

کاربرد شاخص DWQI برای ارزیابی جامع کیفیت آب در آبخوان اردبیل

زهرا شیخی آلمان آباد^۱، فرخ اسدزاده^{۲*}، حسین پیرخراطی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۸/۲۸؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۰/۳۰)

چکیده

کیفیت آب از مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با توسعه و پایداری فعالیت‌های بشری است. کیفیت آب را می‌توان از مقایسه مقادیر پارامترهای کیفی آن با مقادیر استاندارد هر یک تبیین کرد. محدودیت‌های این روش از جمله عدم جامعیت آن موجب توسعه شاخص‌های تلفیقی کیفیت آب شده است. هدف از این پژوهش، بررسی جامع شرایط کیفی آب آشامیدنی در آبخوان اردبیل با استفاده از یک شاخص پیشنهادی ($DWQI_{Proposed}$) است و مقادیر کمی و توزیع این شاخص با شاخص‌های متداول کیفیت آب نظیر $DWQI_G$ و $DWQI_A$ مقایسه شده است. بدین منظور نمونه‌برداری از ۶۰ حلقه چاه واقع در آبخوان اردبیل در شهریورماه ۱۳۹۲ انجام گرفت و ۲۱ پارامتر مختلف فیزیکی و شیمیایی در آنها تعیین شد. سپس شاخص $DWQI_{Proposed}$ طی چهار مرحله شامل انتخاب خصوصیات کیفی آب و دسته‌بندی آنها، توسعه زیرشاخص، تخصیص ضریب وزنی برای خصوصیات برگزیده و ارائه تابع تجمیع محاسبه شد. نتایج نشان داد به‌رغم تفاوت در مقادیر کمی، الگوی توزیع فراوانی شاخص‌های $DWQI_G$ و $DWQI_{Proposed}$ مشابه هم است. شاخص‌های $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_A$ نیز در مقادیر زیاد تشابه فراوانی داشتند. با این حال، تفاوت بین میانگین شاخص‌های در منطقه معنادار بود ($P < 0/05$). سه شاخص یادشده براساس ضریب همبستگی پیرسون ارتباط معناداری داشتند ($P < 0/001$; $r = 0/98-0/99$). از بین پارامترهای کیفی مرتبط با بهداشت و سلامت، مقدار نترات همبستگی بسیار زیادی با شاخص‌های یادشده نشان داد ($P < 0/001$; $r = 0/712-0/815$) که بیان‌کننده تأثیر مهم نترات بر کیفیت آب در آبخوان اردبیل است. الگوی مکانی شاخص‌های کیفیت آب استحکام فضایی مطلوبی نشان داده و نقشه‌های کریجینگ ترسیم‌شده بیان‌کننده افزایش کیفیت آب در مناطق شرقی و کاهش آن در بخش جنوب‌غربی منطقه است.

کلیدواژگان: شاخص‌های تلفیقی کیفیت آب، کریجینگ، گروه‌های کیفی آب، نترات.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی حدود یک‌سوم از منابع آب کشور را تشکیل می‌دهند. با این‌حال، منابع آب زیرزمینی تأمین‌کننده بیش از نیمی از کل مصرف آب در کشور محسوب می‌شوند. آب‌های زیرزمینی به‌دلیل تماس با سازندهای مختلف زمین‌شناسی مقادیر مختلفی از املاح، مواد معلق و گازهای محلول دارند. این منابع همچنین می‌توانند بر اثر فعالیت‌های انسانی مانند استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی و تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و خانگی در معرض آلاینده‌های مختلف زیست‌محیطی قرار گیرند. بدیهی است فراهم‌بودن منابع آب کافی و مناسب برای مصارف گوناگون از عوامل مهم در توسعه پایدار یک منطقه است. وجود بیش از حد مجاز املاح و آلاینده‌ها در منابع آب زیرزمینی، می‌تواند استفاده از آن برای مصارف گوناگون را محدود سازد. این امر نیاز به ارزیابی دقیق کمی و کیفی منابع آب برای مصارف مختلف را اجتناب‌ناپذیر کرده است. بر این اساس، امروزه کیفیت آب از مؤلفه‌هایی است که ضرورت در نظر گرفتن آن در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب و همچنین ارزیابی سلامت حوضه‌های آبخیز و ایجاد تغییرات مدیریتی در آن کاملاً احساس شده است [۱]. براساس موارد یادشده و همچنین تأثیر شایان توجه فعالیت‌های انسانی بر منابع آب، پایش کیفیت این منابع براساس دیدگاه‌های مختلف مصرفی و از جمله، مصرف آشامیدن ضروری است.

