fig. 3. Flowchart of contaminant transport modeling in porous media using ANFIS-RBF model

با در نظر گرفتن یک مسئله پایدار کلی در d بعد $(d = 1,2,3)$ معادله دیفرانسیل جزئی بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$Lu = f(\vec{x}) \quad \text{in} \quad \Omega, \qquad Bu = g(\vec{x}) \quad \text{on} \quad \partial\Omega \tag{۴}$$

که L و B به ترتیب اپراتور دیفرانسیل اعمال شده به نقاط داخلی (Ω) و مرزی $(\partial\Omega)$ محدوده محاسباتی است.

اگر $\{P_i = (\vec{x}_i)\}_{i=1}^{N}$ مختصات N نقطه هم‌جایگی محدوده محاسباتی، به طوریکه $\{(\vec{x}_i)\}_{i=1}^{N_I}$ نقاط درونی و $\{(\vec{x}_i)\}_{i=N_I+1}^{N}$ نقاط مرزی باشد. حل تحلیلی معادله (٤) می‌تواند بصورت زیر ارائه شود:

$$u(\vec{x}) = \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \varphi_j(\vec{x}) \tag{۵}$$

که $\{\lambda_j)\}_{j=1}^{N_I}$ ضرایب مجهول که باید تعیین شود و $\varphi_j(\vec{x}) = \varphi(\|P - P_j\|)$ می‌تواند هر تابع پایه شعاعی باشد. در اینجا، $r = \|P - P_j\|$ فاصله اقلیدسی بین نقاط $P = (\vec{x})$ و $P_j = (\vec{x}_j)$ است.

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (٤) خواهیم داشت:

$$\sum_{j=1}^{N} L\left[\varphi_j(\vec{x}_i)\right]\lambda_j = f(\vec{x}_i), \qquad i = 1,2,...,N_I \tag{۶}$$

$$\sum_{j=1}^{N} B\left[\varphi_j(\vec{x}_i)\right]\lambda_j = g(\vec{x}_i), \qquad i = N_{I+1}, N_{I+1}, ..., N \tag{۷}$$

معادلات (٦ و ٧) یک سیستم معادلات خطی است که می‌تواند به صورت فرم ماتریسی بیان شود:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\boldsymbol{\lambda} \tag{۸}$$

که در آن $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N)^T$ بردار ضرایب مجهول است که باید تعیین شود؛ $\mathbf{B} = (u_1, u_2, ..., u_N)^T$ بردار مربوط به داده‌های مشاهداتی معلوم داخلی و مرزی است؛ $\mathbf{A}$ ماتریس درون‌یاب تابع پایه شعاعی است.

در مسائل دو بعدی و با روش MQ-RBF، مقدار تابع تخمین برای u در هر نقطه از $\bar{x}_i$ می‌تواند از رابطه ۹ تعیین شود [2]:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\hat{u}(\vec{x}) = \sum_{j=1}^{N} \lambda_j \left[\sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + c_s^2} \right] \quad (۹)$$

که x و y مختصات نقطه مورد نظر در محدوده محاسباتی، x_i و y_i مختصات نقاط هم‌جایگی، c_s ضریب شکل است.

برای مسائل وابسته به زمان در بعد $(d = 1,2,3)$، برای گسسته‌سازی عبارت وابسته به زمان بسط تیلور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. البته در این پژوهش، روش غیرخطی شبکه عصبی به جای گسسته‌سازی خطی در پارامترهای وابسته به زمان به کار گرفته می‌شود.

معادله انتقال-پخش یک نوع آلاینده محلول را با در نظر گرفتن فاکتور تاخیر به مقدار واحد در حالت دو بعدی می‌توان بصورت زیر بیان کرد [17 , 18]:

$$D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (۱۰)$$

در معادله ۱۰، $D_{xx} = \alpha_{xx} v_x$ و $D_{yy} = \alpha_{yy} v_y$ است که α_{xx} و α_{yy} به ترتیب پخشیدگی طولی و عرضی $[L]$ در امتدادهای **x** و **y** می‌باشد. در معادله (۱۰) فرض می‌شود یکی از محورهای اصلی مختصات بر امتداد پخشیدگی طولی منطبق است.

