

مدل‌سازی کمی توزیع نیترات در آبخوان دشت اردبیل با استفاده از منطق فازی

مهدی کرد^{۱*}، اصغر اصغری مقدم^۲، محمد نخعی^۳

۱. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان

moghaddam@tabrizu.ac.ir

۲. استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

nakhaeimohammad@yahoo.com

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۶/۲۶

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۵

چکیده

در دهه‌های اخیر آلودگی آب‌های زیرزمینی با نیترات در اثر افزایش استفاده از کودهای نیتراته، منابع آب شرب را با یک مشکل رو به رشد مواجه کرده است. دشت اردبیل دارای وسعتی حدود ۹۰۰ کیلومتر مربع است که بیشترین بهره‌برداری آب در این دشت، از منابع آب زیرزمینی و از طریق چاه‌ها صورت می‌گیرد. در بررسی‌های کیفی مشخص شد که آبخوان دشت اردبیل در برخی از نقاط دارای مقادیر زیادی نیترات است. هدف از این پژوهش، مدل‌سازی توزیع غلظت نیترات در محدوده آبخوان دشت اردبیل است. برای این منظور اقدام به نمونه‌برداری از ۶۱ حلقه چاه بهره‌برداری با توزیع مناسب منطقه‌ای شد که ۴۵ نمونه برای مدل‌سازی و ۱۶ نمونه برای اعتبارسنجی مدل به کار برده شد. برای مدل‌سازی با استفاده از منطق فازی، از مدل ساجنو استفاده شد که شامل سه مرحله بود: ۱. تعیین ساختار داده‌ها از طریق خوشه‌بندی؛ ۲. ارتباط داده‌های ورودی به خروجی‌های مدل از طریق تعریف قوانین یا رول‌ها و ۳. تخمین پارامترهای مدل از طریق بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا. برای اعتباردهی به روش استفاده‌شده، نتایج مدل منطق فازی با نتایج کریجینگ مقایسه شده است. نتایج نشان داد که استفاده از منطق فازی برای مدل‌سازی توزیع مکانی روشی کارا و به خصوص در مناطق با وسعت زیاد که فاصله بین نقاط نمونه‌برداری زیاد است دارای عملکرد بهتری است. خروجی نهایی مدل توزیع غلظت نیترات نشان می‌دهد که غلظت نیترات در بخش‌هایی از حاشیه شمالی و جنوب‌غربی دشت، بالای ۱۰ میلی‌گرم بوده و حدود ۱۷ درصد آبخوان را به خود اختصاص می‌دهد. از این نقشه می‌توان در مدیریت کاربری آب برای مصارف شرب استفاده کرد و برای بهبود کیفیت آب در این مناطق تمهیدات مناسب را در آینده در نظر گرفت.

کلیدواژه

آب زیرزمینی، خوشه‌بندی، منطق فازی، نیترات.

۱. سرآغاز

امروزه آلودگی آب زیرزمینی با نیترات در اثر افزایش استفاده از کودهای نیتراته و تقاضای آب شرب به علت افزایش جمعیت مشکلات عدیده‌ای را متوجه مصرف‌کنندگان این بخش از منابع آب کرده است. تأثیرات نامطلوب ناشی از غلظت‌های بالای نیترات در آب شرب، روی سلامتی، از جمله سرطان معده، ناراحتی‌های گدد لنفوای و ممتوگلوبینمیا، به خوبی مشخص شده است. به

لزوم شناخت کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی به‌منزله مهم‌ترین منابع تأمین آب کشور امری بدیهی است. بنا به اعلام مسئولان شرکت مدیریت منابع آب در سال ۸۹، سالانه حدود ۹۷ میلیارد متر مکعب آب در کشور مصرف و ۶۳ میلیارد متر مکعب آن از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود (اصغری مقدم، ۱۳۸۹).

استواری و همکاران (۱۳۹۱) برای بررسی تغییرات مکانی نیترات در آب زیرزمینی دشت لردگان اقدام به پهنه‌بندی نیترات از طریق روش‌های زمین‌آماری کردند. برای این منظور، از ۳۲ حلقه چاه کشاورزی در چهار نوبت، طی سال ۱۳۸۹ نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که میانگین غلظت نیترات در این چهار نوبت ثابت بوده است.

در سنوات اخیر، در شبیه‌سازی فرایندهای محیطی، به علت پیچیده‌بودن محیط مدل‌سازی، داده‌های کیفی و عدم قطعیت داده‌های کمی و استفاده از هوش مصنوعی مورد توجه قرار گرفته است (Nadiri et al., 2013; Tayfur et al., 2014; Kord and Asghari Moghaddam, 2014; Nadiri et al., 2014). در بیشتر این کارهای تحقیقاتی، از مزایای منطق فازی در کنار روش‌های دیگر سود جست‌ه‌اند. برای مثال، در مطالعه‌ای که خزائی و همکاران (۱۳۹۱) انجام دادند، کارایی دو روش شبکه عصبی و منطق فازی در پیش‌بینی غلظت آلاننده منوکسید کربن مقایسه شد که نتایج آن‌ها حاکی از عملکرد خوب مدل بود. علاوه بر آن، از جمله مواردی که در زمینه مدل‌سازی با استفاده از منطق فازی صورت گرفته است می‌توان به مواردی همچون برآورد توزیع مکانی بارندگی با کمک تئوری مجموعه‌های فازی و ارزیابی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی تهران-کرج با روش DRASTIC و منطق فازی اشاره کرد (رحیمی بندرآبادی و ثقفیان، ۱۳۸۶؛ نیک‌نام و همکاران، ۱۳۸۶). Dixon و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از منطق فازی آسیب‌پذیری سفره به آلودگی را بررسی کردند. آن‌ها در این ارزیابی به این نتیجه رسیدند که دسته‌بندی اطلاعات و تعیین مرز بین این دسته‌ها از اهمیت زیادی برخوردار و منطق فازی دارای کارایی بهتری نسبت به روش‌های معمول است. Huwe و Mertens در سال ۲۰۰۲ از روش فازی برای محاسبه نیترات نفوذ کرده در آب در محدوده‌های کشاورزی استفاده کردند. Shrestha و همکاران (۲۰۰۷) از یک مدل ترکیبی قطعی-فازی برای شبیه‌سازی انتقال نیترات در مقیاس حوضه آبریز استفاده

همین دلیل در دو دهه اخیر آلودگی نیترات در سفره‌های آب زیرزمینی به موضوع مهم در حوضه هیدروژئولوژی و هیدروشیمی تبدیل شده است (Kim et al., 2009).