ارزیابی دقیق کیفیت آب آشامیدنی از چالش‌های اساسی متخصصان علوم محیطی است و بدین‌منظور رویکردهای مختلفی استفاده شده است. در گذشته به‌منظور ارزیابی کیفیت آب، مقادیر کمی پارامترهای مختلف آن نظیر pH، EC، سختی و سایر پارامترها با مقادیر استاندارد و مجاز مربوط به آن سنجیده می‌شد و تصمیم‌گیری براساس آن صورت می‌گرفت [۲]. با این‌حال، مشکل اصلی این رویکرد، ناتوانی آن در ارائه تصویری جامع از شرایط کیفی آب است که تصمیم‌گیری و ارائه راهکارهای مناسب برای مصرف مطمئن منابع آب را دشوار می‌سازد [۳]. با توجه به محدودیت یادشده، تلاش برای توسعه شاخص‌های جامع‌تر برای ارزیابی کیفیت منابع آب از اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی با پژوهش‌های هورتون [۴]

آغاز شد. شاخص کیفیت آب^۱ (WQI) ارائه‌شده توسط هورتون [۴] بعدها توسط بنیاد ملی بهسازی^۲ ایالت متحده آمریکا با کاربرد تکنیک دلفی توسعه یافت [۵].

به‌طور خلاصه، شاخص‌های کیفیت آب را می‌توان به‌عنوان ابزارهای ریاضی در نظر گرفت که داده‌های پیچیده و فراوان مربوط به پارامترهای گوناگون کیفیت آب را در قالب امتیازهای عددی تجمیع می‌کنند و براساس آن ارزیابی کلی از شرایط کیفی منابع آب را ارائه می‌دهند [۲]. ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰]. تفاوت اساسی در توسعه شاخص‌های مختلف مربوط به تعداد و نوع پارامترهای کیفی استفاده‌شده، چگونگی محاسبه زیرشاخص‌های مربوط به هر پارامتر و در نهایت نوع تابع تجمیع استفاده‌شده است. بیشتر شاخص‌های کیفیت آب هر چند از نظر ارزیابی کلی کیفیت مناسب هستند، کم‌بودن تعداد پارامترهای شیمیایی استفاده‌شده در بیشتر آنها و نیز پوشش داده‌شدن اثر برخی پارامترهای اساسی به‌دلیل اهمیت یکسان ویژگی‌ها، از محدودیت‌های اساسی آنهاست [۲ و ۱۱]. توابع تجمیع استفاده‌شده در اغلب شاخص‌ها شامل استفاده از عملگرهای جمع و یا ضرب است که اغلب سبب ایجاد عدم قطعیت در مقدار نهایی شاخص کیفیت آب می‌شود و در برخی موارد می‌تواند تأثیر وجود روند در پارامترهای شیمیایی استفاده‌شده را پوشش دهد. از سوی دیگر، توابع تجمیع یادشده با توجه به حساسیت کم نسبت به برخی از پارامترهای شیمیایی مرتبط با سلامت انسان، توانایی کمتری در تبیین شرایط واقعی کیفیت آب دارند و در نتیجه تصمیم‌گیری نهایی برای مدیریت کیفیت منابع آب را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند [۱۲]. از این‌رو، در طول دهه اخیر نیاز به بازنگری در این شاخص‌ها به‌درستی تشخیص داده شده و تلاش‌های نسبتاً فراوانی در این زمینه صورت پذیرفته است. رامش و همکارانش [۲] نوعی روش ابتکاری و جدید را برای ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی استفاده کرده‌اند که در آن بیش از ۲۰ ویژگی کیفی آب با درجات متفاوتی از اهمیت، استفاده شده است. این روش با دسته‌بندی و ترکیب مناسب اثر این عوامل سعی در ارائه روشی جدید برای تجمیع تأثیرات پارامترهای کیفی آب دارد تا از این طریق تأثیر پارامترهای