با در نظر گرفتن محیط متخلخل همگن و جریان دائمی معادله ۱۰ با استفاده از روش RBF به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$v_x \alpha_{xx} \left(\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial^2 x^2} \lambda_j \right) + v_y \alpha_{yy} \left(\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial^2 y^2} \lambda_j \right) - v_x \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \lambda_j - v_y \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} \lambda_j = 0 \quad i = 1,2,...,N_I \quad \text{for interior points} \quad (۱۱)$$

$$\sum_{j=1}^{N} \varphi_j(\vec{x}_i) \lambda_j = C(\vec{x}_i), \quad i = N_{I+1}, N_{I+1}, ..., N \quad \text{for boundary points} \quad (۱۲)$$

۳- نتایج و بحث

عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های انتقال آلودگی در آبهای زیرزمینی از قبیل هدایت هیدرولیکی، ضریب پخش و تغییرات زمانی آنها و شرایط مرزی نامشخص باعث شده‌اند تا مدل‌سازی جریان آب و انتقال آلودگی در محیط‌های متخلخل، غیرخطی و پیچیده باشد. در این پژوهش، عبارت‌های مکانی (سمت چپ معادله ۱۰) با روش بدون شبکه و عبارت زمانی (سمت راست معادله ۱۰) با روش هوش مصنوعی حل می‌شوند.

در ابتدا به منظور تعیین اثر داده‌های نویز دار و بدون نویز در کارایی مدلسازی زمانی غلظت آلاینده در محیط‌های متخلخل، از روش مبتنی بر آستانه موجکی برای رفع نویز سری‌های زمانی استفاده شد. برای این هدف، مدل‌هوش مصنوعی (ANFIS) برای پیش‌بینی غلظت AO7 در کلیه پیزومترها برای یک گام زمانی بعد (۳ دقیقه) آموزش داده شد. سپس داده‌های رفع نویز شده با روش آستانه موجک در مدل ANFIS به منظور توانایی روش رفع نویز اعمال شد. در این مدلسازی ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و بقیه داده‌ها برای اعتبار سنجی مدل به کار گرفته شدند.

برای تعیین لایه ورودی مدل ANFIS، تاخیر غلظت آلاینده در پیزومترهای مخزن ماسه، هدایت الکتریکی و مقاومت ویژه محلول AO7 به عنوان ورودی‌های مدل‌ها امتحان شدند تا بهترین ورودی برای مدلسازی تعیین شود. چهار ترکیب به شرح زیر به عنوان لایه ورودی مطرح شدند:

Comb. (1): C_t, EC_t, R_t
Comb. (2): C_t, C_{t-1}, EC_t, R_t
Comb. (3): C_t, C_{t-1}, C_{t-2}, EC_t, R_t
Comb. (4): C_t, C_{t-1}, C_{t-2}, C_{t-3}, EC_t, R_t

که $\mathbf{C_t}$ نشان‌دهنده غلظت AO7 در پیزومترها در گام زمانی t است. EC_t و R_t به ترتیب بیان‌گر هدایت الکتریکی و مقاومت ویژه در پیزومترها می‌باشد. لایه خروجی شامل یک نرون C_{t+1} (غلظت AO7 در گام زمانی t+1) است.

در این مطالعه، مدل ANFIS برای پیش‌بینی غلظت AO7 در کلیه پیزومترها با ترکیب‌های ورودی مختلف به کار گرفته شد. در مدل ANFIS تعداد و نوع توابع عضویت و انتخاب تعداد تکرار از فاکتورهای اساسی هستند که می‌توانند کارایی مدل را تحت تاثیر قرار دهند. مطالعات نشان داده‌است که استفاده از تعداد زیاد توابع عضویت تاثیر نامطلوب در نتایج تخمین دارد. توابع عضویت مورد استفاده در این پژوهش تابع گوسی، تابع ترکیبی گوسی، تابع ذوزنقه‌ای، تابع مثلثی شکل، تابع زنگوله‌ای، تابع π شکل، تفاضل دو تابع حلقوی و حاصل ضرب دو تابع

www.SID.ir

Archive of SID

حلقوی بوده‌اند. برای مثال، ترکیب (۱ و ۲) با تابع عضویت trimf، ترکیب (۳) با تابع عضویت guss2mf و ترکیب (٤) با تابع عضویت gussmf و با تعداد چهار قانون (rule) ساختار مناسبی را در سیستم ANFIS برای مدل‌سازی AO7 تشکیل می‌دهند.