منابع علمی مختلف از اصلی‌ترین عوامل آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات را آلودگی غیرنقطه‌ای استفاده از کودهای شیمیایی و فعالیت‌های کشاورزی می‌دانند (Almasri and Kaluarachchi, 2005). دشت اردبیل نیز با مساحتی حدود ۹۰۰ کیلومتر مربع از این قاعده مستثنا نیست و به واسطه فعالیت‌های کشاورزی در برخی از نقاط مقادیر بالایی از غلظت نیترات را نشان می‌دهد.

مطالعات متعددی در زمینه بررسی آلودگی نیترات صورت گرفته است که در ادامه برخی از آن‌ها ذکر می‌شود. Kim و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی آماری و هیدروشیمیایی و توزیع مکانی نیترات در یک آبخوان کم‌عمق آبرفتی پرداختند. Flipo و همکاران (۲۰۰۷) آلودگی نیترات را در آبخوان گرندمورین فرانسه از طریق ترکیب مدل فیزیکی و زمین‌آمار بررسی کردند. آن‌ها از ترکیب چند روش برای شبیه‌سازی انتقال و فهم بهتر رفتار نیترات استفاده کردند. Majumder و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی غلظت‌های نیترات در سفره‌های حوضه مرکزی غرب بنگلادش پرداختند. آن‌ها با بررسی آب رودخانه، آب زیرزمینی کم‌عمق و عمیق و با استفاده از شاخص Cl/NO_3^- فرایند دنیتریفیکاسیون در منطقه را مشخص کردند. Lambrakis و Antonakos در سال ۲۰۰۷ با استفاده از سه روش ترکیبی بر اساس مدل DRASTIC آسیب‌پذیری آبخوانی در شمال یونان را نسبت به نیترات ارزیابی کردند. در ایران نیز آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات مسئله مهمی است و در بسیاری از دشت‌ها غلظت‌های بالایی از نیترات گزارش شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به بابل (محسنی، ۱۳۶۵)، مشهد (لطیف، ۱۳۸۱)، زنجان (محمدیان‌فضلی و صادقی، ۱۳۸۲)، همدان (جلالی و کلاه‌چی، ۱۳۸۴)، آمل (یوسفی و نائیج، ۱۳۸۶)، اصفهان (جعفری ملک‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۶) اشاره کرد.

۲. مواد و روش‌ها

دشت اردبیل در محدوده طول‌های جغرافیایی $48^{\circ}40'$ - $48^{\circ}00'$ و عرض‌های جغرافیایی $38^{\circ}30'$ - $38^{\circ}00'$ شمالی قرار گرفته است. از نظر توپوگرافی بخش پیرامونی منطقه، کوهستانی و بخش مرکزی آن دشت آبرفتی است. آب و هوای این منطقه از نوع سرد با زمستان‌های نسبتاً طولانی و تابستان‌های ملایم است. مقدار ریزش‌های جوی در این منطقه به طور متوسط 300 میلی‌متر در سال است. در گذشته بیشترین بهره‌برداری از منابع آب در دشت اردبیل از طریق چشمه‌ها، قنوت و رودخانه‌ها صورت می‌گرفت، اما در حال حاضر بیشترین بهره‌برداری از طریق چاه‌هاست. به منظور مدل‌سازی توزیع غلظت نیترات در آبخوان دشت اردبیل از 61 چاه بهره‌برداری در مهر ماه سال آبی 90 دشت اردبیل نمونه‌برداری و از آن‌ها، آنالیز شیمیایی به عمل آمد. برای بررسی و مطالعه بهتر وضعیت آبخوان سعی شد تا محل‌های نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شوند که محدوده دشت را به خوبی پوشش دهند. برای جمع‌آوری نمونه‌های آب زیرزمینی نیز از ظروف پلی‌اتیلن استفاده شد و غلظت‌های نیترات نمونه‌ها از طریق روش تیتراسیون تعیین شدند. شکل 1 محدوده مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. در این پژوهش 75 درصد نمونه‌ها (45 نمونه) برای مدل‌سازی و 25 درصد مابقی (16 نمونه) برای اعتبارسنجی مدل به کار رفته است.

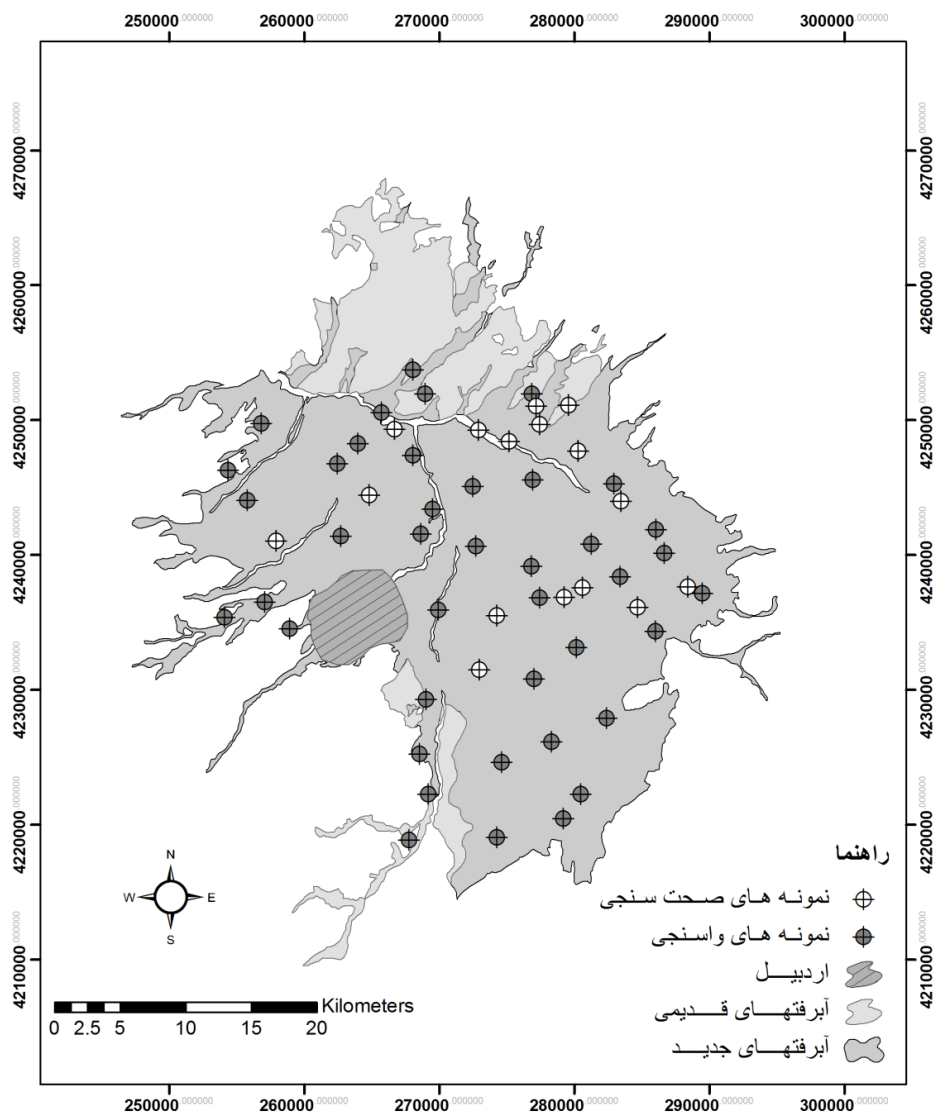
۱.۲. منطق فازی

برخلاف مجموعه‌های کلاسیک که اعضای آن‌ها به طور کامل عضو آن مجموعه اند در مجموعه‌های فازی اعضا دارای درجه عضویت اند که می‌تواند از صفر تا یک تغییر کند. فرم کلی مجموعه فازی به صورت زیر است:

$$A = \{ (x, \mu_{\bar{A}}(x)) , x \in X \}$$

کردند. Amini و همکاران (2005) از ترکیب خوشه‌بندی فازی با درون‌یابی مکانی برای ارزیابی وضعیت آلودگی خاک در منطقه اصفهان استفاده کردند. آن‌ها پس از خوشه‌بندی عناصر سنگین مقادیر توابع عضویت فازی را به وسیله کریجینگ^۱ درون‌یابی کردند. Tutmez و Hatipoglu در سال 2010 ، دو روش درون‌یابی با زمین‌آمار و منطق فازی را برای مدل‌سازی توزیع نیترات در آبخوان با هم مقایسه کردند. آن‌ها در پایان نتیجه گرفتند که استفاده از منطق فازی بهتر و کارتر از کریجینگ است.

دانشور وثوقی و دین‌پژوه (1391)، با استفاده از روش اسپیرمن، روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل را در چاه‌های پیژومتری ارزیابی کردند. آن‌ها در این مطالعه، به بررسی یون‌های اصلی در 32 پیژومتر موجود در دشت پرداختند. بر اساس یافته‌های آن‌ها کیفیت آب زیرزمینی اردبیل با گذشت زمان در حال افت است. بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد کار مدونی در خصوص مدل‌سازی نیترات در دشت اردبیل صورت نگرفته است. در مرور مطالعات پیشین مشخص شد که اکثر بررسی‌های کیفی حالت توصیفی داشته و در بررسی‌های کمی نیز از روش‌های آماری یا زمین‌آمار استفاده شده است. حتی در مواردی که تکنیک‌های هوش مصنوعی (مدل‌های جعبه سیاه) به کار گرفته شده‌اند، نظرهای کارشناسانه در تعیین روابط دخیل نشده و در نهایت نیز رابطه ریاضی ارائه نشده است. نوآوری مطالعه حاضر استفاده از مدل فازی در مدل‌سازی کمی توزیع نیترات بوده است که نتایج را به صورت روابط ریاضی مبتنی بر نظرهای کارشناسانه ارائه می‌کند. همچنین در کارهای تعیین کیفیت که تاکنون انجام شده تنها به تعیین کیفیت تک‌چاه‌های آب شرب پرداخته‌اند و کاری در خصوص کل آبخوان صورت نگرفته است. لذا در این مطالعه با روشی علمی و رویکردی نو، مدل‌سازی کمی توزیع نیترات در محدوده دشت اردبیل با استفاده از منطق فازی انجام گرفته و برای اعتباردهی به روش استفاده‌شده، نتایج آن با نتایج کریجینگ مقایسه شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه و محل‌های نمونه‌برداری

سوگنو می‌شوند. در مدل‌سازی، صرفاً از مدل سوگنو استفاده می‌شود، زیرا خروجی‌های مدل سوگنو به صورت خطی یا عدد ثابت‌اند. این مدل‌سازی شامل سه مرحله زیر است: ۱. خوشه‌بندی (تعیین ساختار)؛ ۲. قوانین یا رول‌ها (مکانیزم منطق فازی) و ۳. بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا (تخمین پارامتر).

خوشه‌بندی تکنیک معمول برای تحلیل داده‌های آماری است که در زمینه‌هایی مثل یادگیری ماشین، داده‌کاوی، شناسایی الگو و تحلیل تصاویر به کار می‌رود. در این مطالعه به منظور تعیین ساختار توزیع داده‌ها که شامل مختصات جغرافیایی و غلظت نیترات در نقاط

که در آن X عضوی از X و μ_A درجه عضویت X است که می‌تواند بین صفر تا یک متغیر باشد. برای در نظر گرفتن درجه عضویت از توابع عضویت استفاده می‌شود که شامل توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، گوسی دوطرفه، سیگموئیدی و غیره‌اند (Rajasekaran and Vijayalakshmi, 2005). یکی از کاربردهای تئوری فازی مدل‌سازی است. برای مدل‌سازی با استفاده از منطق فازی، ابتدا داده‌های ورودی به صورت توابع عضویت فازی نشان داده می‌شوند، سپس این توابع عضویت از طریق تعریف قوانین فازی به داده‌های خروجی مرتبط می‌شوند. سیستم‌های استنتاج فازی شامل دو نوع مددانی و

انجام داد. برای به دست آوردن تعداد بهینه خوشه‌ها از دو تابع اعتبار خوشه‌بندی FPI^۳ و MPE استفاده می‌شود (Minasny and McBratney, 2002; Vitharana et al., 2006).

$$FPI = 1 - \frac{cF - 1}{c - 1} \quad (۴)$$

c تعداد کلاسترها و F ضریب توزیع طبق عبارت زیر است.

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (\mu_{i,j})^2 \quad (۵)$$

$$MPE = \frac{H}{\log c} \quad (۶)$$

که H تابع انتروپی است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c \mu_{i,j} \log(\mu_{i,j}) \quad (۷)$$

در این تحقیق برای خوشه‌بندی از نرم‌افزار FuzME استفاده شده است. مقادیر FPI و MPE به دست آمده از طریق این نرم‌افزار برای تعداد کلاس‌های مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود تعداد بهینه کلاسترها به ازای کمترین مقادیر FPI و MPE، ۶ کلاس است.