1. Water Quality index

2. National Sanitation Foundation

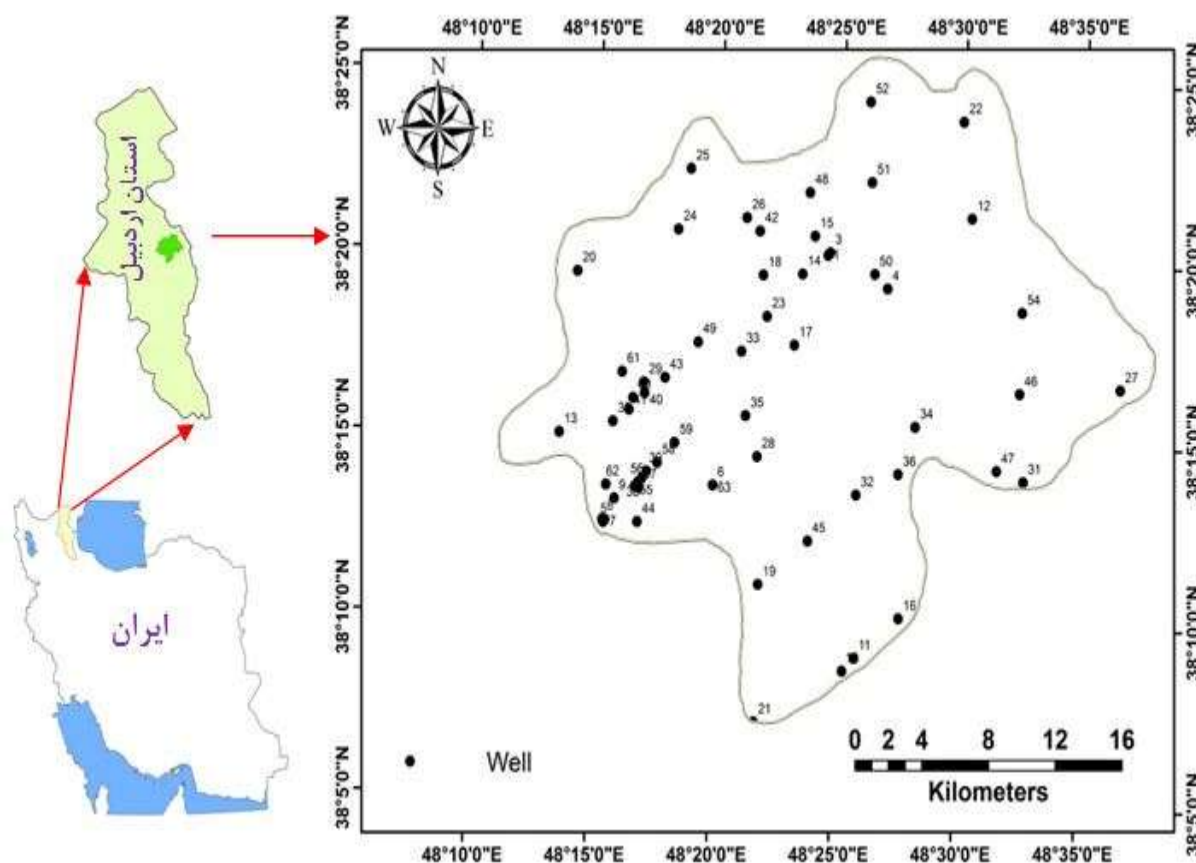
منطقه متوسط بارندگی ۳۰۰ میلی‌متر در سال را دارد و به‌وسیله ارتفاعاتی احاطه شده است که بخشی از رشته‌کوه‌های البرز هستند. منطقه از رسوبات کواترنری تشکیل شده است و از لحاظ زمین‌شناسی جزئی از واحد زمین‌ساختی البرز غربی-آذربایجان است. در شکل ۱ محدوده آبخوان به مساحت تقریبی ۷۱۰ کیلومترمربع به همراه محل قرارگیری چاه‌های نمونه‌برداری شده نشان داده شده است. نمونه‌های آب زیرزمینی از ۶۰ حلقه چاه موجود در منطقه طی فصل خشک (شهریورماه) سال ۱۳۹۲ برداشت شد، ۲۱ ویژگی مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، در نمونه‌های یادشده با استفاده از روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین شد.