به طور مشخص، بیشتر مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها در سری‌های زمانی هیدرولوژیک از قبیل غلظت آلاینده‌ها ممکن است دارای نویز باشند. انتخاب یک روش مطمئن برای کاهش نویز بستگی به قدرت و کارایی آن دارد. در این پژوهش، از روش رفع نویز موجکی مبتنی بر آستانه به عنوان یک تکنیک کاربردی کاهش نویز برای رفع نویز سری‌های زمانی AO7 استفاده شد. کارایی این روش مبتنی بر انتخاب موجک مادر مناسب، سطح تجزیه و مقدار آستانه است. بر این اساس، موجک خانواده Daubechie (db) (Haar,db2, db3, db4, db5) به عنوان موجک مادر برای رفع نویز سری‌های زمانی AO7 به کار گرفته شد. موجک‌های دوبچی هم بصورت متعامد و هم بصورت غیرمتعامد هستند و رابطه صریح ریاضی مشخصی به جز برای فرم Haar (db1) ندارند.

شکل ٤. تجزیه سری‌های مشاهداتی غلظت AO7 در سطح تجزیه ۳ با موجک مادر db4 (a3: سینگال تقریب؛ d1, d2, d3: جزئیات زیر سیگنال‌ها به ترتیب در سطح ۱، ۲ و ۳)

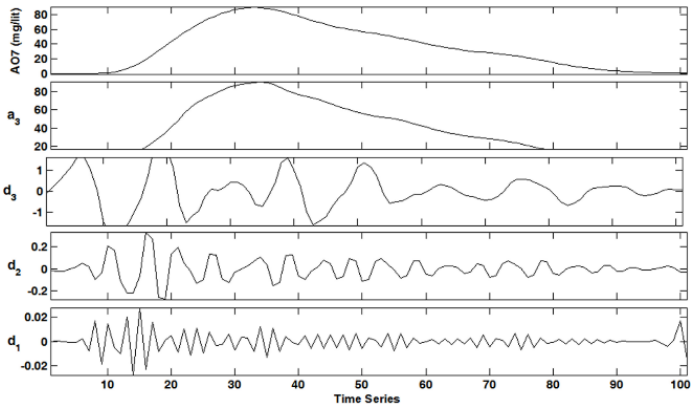

Fig. 4. Flowchart of contaminant transport modeling in porous media using ANFIS-RBF model

به منظور کاربرد تحلیل موجک‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیک، سطوح تجزیه ۳، ٤ و ٥ با فرآیند سعی و خطا و بر حسب مقادیر *RMSE* و R^2 در مدل ANFIS به کار بسته شد. نتایج نشان داد که موجک مادر db4 با سطح تجزیه ۳ برای مدل-سازی مطلوب است. برای نمونه، جزئیات سری زمانی تجزیه شده AO7 در سطح تجزیه ۳ با موجک مادر db4 برای پیزومتر TP6 در شکل (٤) نشان داده شده‌است.

مقادیر مناسب آستانه برای سری‌های زمانی AO7 از طریق رابطه دوناهو (معادله ۲) مشخص شد. برای نمونه، نتایج نشان داد که مقادیر آستانه ۳/۰٤ میلی گرم بر لیتر برای غلظت AO7 به منظور رفع نویز داده‌های پیزومتر TP6 مناسب است.

مقایسه مدلسازی زمانی غلظت AO7 با داده‌های نویز دار و بدون نویز از طریق روش ANFIS در جدول (۲) نشان داده شده‌است. نتایج نشان داد که کارایی مدل ANFIS می‌تواند با رفع نویز سری‌های زمانی در کلیه ترکیب‌ها به صورت اندکی افزایش یابد. مطابق جدول (۲) و بر اساس نتایج روش ANFIS در هر دو مرحله آموزش و درستی‌آزمایی، نویز در داده‌های آزمایشگاهی ناچیز بوده است. این امر ممکن است به دلیل عدم قطعیت کمتر داده‌ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی باشد. مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی غلظت AO7 در پیزومتر TP6 بدست آمده از مدل ANFIS با استفاده از داده‌های نویز دار و رفع نویز شده در شکل (٥) نشان داده شده‌است.