نمونه برداری‌اند، از روش خوشه‌بندی فازی FCM استفاده شده است. در واقع خوشه‌بندی فازی روش کلاسترینگ است که اجازه می‌دهد یک داده به دو یا چند کلاستر تعلق داشته باشد. این روش خوشه‌بندی بر اساس مینیمم کردن تابع هدف زیر بنیان‌گذاری شده است (Amini et al., 2005).

$$J_m = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{i,j}^m \|x_j - c_i\|^2 \quad (۱)$$

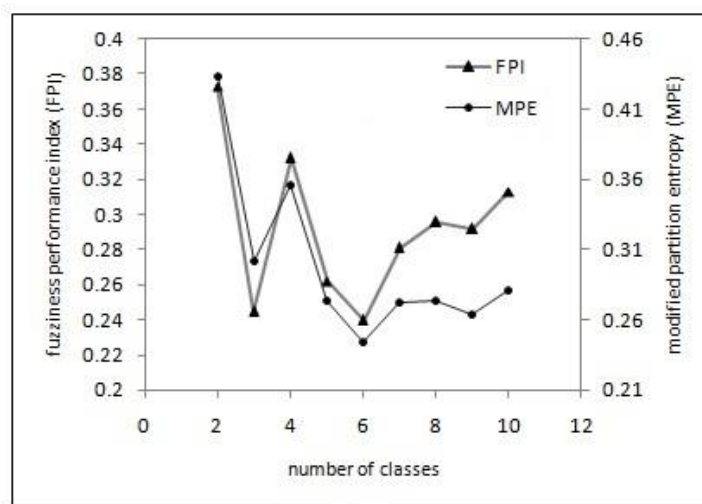
که

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_j - c_i\|}{\|x_j - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (۲)$$

و

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{i,j}^m \cdot x_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{i,j}^m} \quad (۳)$$

m توان وزنی (ضریب فازی) و عددی حقیقی و بزرگ‌تر از صفر است. k تعداد تکرار، c مرکز کلاستر، n تعداد نمونه‌ها، x مقدار نمونه و $\mu_{i,j}$ درجه عضویت نمونه‌هاست. $\mu_{i,j}$ ماتریسی است که تعداد سطرهایش برابر تعداد نمونه‌ها و ستون‌هایش برابر تعداد کلاسترها و مقدار هر یک از مؤلفه‌هایش بین صفر و یک است. خوشه‌بندی را می‌توان برای تعداد خوشه‌های مختلف



شکل ۲. تعیین تعداد بهینه کلاسترها با استفاده از دو شاخص FPI و MPE

۳.۲. مکانیزم منطق فازی

سیستم‌های استنتاج فازی، مدل‌های غیرخطی اند که رابطه بین ورودی و خروجی مدل را، با استفاده از قوانین اگر-آنگاه فازی توصیف می‌کنند (Jacquin and Shamseldin, 2006). در این پژوهش از سیستم فازی ساجنو و توابع عضویت گاوسی برای مدل‌سازی توزیع نیترا استفاده شده است. تابع عضویت گاوسی طبق معادله ۸ تعریف می‌شود.

$$f(x, \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

در مدل ساجنو خروجی‌ها تابعی خطی از ورودی‌ها در نظر گرفته می‌شوند. شکل تپیک مدل ساجنو در شکل ۳ نشان داده شده است.

در روابطی که در شکل ۳ به صورت خلاصه نشان داده شده است، X ، ماتریس ورودی‌های مدل که مجموعه‌ای متشکل از مجموعه‌های فازی تعریف شده در فضای ورودی است، Z ، ماتریس خروجی، R ، مجموعه قوانین فازی، α ، β و ε ، پارامترهای نامعلوم برای هر قانون که باید تخمین زده شوند و A و B به ترتیب توابع عضویت برای ورودی‌های x_1 و x_2 به شمار می‌روند و K تعداد قوانین است. در مدل ساجنو به ازای هر قانون یک تابع عضویت خروجی خواهیم داشت و خروجی نهایی با استفاده از فرمول (۹) به دست می‌آید.

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^K W_i z_i}{\sum_{i=1}^K W_i} \quad (9)$$

که W ، تابع وزن مربوط به هر خروجی است. در اینجا برای محاسبه خروجی نهایی از میانگین وزنی مقدار هر یک از خروجی‌ها (Z_i) استفاده شده است. وزن هر یک از خروجی‌ها از طریق اشتراک بین توابع عضویت ورودی تعیین می‌شود.

$$W_i(x) = \min_{j=1:K} (\mu_{i,j}(x_j)) \quad (10)$$

۴.۲. تخمین پارامترهای مدل

آخرین مرحله مدل‌سازی به دست آوردن پارامترهای α ، β و ε برای هر قانون است. در این مرحله برای به دست آوردن پارامترها از حداقل خطای مربعات یا LSE استفاده شده است (Chen, 2004).

شکل کلی یک تابع خطی به صورت زیر است:

$$Z = X \theta \quad (11)$$

که X یک ماتریس $m \times n$ به صورت زیر است.

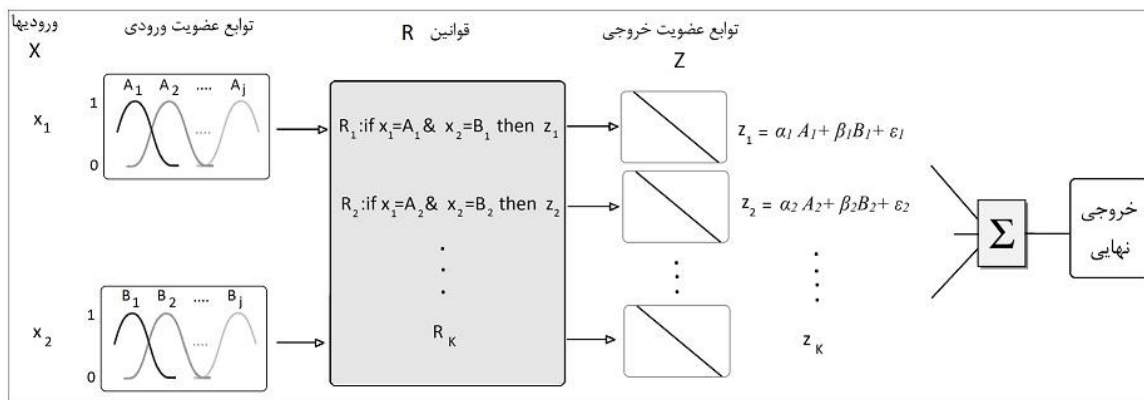
$$X = \begin{bmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{bmatrix} \quad (12)$$

و در آن u_i ورودی‌های مدل است و θ بردار پارامترهای مجهول با ابعاد $n \times 1$ به صورت زیر است.

$$\theta = [\theta_1, \dots, \theta_n]^T \quad (13)$$

همچنین Z بردار خروجی با ابعاد $m \times 1$ به صورت زیر

است.



شکل ۳. ساختار شماتیک مدل ساجنو

وابسته‌اند و به دلیل اینکه مجموعه این قواعد در نهایت باید یک حقیقت را بگویند، باید از عملگر اشتراک برای ترکیب این قواعد استفاده شود، به گونه‌ای که شرایط تمام قواعد را ارضا کند. به همین دلیل در مرحله به دست آوردن خروج نهایی نیز (معادله‌های ۹ و ۱۰) از عملگر اشتراک (یا همان \min) استفاده شده است.