یادشده به‌درستی و به ترتیب اهمیت‌شان در شاخص نهایی محاسبه‌شده انعکاس یابد. با در نظر گرفتن این واقعیت که شاخص یادشده روشی نوآورانه از نظر تعداد پارامترها و نیز چگونگی وزن‌دهی و تجمیع تأثیرات آنهاست، نتایج آن در تحلیل کیفیت آب می‌تواند بسیار مفید واقع شود. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی در آبخوان اردبیل با استفاده از شاخص یادشده صورت گرفته و تلاش شده با مقایسه روش‌های تجمیع از نوع ضرب و جمع با روش پیشنهادشده توسط رامش و همکارانش [۲]، تحلیل دقیق‌تری از شرایط کیفی آب آشامیدنی در منطقه یادشده ارائه شود.

روش کار

منطقه مطالعه‌شده و نمونه‌برداری

آبخوان اردبیل در شمال غرب ایران قرار گرفته است. این



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی چاه‌های نمونه‌برداری و آبخوان اردبیل در ایران و استان اردبیل

ریاضی مربوط به تبدیل این پارامترهای کیفی آب به زیرشاخص‌های بدون بعد در جدول ۲ به نقل از رامش و همکارانش [۲] ارائه شده است. شایان یادآوری است که مقادیر مربوط به استاندارد حد مجاز برای توسعه زیرشاخص در هر یک از پارامترهای کیفی براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی [۱۳] در نظر گرفته شده است.

ج) تخصیص وزن به پارامترهای کیفی: در وهله اول براساس اهمیت هر یک از پارامترهای کیفی آب آشامیدنی، یک وزن موقت (W_i) به هر یک اختصاص داده می‌شود. سپس فاکتور وزنی هر پارامتر از حاصل تقسیم وزن موقت آن بر مجموع اوزان موقت پارامترها به دست می‌آید.

$$W = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n (W_i)_i} \quad (1)$$

در این رابطه W و W_i به ترتیب فاکتور وزنی و وزن موقت مربوط به هر یک از پارامترهای کیفی آب؛ n تعداد کل پارامترهای مربوط به هر یک از گروه‌های کیفی آب (i) است که برای گروه‌های ۱ تا ۴ برابر با ۵ و برای گروه پنجم برابر با ۱ است (جدول ۱). مقادیر مربوط به فاکتور وزنی هر پارامتر در جدول ۳ با عنوان «فاکتور وزنی DWQI پیشنهادی ($DWQI_{Proposed}$)» ارائه شده است. در این جدول همچنین محاسبه فاکتور وزنی به روش متداول (Conventional DWQI) نیز ارائه شده است که در آن فاکتور وزنی بدون تفکیک گروه‌های پنجگانه انجام می‌شود. به بیان دیگر، در روش متداول مجموع وزن‌ها به صورت کلی و بودن تفکیک گروه‌های پنجگانه کیفیت آب صورت می‌گیرد.