در مرحله مدلسازی مکانی، خروجی‌های مدل‌های هوش مصنوعی در تخمین زمانی از مرحله قبل در مدل MQ-RBF برای تخمین مقادیر غلظت AO7 در نقاط مورد نظر تانک ماسه که هیچ پیزومتر مشاهداتی برای تخمین AO7 در گام زمانی بعد وجود ندارد، وارد شدند.

برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی با استفاده از روش MQ-RBF، به عنوان یکی از توانایی‌های روش‌های بدون شبکه، شرایط داخلی مشخص می‌توانند به عنوان شرایط مرزی موضعی مورد استفاده قرار گیرند. دقت روش کانزا اساسا به انتخاب ضریب شکل (c_s) در مدل MQ-RBF (معادله ۹) بستگی دارد. تعیین دقیق مقدار ضریب شکل هنوز هم به عنوان یکی از موضوع‌های پژوهش مطرح است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. مقایسه نتایج مدلسازی زمانی غلظت AO7 با استفاده از مدل ANFIS و داده‌های نویز دار و رفع نویز شده

De-noised	3.04	Comb. (4)	gussmf	0.039	0.053	0.994	0.839

Noise condition	Threshold	Input combination	Network structure	*RMSE* (absorption)		Determination Coefficient *(DC)*	
				Calibration	Verification	Calibration	Verification
Noisy	-	Comb. (1)	trimf	0.099	0.056	0.964	0.818
De-noised	3.04	Comb. (1)	trimf	0.110	0.053	0.956	0.838
Noisy	-	Comb. (2)	trimf	0.089	0.052	0.971	0.847
De-noised	3.04	Comb. (2)	trimf	0.076	0.050	0.979	0.860
Noisy	-	Comb. (3)	gauss2mf	0.031	0.032	0.996	0.942
De-noised	3.04	Comb. (3)	gauss2mf	0.008	0.018	0.998	0.981
Noisy	-	Comb. (4)	gussmf	0.080	0.059	0.982	0.800

Table 2. Comparison of ANFIS results in temporal modeling of AO7 using noisy and de-noised dat

هاردی (۱۹۹۰) نشان داد که انتخاب ضریب شکل بستگی به فاصله میانگین ($\boldsymbol{d_{ave}}$) نقاط هم‌جایگی دارد، به طوریکه $c_s=0.815d_{ave}$ است [19]. گلبرگ و همکاران (۱۹۹٦) اعتبارسنجی متقابل را برای مشخص کردن ضریب شکل بهینه در مدل MQ-RBF به کار بردند [20]. تسای و همکاران (۲۰۱۰) از روش جستجوی طلایی برای تعیین ضریب شکل قابل اعتماد در مدل MQ-RBF استفاده کردند [21].

شکل ۵. نمودار مشاهدات در مقابل محاسبات غلظت AO7 برای پیزومتر TP6 با استفاده از داده‌های نویز دار و بدون نویز از طریق مدل ANFIS

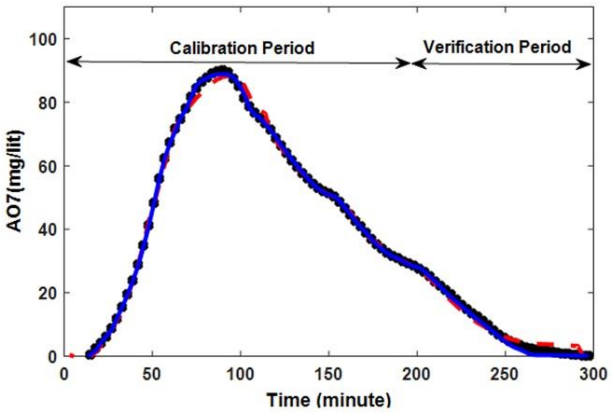

Fig. 5. Observed versus computed AO7s of piezometer TP6 using both noisy and de-noised data via ANFIS model

در این پژوهش، قبل از اعمال روش ترکیبی ANFIS-RBF برای مدل‌سازی مکانی–زمانی AO7 در حالت غیردائمی، ضریب شکل تحت شرایط ماندگار برای هر گام زمانی با استفاده روش اعتبار سنجی متقابل کالیبره شد. سپس مقدار ضریب شکل در تابع پایه شعاعی به عنوان یک متغیر وابسته به زمان که می‌تواند مقادیر متفاوتی در گام‌های زمانی مختلف داشته باشد در مدل ترکیبی پیشنهادی به کار گرفته شد.