به دلیل اینکه ورودی‌های سیستم به صورت UTM و اعداد بزرگ‌اند و از طرفی توابع عضویت فازی بین صفر تا یک تعریف می‌شوند، ابتدا ورودی‌ها بین محدوده صفر و یک نرمالیزه و با استفاده از خوشه‌بندی فازی، داده‌ها در شش دسته خوشه‌بندی شدند.

تعداد کل قوانین ممکن در طراحی منطق فازی برابر n^m است که در آن n تعداد خوشه‌ها و m تعداد ورودی‌هاست. نظر به اینکه در این مطالعه تعداد بهینه خوشه‌ها ۶ و تعداد ورودی‌های مسئله برابر ۲ است، تعداد کل قوانین ممکن برابر ۳۶ عدد خواهد بود. اما در این مدلسازی روابط صحیح بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم به وسیله خوشه‌بندی فازی و بهینه‌سازی دو تابع ۴ و ۶ تعیین شده است، لذا تنها قوانین صحیح در طراحی مدل فازی دخیل داده می‌شوند که بر اساس (Tutmez and Hatipoglu, 2010) و (Matlab user's 2001) (guide, برابر تعداد خوشه‌ها خواهد بود. به عبارت دیگر، شکل توابع عضویت ورودی، تعداد آن‌ها و حتی طرح قوانین برای آموزش، حاصل روش خوشه‌بندی FCM است.

بر این اساس مجموعه قوانین تعریف‌شده در زیر آورده شده است:

قانون ۱. اگر طول جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه (تابع عضویت) ۱ از ورودی ۱ و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه ۱ از ورودی ۲ باشد، آنگاه: خروجی برابر است با تابع عضویت ۱ خروجی.

قانون ۲. اگر طول جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه (تابع عضویت) ۲ از ورودی ۱ و عرض جغرافیایی

$$Z = [z_1, \dots, z_m]^T \quad (14)$$

اگر $X^T \cdot X$ غیرمفرد باشد، تخمین‌گر حداقل مربعات (LSE) به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\theta = (X^T X)^{-1} X^T Z \quad (15)$$

۵.۲. کریجینگ

کریجینگ روشی تخمینی است که بر پایه میانگین متحرک وزن‌دار استوار و بهترین تخمین‌گر خطی نااریب است. فرمول کریجینگ به صورت رابطه ۱۶ است (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷).

$$z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (16)$$

که در آن $z^*(x)$ ، غلظت برآوردی، λ_i وزن وابسته به نمونه $z(x_i)$ ، مقدار متغیر اندازه‌گیری‌شده و n ، تعداد نقاط اندازه‌گیری‌شده است.

در این تحقیق از کریجینگ معمولی استفاده شده است به این طریق که پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها و تبدیل داده‌های غیرنرمال به نرمال، الگوهای تغییرنا از طریق نرم‌افزار GS^+ رسم و بهترین الگوی تغییرنا انتخاب و خصوصیات ناهمسان‌گردی داده‌ها در منطقه بررسی شد. بر این اساس بهترین تغییرنمای به‌دست‌آمده دارای ساختار فضایی مدل نمایی، اثر قطعه‌ای ۰/۰۹ و سقف ۰/۵۰۵ است. در طراحی مدل فازی، قوانین اگر-آنگاه به صورتی که در ادامه شرح داده خواهند شد مبنای ارائه مدل فازی‌اند. از آنجا که هر نقطه مکانی در پهنه دشت اردبیل دارای طول و عرض جغرافیایی است، در نوشتن قوانین اگر-آنگاه برای محاسبه مقدار نیترات در آن نقطه، حتماً باید از حرف ربط «و» استفاده کرد (باید نوشت: اگر نقطه A دارای طول جغرافیایی X و عرض جغرافیایی Y بود، آنگاه مقدار نیترات آن برابر Z خواهد بود). حرف «و» را با عملگر اشتراک در معادلات فازی شبیه‌سازی می‌کنند، زیرا قواعد اگر-آنگاه تعریف‌شده ترکیب‌های شرطی‌اند که به شدت به هم

عضویت ورودی و خروجی (که در معادله ۸ و شکل ۳ نشان داده شده‌اند) در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، شکل ۴ ساختار سیستم فازی نهایی پس از واسنجی را نشان می‌دهد.

مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی نیترا از طریق منطق فازی و کریجینگ به منظور صحت‌سنجی نمونه‌ها، در شکل ۵ نشان داده شده است.

همچنین از سه شاخص آماری ریشه میانگین مربع خطاها (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) برای سنجش عملکرد مدل استفاده شده است. این شاخص‌های آماری به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - z_i^*)^2} \quad (17)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - z_i^*| \quad (18)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n \left(z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \right)^2} \quad (19)$$

در این روابط، n تعداد نمونه‌ها، z غلظت اندازه‌گیری شده و z^* غلظت محاسباتی است. خصوصیات آماری مقادیر محاسباتی نمونه‌های صحت‌سنجی در جدول ۲ آورده شده است.

نقطه مورد نظر متعلق به خوشه ۲ از ورودی ۲ باشد، آنگاه: خروجی برابر است با تابع عضویت ۱ خروجی.

قانون ۳. اگر طول جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه (تابع عضویت) ۳ از ورودی ۱ و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه ۲ باشد، آنگاه: خروجی برابر است با تابع عضویت ۳ خروجی.

قانون ۴. اگر طول جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه (تابع عضویت) ۴ از ورودی ۱ و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه ۴ از ورودی ۲ باشد، آنگاه: خروجی برابر است با تابع عضویت ۴ خروجی.

قانون ۵. اگر طول جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه (تابع عضویت) ۵ از ورودی ۱ و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه ۵ از ورودی ۲ باشد، آنگاه: خروجی برابر است با تابع عضویت ۵ خروجی.