در روش پیشنهادی رامش و همکارانش [۲] وزن موقت و فاکتور وزنی، یک بار دیگر نیز برای هر یک از گروه‌های کیفی آب به صورت کلی محاسبه و در نظر گرفته می‌شود که مقادیر مربوط به این وزن‌ها نیز در جدول ۴ ارائه شده است.

محاسبه شاخص کیفی آب آشامیدنی (DWQI)^۱

شاخص کیفیت آب نوعی ابزار ریاضی است که برای تبدیل کمیت‌های مربوط به تعداد زیادی از داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب به یک عدد شاخص به کار می‌رود و از این طریق امکان ارزیابی کیفیت آن برای مصارف مد نظر را فراهم می‌آورد. به طور کلی، شاخص‌های کیفی آب در دو مرحله محاسبه می‌شوند. در مرحله اول داده‌های خام مربوط به پارامترهای مختلف کیفی آب که از نظر واحدهای اندازه‌گیری نیز با یکدیگر متفاوت هستند، با استفاده از توابع مختلف به زیرشاخص‌های بدون بعد تبدیل می‌شوند. در مرحله دوم زیرشاخص‌های محاسبه شده با استفاده از توابع تجمیع، ترکیب و در نهایت شاخص کیفیت آب محاسبه می‌شود. در این پژوهش از شاخص پیشنهاد شده توسط رامش و همکارانش [۲] استفاده شده است که مراحل مربوط به روش محاسبه آن به ترتیب زیر است:

الف) انتخاب و گروه‌بندی پارامترها: در این شاخص براساس ویژگی‌های مرتبط با قابلیت شرب و همچنین سلامت و بهداشت آب، ۲۱ پارامتر کیفی آب انتخاب شدند که به ترتیب در پنج گروه مختلف شامل پارامترهای مرتبط با مقبولیت شرب در گروه‌های ۱ و ۲ و پارامترهای مرتبط با وضعیت بهداشت و سلامتی آب در گروه‌های ۳ تا ۵ هستند (جدول ۱).

ب) توسعه زیرشاخص‌ها: توسعه زیرشاخص مهم‌ترین گام در محاسبه شاخص کیفیت آب محسوب می‌شود که طی آن مقادیر پارامترهای ۲۱ گانه با استفاده از یک سری توابع، به اعداد بدون بعد بین صفر تا صد تبدیل می‌شوند. مقدار ۱۰۰ برای زیر شاخص نشان‌دهنده کیفیت عالی آب از نظر پارامتر مد نظر است و مقدار ۵۰ نیز بیشترین مقدار قابل قبول برای پارامتر مد نظر را نشان می‌دهد. توابع

جدول ۱. دسته‌بندی پارامترهای مختلف استفاده شده در محاسبه شاخص DWQI

Group 5	Group 4	Group 3	Group 2	Group 1
کلی فرم کل (*TC)	کادمیوم (Cd)	فلوئور (F)	قلیائیت کل (TA*)	pH
-	کروم (Cr)	نیترات (NO ₃)	سختی کل (TH*)	هدایت الکتریکی (EC)
-	سرب (Pb)	نیتريت (NO ₂)	کلسیم (Ca)	سدیم (Na)
-	مس (Cu)	منگنز (Mn)	منیزیم (Mg)	کلر (Cl)
-	نیکل (Ni)	روی (Zn)	آهن (Fe)	سولفات (SO ₄)

* TA، TH و TC به ترتیب مخفف Total alkalinity، Total hardness و Total coliforms

جدول ۲. توابع ریاضی محاسبه زیرشاخص‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب، به نقل از رامش و همکارانش [۲]