برای تعیین غلظت آلاینده AO7 در هر نقطه دلخواه از تانک ماسه، معادله دیفرانسیل پاراه‌ای مربوط به مسئله انتقال آلودگی (معادله ۱۰) بایستی حل شود. دقت حل بستگی به پارامتر پخش و مقدار ضریب شکل MQ-RBF دارد. به دلیل عدم قطعیت و تغییرات زمانی مقدار پارامتر پخش، انتخاب مقادیر بهینه برای این پارامتر هنوز جای سوال دارد. برای این منظور، محدوده معقولی از مقادیر ضریب شکل و پارامتر پخش را بر اساس شرایط آزمایشگاهی انتخاب و با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و معادله دیفرانسیل جزئی انتقال آلودگی بهینه شدند.

بر اساس شرایط آزمایشگاهی، مقادیر ۰ تا ۰/۵ برای ضریب شکل و مقادیر ۰/۰۱ تا ۰/۱ متر برای پخشیدگی طولی در فرآیند بهینه‌سازی در نظر گرفته شدند. پخشیدگی عرضی معمولا برابر ۳۰ درصد پخشیدگی طولی در نظر گرفته می‌شود [22]. نتایج نشان داد که مقادیر بهینه ضریب شکل در مدل-سازی AO7 بین ۰/۰٤۱ تا ۰/۱۰٦ در گام‌های زمانی مختلف می‌باشد. بیشترین تغییرات پخشیدگی طولی در گام زمانی بین ٤۰ تا ۱۰۰ دقیقه قابل مشاهده می‌شود. این موضوع ممکن است به دلیل شرایط آزمایشگاهی باشد. به طوریکه در اوایل آزمایش، آلودگی AO7 در تانک ماسه پخش نشده‌است و کلیه پیزومترها در شرایط تقریباً یکسان از لحاظ آلودگی قرار داشته-اند (زمان بین ۰ تا ٤۰ دقیقه)؛ پس از مدتی (٤۰ دقیقه بعد) آلودگی به برخی پیزومترها می‌رسد و تغییرات پخشیدگی طولی

www.SID.ir

Archive of SID

از این زمان تا زمانی که آلودگی تقریباً به همه پیزومترها برسد (دقیقه صدم) زیاد می‌شود. از طرف دیگر، بیشترین تغییرات ضریب پخش طولی در مقادیر بیشینه غلظت AO7 اتفاق افتاده‌است.

نتایج نشان داد که مقدار ضریب شکل نمی‌تواند توسط یک مقدار مشخص بیان شود. بنابراین می‌توان گفت که مقدار ضریب شکل در مدل MQ-RBF وابسته به نوع و شکل معادله دیفرانسیل جزئی حاکم، هندسه محدوده محاسباتی، شرایط اولیه و تغییرات زمانی شرایط مرزی است.

برخی عدم قطعیت‌ها (عدم قطعیت کمتر در شرایط آزمایشگاهی و عدم قطعیت زیاد در شرایط واقعی) از قبیل عدم کاربرد دقیق ضریب هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده، پخش و غیره وجود دارند که نسبت به زمان متغیر هستند و چنین عدم قطعیت‌هایی می‌توانند با بهینه کردن ضریب شکل و پخشیدگی طولی به منظور تطبیق مقادیر محاسباتی و مشاهداتی (به عنوان یک طرح همسان‌سازی داده‌ها) حل و فصل شوند. بنابراین پخشیدگی طولی کالیبره شده نه تنها بیانگر پخش بلکه غلبه بر چنین عدم قطعیت‌هایی را نیز در بر می‌گیرد.