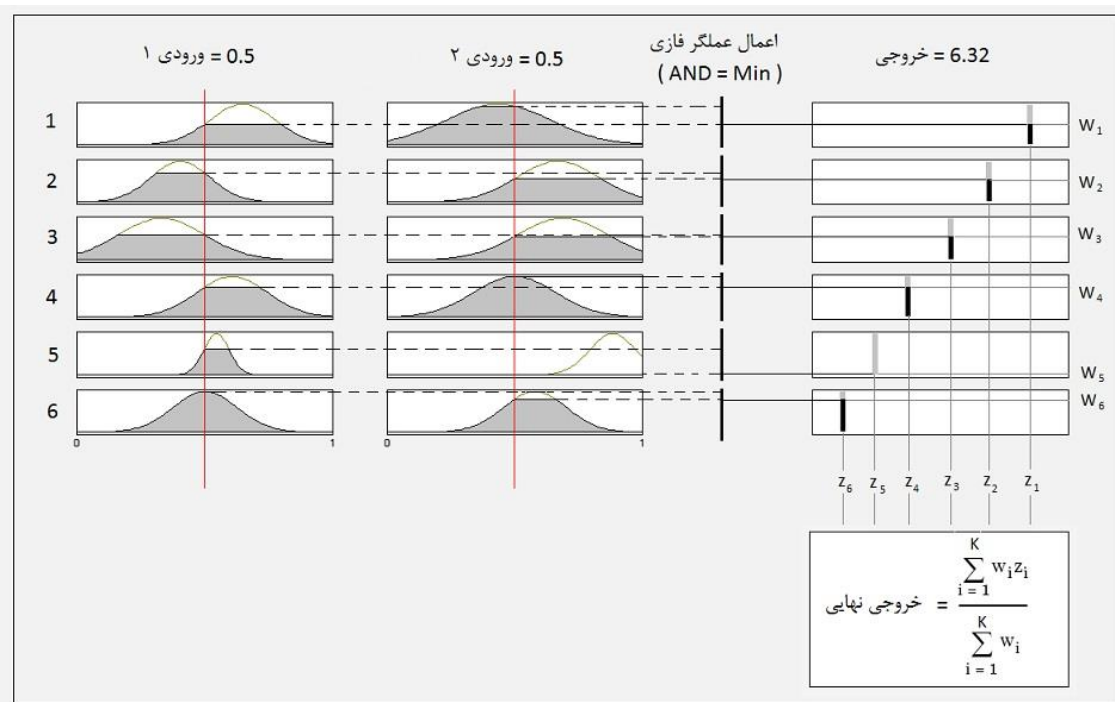
قانون ۶. اگر طول جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه (تابع عضویت) ۶ از ورودی ۱ و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر متعلق به خوشه ۶ از ورودی ۲ باشد، آنگاه: خروجی برابر است با تابع عضویت ۶ خروجی.

۳. نتایج و بحث

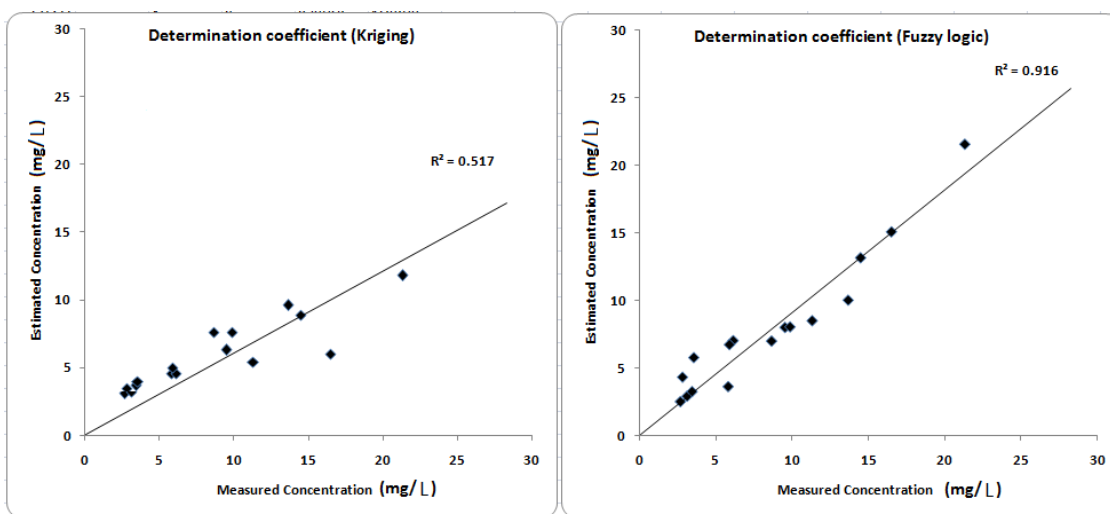
در این تحقیق از ۱۶ نمونه جداگانه برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده است. لذا پس از واسنجی، برای سنجش عملکرد مدل ارائه‌شده مدل صحت‌سنجی و نتایج آن با نتایج کریجینگ مقایسه شد. پارامترهای واسنجی شده توابع

جدول ۱. مقادیر پارامترهای بهینه‌شده توابع عضویت ورودی و خروجی

خوشه	ورودی ۱		ورودی ۲		خروجی	
	σ	C	c	α	β	ε
۱	۰/۱۶۷۲	۰/۳۳۱۳	۰/۶۹۰۲	۴۴/۸۳	۹/۹۳۷	-۳/۱۲۶
۲	۰/۱۲۵۶	۰/۵۰۲۷	۰/۵۸۰۷	۵۶۶/۴	-۳۱۷/۸	-۱۱۹/۴
۳	۰/۱۲۸۷	۰/۶۴۹۵	۰/۴۳۷۷	-۱۹/۱۸	۶۶/۰۹	۱۶/۷۲
۴	۰/۱۱۴۳	۰/۴۰۶۶	۰/۶۷۰۹	۱۲۷/۶	-۳۱۹/۴	۲۴۲/۱
۵	۰/۱۳۶۹	۰/۶۰۸۶	۰/۵۰۱۳	۱۳۲/۵	-۱۲۱/۵	-۱۰۵/۹
۶	۰/۰۴۹۲	۰/۵۴۷۸	۰/۸۸۵۶	-۲۴۴	-۲۶۵/۱	۳۹۲/۴



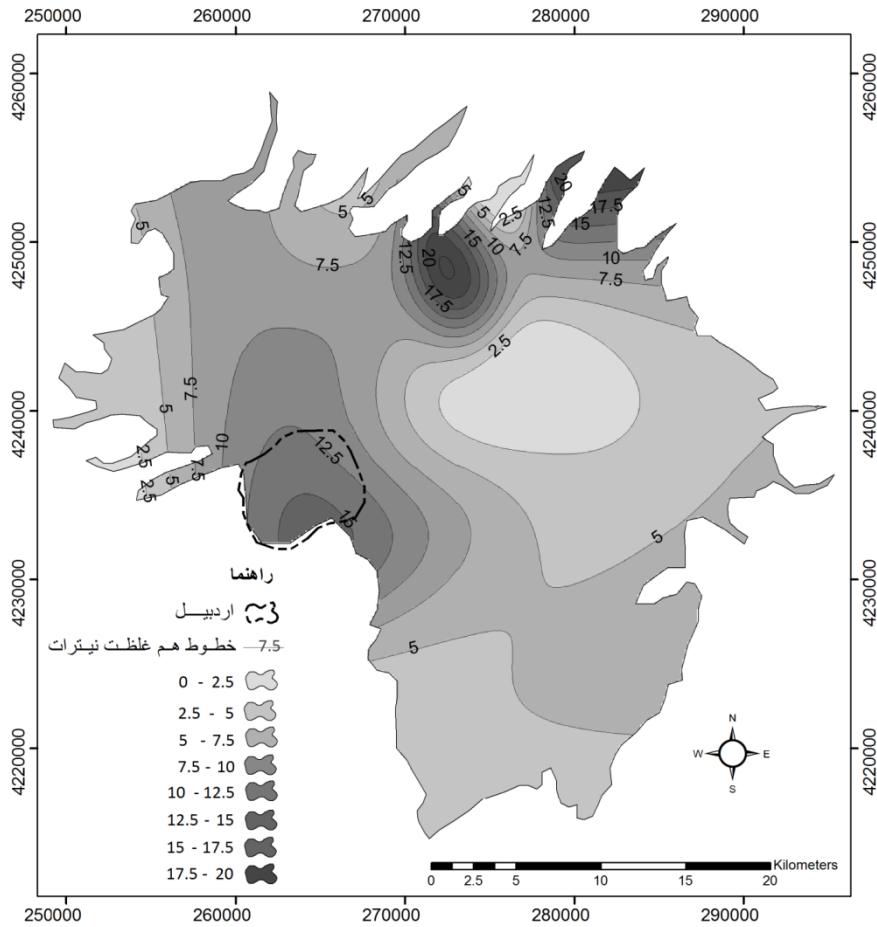
شکل ۴. ساختار سیستم فازی نهایی پس از بهینه‌سازی پارامترهای مدل