معادلات مربوط به محاسبه زیرشاخص‌ها	بازه پارامترها	پارامتر
$SI_{pH} = 100$	$pH < 5.5$	pH
$SI_{pH} = 80.00pH - 430.00$	$5.5 \leq pH < 6.0$	
$SI_{pH} = 100.0pH - 550.00$	$6.0 \leq pH < 6.5$	
$SI_{pH} = 100$	$6.5 \leq pH \leq 8.5$	
$SI_{pH} = -71.429pH + 707.14$	$8.5 < pH \leq 9.2$	
$SI_{pH} = -30.769pH + 333.08$	$9.2 < pH \leq 10.5$	
$SI_{pH} = 10$	$pH > 10.5$	
$SI_{EC} = 100$	$EC \leq 1$	EC (mScm ⁻¹)
$SI_{EC} = -25.00EC + 125.00$	$1.0 < EC \leq 3.0$	
$SI_{EC} = -40.0EC + 170.00$	$3.0 < EC \leq 4.0$	
$SI_{EC} = 10$	$EC > 4$	
$SI_{Na} = 100$	$Na \leq 200$	Na (mg/l)
$SI_{Na} = -0.200Na + 140.00$	$200 < Na \leq 450$	
$SI_{Na} = -0.267Na + 170.00$	$200 < Na \leq 450$	
$SI_{Na} = 10$	$Na > 600$	
$SI_{Cl} = 100$	$Cl \leq 250$	Cl (mg/l)
$SI_{Cl} = -0.067Cl + 116.67$	$250 < Cl \leq 1000$	
$SI_{Cl} = -0.160Cl + 210$	$1000 < Cl \leq 1250$	
$SI_{Cl} = 10$	$Cl > 1250$	
$SI_{SO_4} = 100$	$SO_4 \leq 200$	SO ₄ (mg/l)
$SI_{SO_4} = -0.250SO_4 + 150$	$200 < SO_4 \leq 400$	
$SI_{SO_4} = -0.0255SO_4 + 140$	$400 < SO_4 \leq 600$	
$SI_{SO_4} = 5$	$SO_4 > 600$	
$SI_{TA} = 100$	$TA \leq 250$	Total Alkalinity (mg/l)
$SI_{TA} = -0.167TA + 141.67$	$250 < TA \leq 550$	
$SI_{TA} = -0.267TA + 196.67$	$550 < TA \leq 700$	
$SI_{TA} = 10$	$TA > 700$	
$SI_{TH} = 100$	$TH \leq 300$	Total Hardness (mg/l)
$SI_{TH} = -0.167TH + 150.00$	$300 < TH \leq 600$	
$SI_{TH} = -0.267TH + 210.00$	$600 < TH \leq 750$	
$SI_{TH} = 10$	$TH > 750$	
$SI_{Ca} = 100$	$Ca \leq 75$	Ca (mg/l)
$SI_{Ca} = -0.4Ca + 130.00$	$75 < Ca \leq 200$	
$SI_{Ca} = -0.4Ca + 130.00$	$200 < Ca \leq 300$	
$SI_{Ca} = 10$	$Ca > 300$	
$SI_{Mg} = 100$	$Mg \leq 30$	Mg (mg/l)
$SI_{Mg} = -0.714Mg + 121.43$	$30 < Mg \leq 100$	
$SI_{Mg} = -0.800Mg + 130.0$	$100 < Mg \leq 150$	
$SI_{Mg} = 10$	$Mg > 150$	
$SI_{Fe} = 100$	$Fe \leq 0.3$	Fe (mg/l)
$SI_{Fe} = -71.43Fe + 121.43$	$0.3 < Fe \leq 1.0$	
$SI_{Fe} = -22.50Fe + 72.5$	$1 < Fe \leq 3.0$	
$SI_{Fe} = 5$	$Fe > 3.0$	
$SI_{NO_3} = 100$	$NO_3 \leq 45$	NO ₃ (mg/l)
$SI_{NO_3} = -19.80NO_3 + 991.00$	$45 < NO_3 \leq 50$	
$SI_{NO_3} = 1$	$NO_3 > 50$	
$SI_{NO_2} = 100$	$NO_2 \leq 0.2$	NO ₂ (mg/l)
$SI_{NO_2} = 35.36NO_2 + 107.07$	$0.2 < NO_2 \leq 3.0$	
$SI_{NO_2} = 1$	$NO_2 > 3.0$	