شکل ٦. نقشه منحنی میزان غلظت آلاینده AO7 در دقیقه ٤٨

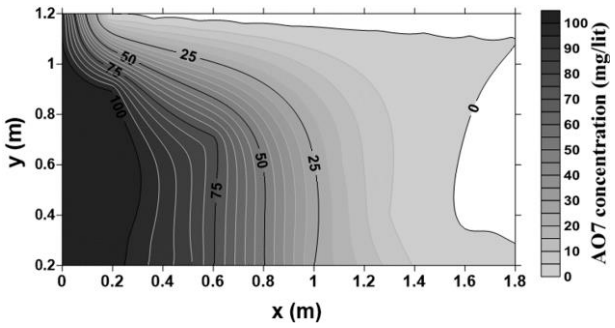

Fig. 6. Contour map of AO7 concentration at 48th minute

روش اعتبارسنجی متقابل به منظور اعتبار سنجی مدل ترکیبی پیشنهادی ANFIS-RBF انجام گرفت. برای این کار، مقادیر غلظت AO7 در پیزومترهای TP4 و TP8 در طول فرآیند مدلسازی به عنوان شرایط مرزی یا داخلی معلوم در نظر گرفته نشد و با استفاده از مدل پیشنهادی ANFIS-RBF در گام‌های زمانی مختلف تخمین زده شدند. سپس نتایج مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در دسترس دو پیزومتر مورد مقایسه قرار گرفتند. برای این منظور، مقادیر تخمینی AO7 در سایر ۸ پیزومتر که از طریق واسنجی مدل هوش مصنوعی بدست آمده‌اند به عنوان شرایط داخلی برای حل معادله دیفرانسیل جزئی انتقال-پخش به وسیله روش بدون شبکه در هر گام زمانی، مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس معیار ارزیابی (DC)، کارایی مدل پیشنهادی در مدل‌سازی انتقال آلودگی در محیط‌های متخلخل زمانی که داده‌ها رفع نویز می‌شوند در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی به مقدار کمی بیشتر می‌شود (تا حد ۵٪).

پس از درستی‌آزمایی مدل ترکیبی ANFIS-RBF ، پهنه‌بندی آلاینده AO7 در محدوده مورد مطالعه انجام گرفت. برای نمونه، شکل (٦) خطوط میزان AO7 را در دقیقه ٤٨ ام نشان می‌دهد.

٤- نتیجه‌گیری

نتایج مقایسه مدلسازی زمانی غلظت AO7 در شرایط آزمایشگاهی با داده‌های نویز دار و بدون نویز از طریق روش ANFIS نشان داد که کارایی مدل ANFIS می‌تواند با رفع نویز سری‌های زمانی در کلیه ترکیب‌ها به صورت اندکی افزایش یابد. همچنین وجود نویز در داده‌ها تاثیر کمی در روش ANFIS در هر دو مرحله آموزش و درستی‌آزمایی داشته است. این امر ممکن است به دلیل عدم قطعیت کمتر داده‌ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی باشد. براساس مطالعات آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ضریب شکل در مدل MQ-RBF اساسا بستگی به نوع و شکل معادله دیفرانسیل جزئی حاکم، شرایط هندسی محدوده محاسباتی و تغییرات شرایط مرزی و اولیه دارد. نتایج پژوهش نشان داد که کارایی مدل پیشنهادی ANFIS-RBF در شرایط عدم قطعیت در مدل انتقال آلودگی از دقت مناسبی برخوردار است و می‌تواند نقش موثری در مدیریت منابع آب زیرزمینی و محیط زیست ایفا کند. سایر مدل‌های عددی مانند SUTRA برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی در محیط‌های متخلخل نیازمند شرایط مرزی مشخص، مشخصات سفره آب زیرزمینی، ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب پخش و غیره می‌باشد؛ در صورت مشخص نبودن هر یک از پارامترهای مذکور مدل با

www.SID.ir

Archive of SID

خطا مواجه شده و قادر به مدیریت عدم قطعیت نمی‌باشد. همچنین در خصوص امکان بروز کردن داده‌ها در هر گام زمانی میسر نبوده و مدل بایستی مجددا اجرا شود. ولی در روش پیشنهادی علاوه بر بروز رسانی داده‌ها در هر گام زمانی، امکان اجرای آن در شرایط نامشخص بودن پارامترهای هیدرودینامیکی سفره و فقدان وضعیت سفره‌های محدوده مورد مطالعه قابل اجراست؛ به عبارت دیگر مدل پیشنهادی از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است.