شکل ۵. غلظت‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده نیترات در نقاط کنترل از طریق دو روش کریجینگ و منطق فازی

جدول ۲. خصوصیات آماری داده‌های استفاده شده برای صحت‌سنجی

مدل	mean	Std	MAE	RMSE	R ²
منطق فازی	۷/۹۹	۵/۰۶۳	۱/۳۹۸۲	۱/۶۹۴۰	۰/۹۱۶
کریجینگ	۵/۸۲	۲/۵۹۴	۲/۹۶۷۷	۴/۳۵۴۹	۰/۵۱۷
اندازه‌گیری شده	۸/۶۵	۵/۵۷	-	-	-



شکل ۶. توزیع غلظت نیترات در آبخوان دشت اردبیل

نیترات در نقاط کنترل نبوده، در حالی که مدل‌سازی منطق فازی توانسته است نتایج رضایت‌بخشی را حاصل کند. مهم‌ترین بخش مدل‌سازی فازی، طراحی قوانین فازی است. استفاده از FCM روشی کارا برای تعیین مشخصات توابع عضویت ورودی و خروجی و تعیین قوانین صحیح و لازم و اجتناب از قوانین غیرضروری برای آموزش مدل‌سازی فازی است. با استفاده از خوشه‌بندی، داده‌های درون گروه شباهت زیادی با همدیگر و تفاوت چشمگیری با گروه‌های دیگر دارند. بزرگ‌ترین محدودیت استفاده از منطق فازی در ایجاد ارتباط بین داده‌های مکانی و درون‌یابی، تعیین تعداد بهینه خوشه‌هاست که این کار با استفاده از نرم‌افزار FuzME به راحتی امکان‌پذیر است.

همان‌طور که از شکل ۵ و نتایج مندرج در جدول ۲ برمی‌آید، مدل ارائه‌شده نسبت به روش کریجینگ نتایج بهتری داشته است. از این رو، پس از واسنجی و صحت‌سنجی، مدل منطق فازی برای محدوده آبخوان اجرا شد که نتایج آن به صورت یک رستر در شکل ۶ آورده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

قابل اعتماد بودن نقشه‌های توزیع مکانی عناصر و آلاینده‌ها نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب دارد. برای بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفی، معمولاً از روش‌هایی مانند زمین‌آمار استفاده می‌شود. بر اساس نتایج، روش زمین‌آمار کریجینگ بر اساس سه شاخص آماری MAE، RMSE و R^2 قادر به تخمین قابل قبول مقادیر غلظت

فرايندهای محیطی مختلف روی توزیع مکانی و ... وجود دارد، فایق آمد و مدل‌سازی صحیح‌تری از مسئله ارائه داد. لذا در مناطق با وسعت زیاد که خروجی روش‌های سنتی، از جمله زمین‌آمار به علت محدودیت نقاط پایش و فاصله زیاد بین آن‌ها، دقت کمی دارند، استفاده از این روش می‌تواند برای تولید داده استفاده شود.

با توجه به نتایج و دقت خوب مدل منطق فازی پیشنهاد می‌شود که برای مطالعه پدیده‌های طبیعی مانند توزیع مکانی عناصر، توزیع پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، تغییرات سطح ایستابی، تعیین هندسه آبخوان، پدیده‌های جوی و ... که پیش‌نیاز مطالعات جامع هیدروژئولوژیکی‌اند، مخصوصاً در مناطقی که با کمبود داده‌های مورد نیاز روش‌های زمین‌آماري مواجه‌ایم، از این روش استفاده شود.

یادداشت‌ها

1. Kriging
2. Fuzzy c-means
3. Cluster validity function
4. Determination coefficient

خروجی مدل توزیع غلظت نیترات نشان می‌دهد که غلظت نیترات در بخش‌هایی از حاشیه شمالی و جنوب‌غربی دشت بالای ۱۰ میلی‌گرم بوده است و حدود ۱۷ درصد آبخوان را به خود اختصاص می‌دهد. ناحیه با غلظت بالای نیترات در اطراف اردبیل با ناحیه خروج فاضلاب شهری انطباق کامل دارد و علت آن را به احتمال زیاد می‌توان مربوط به فاضلاب شهری دانست. همچنین، غلظت بالای نیترات در حاشیه شمالی دشت با نواحی دفن پسماندها دارای انطباق است که می‌توان غلظت بالای نیترات را به احتمال زیاد به آن نسبت داد.

از آنجا که چاه‌های آب شرب در سراسر دشت در وسعتی نزدیک به نهصد کیلومتر مربع پراکنده شده‌اند، می‌توان از این نقشه در مدیریت کاربری آب برای مصارف شرب استفاده کرد و برای بهبود کیفیت آب در این مناطق تمهیدات مناسب را در آینده در نظر گرفت.