۵- مراجع References

[1] Bear, J. & Cheng, A. H.-D. (2010), Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer Science & Business Media.

[2] Nourani, V. & Mousavi, S. (2016), Spatiotemporal Groundwater Level Modeling Using Hybrid Artificial Intelligence-Meshless Method. Journal of Hydrology. 536, 10-25.

[3] Ferreira, A.J.M., Kansa, E.J., Fasshauer, G.E. & Leitao V.M.A. (2009), Progress on Meshless Methods. Computational Methods in Applied Sciences. 11, 209-241.

[4] Nourani, V. & Mano, A. (2007), Semi-Distributed Flood Runoff Model at sub Contintal Scale for South Western Iran. Hydrological Processes, 21 (23), 3173-3180.

[5] Nourani, V., Hosseini Baghanam, A., Rahimi, A. Y. & Nejad, F. H., 2014. Evaluation of Wavelet-Based De-Noising Approach in Hydrological Models Linked to Artificial Neural Networks, In: Islam, T., Srivastava, P.K., Gupta, M., Mukherjee, S., Zhu, X., Eds.). Artificial Intelligence Techniques in Earth and Environmental Science, Springer. 209-241.

[6] Rudolph, D.L., Kachanoski, R.G., Celia, M.A., LeBlanc, D.R. & Stevens J.H. (1996), Infiltration and Solute Transport Experiments in Unsaturated Sand and Gravel, Cape Cod, Massachusetts: Experimental Design and Overview of Results. Water Resources Research. 32(3), 519-532.

[7] Panteleit, B., Kessels, W. & Schulz, H.D. (2002), Geochemical processes in the salt-freshwater transition zone-Preliminary results of a 2D sand tank experiment. Proceedings of the 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, Netherland.

[8] Thorenz, C. (2002), Application of a Model Adaptive Approach to the Simulation of Density Driven Flow in Unsaturated Laboratory System. Proceedings of the 17th Salt Water Intrusion Meeting, Delft, Netherland.

[9] Jalbert, M., Dane, J.H., Abriola, L.M. & Pennell, K.D. (2000). A Non-Dimensional Evaluation of Tracer Sensitivity to Density Effects. Ground Water. 38(2), 226-233.

[10] Nourani, V., Mousavi, S., Dabrowska, D., & Sadikoglu, F. (2017), Conjunction of Radial Basis Function Interpolator and Artificial Intelligence Models for Time-Space Modeling Of Contaminant Transport In Porous Media. Journal of Hydrology, 548, 569-587.

[11] Donoho, D. L. (1995), De-noising by Soft-thresholding. IEEE Transactions on Information Theory. 41, 613-627.

[12] Donoho, D. L. & Johnstone, I. M. (1995), Adapting to Unknown Smoothness via Wavelet Shrinkage. Journal of the American Statistical Association. 90(432), 1200-1224.

[13] Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. & Mizutani, E. (1997), Neuro-Fuzzy and Soft Computing; a Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice-Hall .

[14] Kacprzyk, J. & Pedrycz, W. (2015), Springer Handbook of Computational Intelligence. Springer.

[15] Aqil, M., Kita, I., Yano, A. & Nishiyama, S. (2007), A comparative study of artificial neural networks and neuro-fuzzy in continuous modeling of the daily and hourly behaviour of runoff. Journal of Hydrology, 337, 22-34.

[16] Kansa, E. J. (1990), Multiquadrics-a Scattered Data Approximation Scheme with Applications to Computational Fluid-Dynamics-II Solutions to Parabolic, Hyperbolic and Elliptic Partial Differential Equations. Computers & Mathematics with Applications. 19, 147-161.

[17] Wang, H. F. & Anderson, M. P. (1982), Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods. Academic Press.

[18] Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979), Groundwater. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall-INC, 197.

[19] Hardy, R. L. (1990), Theory and Applications of the Multiquadric-Biharmonic Method 20 Years of Discovery 1968-1988. Computers & Mathematics with Applications. 19, 163-208.

[20] Golberg, M. A., Chen, C. S. & Karur, S. R. (1996), Improved Multiquadric Approximation for Partial Differential Equations. Engineering Analysis with Boundary Elements. 18, 9-17.

[21] Tsai, C. H., Kolibal, J. & Li, M. (2010), The golden Section Search Algorithm for Finding a Good Shape Parameter for Meshless Collocation Methods. Engineering Analysis with Boundary Elements. 34(8), 738-746.

[22] Lovanh, N., Zhang, Y., Heathcote, R. C. & Alvarez, P. J. (2000), Guidelines to Determine Site-Specific Parameters For Modeling The Fate And Transport Of Monoaromatic Hydrocarbons in Groundwater, Report Submitted to the Iowa Comprehensive Petroleum Underground Storage Tank Fund Board. University of Iowa, Iowa City, Iowa.

www.SID.ir

Archive of SID

Experimental Study of Contaminant Transport in Porous Media Using ANFIS-RBF Hybrid Model

Shahram Mousavi[*1]

1- Assistant professor, Young Researchers and Elite Club, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran

sh.mousavi@m-iau.ac.ir

Abstract

Some uncertainties in the field parameters such as dispersion and hydraulic conductivity, unknown boundary conditions and the noise of the measured data are among the main limiting factors in the groundwater flow and contaminant transport modeling. Thus, simulation of contaminant transport can be an important task in hydro-environmental researchs and consequently, it is necessary to develop the robust models which can determine the temporal and spatial forecast of contaminant. For temporal modeling contaminant concentration, several numerical methods, such as finite volume method, finite difference method, boundary element method and finite element method have been used for computional solution of governing advection-dispersion partial differential equation. In this study, a new hybrid model based on adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) as an black-box model and radial basis function (RBF) as a meshless method was developed. In fact, the proposed method employed the advantageous of both arthificial intelligence and meshless techniqus for modeling contaminant transport in porous media. In this research, an experimental was done for examining the efficiency of the proposed method. In this way, an acrylic sand tank was made with ten piezometers, one inlet with three adjustors. In order to supply contaminant a submersible pump was used. Also, constant water level was maintained using adjustor valves at both end of the tank. The thickness of acrylic sand tank 10 mm and dimensions $2.00\times1.30\times0.20$ m^3 were chosen. The sand sample porosity was measured 0.3. The grid size and time interval were considered 0.1×0.1 m×m and 3-minute, respectively. The constant-head test was employed to meaure the hydraulic conductivity of soil as a standard laboratory test. An UV Spectrophotometer (DR5000, HACH Company, USA) was used for measurement of the AO7 concentration. The maximum wavelength was measured 485 nm for AO7 concentration. Also, an electrical conductivity meter (EC600, A FLIR Company, USA) was used for measurement of the resistivity and electrical conductivity of AO7. In this study, time series of AO7 concentration observed at different piezometers of sand tank were firstly de-noised by the wavelet-based data de-noising approach. Then, the effect of noisy and de-noised data on the performance of ANFIS model was compared. For this end, time series of AO7 concentration observed in 10 different piezometers were trained and verified via ANFIS model to predict the AO7 concentration at one month ahead. Then, considering the predicted AO7 concentration of piezometers as interior conditions, the multiquadric radial basis function as a meshless method which solves partial differential equation of contaminant transport modeling in porous media, was employed to estimate AO7 concentration values at any point within the study area (in the experiment, sand tank) where there is not any piezometer. In this stage, optimal values of dispersion coefficient in advection-dispersion partial differential equation and shape coefficient of MQ-RBF were determined using cross validation approche. The cross validation method was finally applied to verify the performance of the proposed ANFIS-RBF model for two piezometers which were not considered in the calibration stage.In temporal contaminanat transport modeling, de-noised data enhanced the performance of ANFIS methods up to 5 percent in the experimental study. Results showed that the efficiency of ANFIS-RBF model is a reliable thechnique for contaminant transport modeling in porous media.

Keywords: Experimental, ANFIS, Radial Basis Function, Contaminant

www.SID.ir