یکی از مزایای استفاده از منطق فازی و خوشه‌بندی در مدل‌سازی توزیع مکانی این است که ساختار داده‌ها و ارتباط بین آن‌ها شناسایی شده است و با به کارگیری آن می‌توان بر محدودیت‌ها و مشکلاتی که در روش‌های دیگر همچون آنیزوتروپی داده‌ها، غیرهمگنی داده‌ها، تأثیر

منابع

- استواری، ی.، بیگی هرچگانی، ح. و داودیان، ع. ر. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات مکانی نیترات در آب زیرزمینی دشت لردگان، مدیریت آب و آبیاری، دوره ۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱، صص ۵۵-۶۷.
- اصغری مقدم، الف. ۱۳۸۹. اصول شناخت آب‌های زیرزمینی، انتشارات دانشگاه تبریز، ۳۴۹ ص.
- جعفری ملک آبادی، ع. و همکاران. ۱۳۸۳. بررسی غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی استان اصفهان، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هشتم، شماره سوم صص ۶۹-۸۲.
- جلالی، م. و کلاهچی، ز. ۱۳۸۴. غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی منطقه بهار همدان، مجله علوم خاک و آب، جلد ۱۹، شماره ۲، صص ۱۹۴ تا ۲۰۲.
- حسنی‌پاک، ع. الف. ۱۳۷۷. زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ ص.
- خزاعی، الف.، آل‌شیخ، ع. الف.، کریمی، م. و وحیدنیا، م. ح. ۱۳۹۱. مقایسه دو روش مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی- فازی در پیش‌بینی غلظت آلاینده مونوکسید کربن، محیط‌شناسی، سال سی و هشتم، شماره ۴، صص ۲۹-۴۴.
- دانشور وثوقی، ف. و دین‌پژوه، ی. ۱۳۹۱. بررسی روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از روش اسپیرمن، محیط‌شناسی، سال سی و هشتم، شماره ۴، صص ۱۷-۲۸.

- رحیمی بندرآبادی، س. و تقفیان، ب. ۱۳۸۶. برآورد توزیع مکانی بارندگی با کمک تئوری مجموعه های فازی، مجله علمی- پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره ۲، صص ۲۶-۳۸.
- لطیف، م. ۱۳۸۱. بررسی آلودگی نترات و منشأیابی آن در آب‌های زیرزمینی دشت مشهد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- محسنی، ا. ۱۳۶۵. بررسی وضع آلودگی آب‌های زیرزمینی به یون نترات در اثر کاربرد کودهای ازته در شهرستان بابل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- محمدیان فضلی، م. و صادقی، غ. ر. ۱۳۸۲. بررسی آلودگی منابع تأمین آب آشامیدنی شهر زنجان طی سال‌های ۷۹-۸۰، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی زنجان، شماره ۴۳، صص ۴۹ تا ۵۴.
- نیک‌نام، ر.، محمدی، ک. و جوهری‌مجد، و. ۱۳۸۶. ارزیابی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی تهران- کرج با روش DRASTIC و منطق فازی، مجله علمی- پژوهشی تحقیقات منابع آب ایران، سال سوم، شماره ۲، صص ۳۹-۴۷.
- هاشمی، س. ح.، عظیمی فادیکلابی، م. م.، رعیتی دماوندی، م. و برکتین، س. ۱۳۹۱. کاربرد روش ارزیابی جامع فازی در پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه‌ها، محیط‌شناسی، سال سی و هشتم، شماره ۶۲، صص ۱۰۳-۱۱۰.
- یوسفی، ذ. و نائیج، ا. ۱۳۸۶. بررسی و تعیین میزان نترات منابع آب آشامیدنی روستایی آمل، مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، دوره هفدهم، شماره ۶۱، صص ۱۶۱ تا ۱۶۵.
- Almasri, M. N. and Kaluarachchi, J. J. 2005. Multi-criteria decision analysis for the optimal management of nitrate contamination of aquifers. *Journal of Environmental Management*, 74, 365-381.
- Amini, M., Afyuni, M., Fathianpour, N., Khademi, H. and Flühler, H. 2005. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. *Geoderma*, 124 (3-4), 223-233.
- Antonakos, A. K. and Lambrakis, N. J. 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology*, 333, 288-304.
- Chen, X. 2004. Recursive Least-Squares Method with Membership Functions, *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Shanghai, pp: 1962-1966.
- Dixon, B., Scott, H. D., Steele, K. F. and Dixon, J. C. 2002. Prediction of aquifer vulnerability to pesticides using fuzzy rule-based models at the regional scale. *Physical Geography*, 23 (2), 130-153.
- Flipo, N., Jeanne'e, N., Poulin, M., Even, S. and Ledoux, E. 2007. Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin Aquifers (France): combined use of geostatistics and physically-based modeling. *Environmental Pollution*, 146 (1), 241-256.
- Jacquiu, A. p. and Shamseldin, A. Y. 2006. Development of rainfall-runoff models using Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System. *Journal Homepage: WWW.elsevier.com/locate/jhydrol*.
- Kim, K. H., Yun, S.T., Choi, B. Y., Chae, G. T., Joo, Y., Kim, K. and Kim, H. S. 2009. Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). *Journal of Contaminant Hydrology*, 107, 114-127.
- Kord, M. and Moghaddam, A. A. 2014. Spatial analysis of Ardabil plain aquifer potable groundwater using fuzzy logic. *Journal of King Saud University - Science*, 26, 129-140.
- Majumder, R. K., Hasnat, M. A., Hossain, Sh., Ikeue, K. and Machida, M. 2008. An exploration of nitrate concentrations in groundwater aquifers of central-west region of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 159, 536-543.
- Matlab user's Guide. 2001. Fuzzy logic toolbox, Matlab CD-ROM Mathworks, Inc.
- Mertens, M. and Huwe, B. 2002. FuN-Balance: a fuzzy balance approach for the calculation of nitrate leaching with incorporation of data imprecision. *Geoderma*, 109, 269- 287.
- Minasny, B. and McBratney, A. B. 2002. FuzME Version 3. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney NSW 2006, Australia. Available at: <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/fkme/program.html>; accessed 17/7/2005.

Nadiri, A., Fijani, E., Asghari-Moghaddam, A., Tsai, F. 2013. Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. *Journal of Hydroinformatics* , 15(4),1474-1490.

Nadiri, A., Chitsazan, N., Tsai, F., and Moghaddam, A. 2014. Bayesian Artificial Intelligence Model Averaging for Hydraulic Conductivity Estimation. *J. Hydrol. Eng.*, 19(3), 520–532.

Rajasekaran, S. and Vijayalakshmi Pai, G. A. 2005. Neural networks, fuzzy logic, genetic algorithms synthesis and applications, Prentice-Hall of India, New Delhi, 439.

Shrestha, R. R., Bardossy, A. and Rode, M. 2007. A hybrid deterministic–fuzzy rule based model for catchment scale nitrate dynamics. *Journal of Hydrology*, 342, 143– 156.

Tayfur, G., Nadiri, A., Moghaddam, A. 2014. Supervised Intelligent Committee Machine Method for Hydraulic Conductivity Estimation. *Water Resources Management*, 28(4):1173-84.

Tutmez, B. and Hatipoglu, Z. 2010. Comparing two data driven interpolation methods for modeling nitrate distribution in aquifer. *Ecological Informatics*, 5 , 311–315.

Vitharana, U. W. A., Van Meirvenne, M., Cockx, L. and Bourgeois, J. 2006. Identifying potential management zones in a layered soil using several sources of ancillary information. *Soil Use and Management*, 22, 405–413.