ادامه جدول ۲. توابع ریاضی محاسبه زیرشاخص‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب، به نقل از رامش و همکارانش [۲]

معادلات مربوط به محاسبه زیرشاخص‌ها	بازه پارامترها	پارامتر
$SI_F = 100$ $SI_F = -100.00F + 200.00$ $SI_F = -98.00F + 197.00$	$F \leq 1.0$ $1.0 < F \leq 1.5$ $1.5 < F \leq 2.0$	F (mg ^l ⁻¹)
$SI_{Mn} = 100$ $SI_{Mn} = -250.00Mn + 125.00$ $SI_{Mn} = -163.33Mn + 99.00$	$F > 2$ $Mn \leq 0.1$ $0.1 < Mn \leq 0.3$ $0.3 < Mn \leq 0.6$	Mn (mg ^l ⁻¹)
$SI_{Zn} = 100$ $SI_{Zn} = -25.00Zn + 175.00$ $SI_{Zn} = -4.90Zn + 74.50$	$Mn > 0.6$ $Zn \leq 3.0$ $3.0 < Zn \leq 5.0$ $5.0 < Zn \leq 15$	Zn (mg ^l ⁻¹)
$SI_{Cd} = 100$ $SI_{Cd} = -7.14Cd + 121.43$ $SI_{Cd} = -9.80Cd + 148.00$	$Zn > 15$ $Cd \leq 3.0$ $3.0 < Cd \leq 10$ $10 < Cd \leq 15$	Cd (μg ^l ⁻¹)
$SI_{Cr} = 100$ $SI_{Cr} = -9.90Cr + 595.00$	$Cd > 15$ $Cr \leq 50.0$ $50.0 < Cr \leq 60.0$	Cr (μg ^l ⁻¹)
$SI_{Pb} = 100$ $SI_{Pb} = -2.5Pb + 162.5$ $SI_{Pb} = -4.90Pb + 270.50$	$Cr > 60.0$ $Pb \leq 25.0$ $25.0 < Pb \leq 45.0$ $45.0 < Pb \leq 55.0$	Pb (μg ^l ⁻¹)
$SI_{Cu} = 100$ $SI_{Cu} = -0.0345Cu + 101.72$ $SI_{Cu} = -0.0490Cu + 123.50$	$Pb > 55.0$ $Cu \leq 50.0$ $50.0 < Cu \leq 1500$ $1500 < Cu \leq 2500$	Cu (μg ^l ⁻¹)
$SI_{Ni} = 100$ $SI_{Ni} = -03.301Ni + 331.00$	$Cu > 2500$ $Ni \leq 70.0$ $70.0 < Ni \leq 100$	Ni (μg ^l ⁻¹)
$SI_{TC} = -0.1117TC + 105.56$ $SI_{TC} = -0.4807TC + 290.00$	$Ni > 100$ $50.0 < TC \leq 500$ $500 < TC \leq 600$	Total coliforms (MPN 100ml ⁻¹)
$TC = 2$	$TC > 600$	

توابع ضربی، جمعی، عملگر حداقل، دوگانه و مختلط از انواع رایج توابع تجمیع محسوب می‌شوند. در این مطالعه ترکیب یک تابع ضربی وزن‌دار به همراه عملگر حداقل - حداکثر برای تجمیع استفاده شده و شاخص نهایی به ترتیب زیر به دست آمده است.

$$\text{Aggregated index} = \left[(G_1 \text{ Quality})^{-1/147} \right] \times \left[(G_2 \text{ Quality})^{-1/122} \right] \times \left[(G_3 \text{ Quality})^{-1/206} \right] \times \left[(G_4 \text{ Quality})^{-1/179} \right] \times \left[(G_5 \text{ Quality})^{-1/125} \right] \quad (2)$$

پس از محاسبه شاخص تجمیع (Aggregated index) از رابطه ۲، شاخص پیشنهادی رامش و همکارانش [۲] با استفاده از رابطه زیر (رابطه ۸) قابل محاسبه است.

د) تجمیع زیرشاخص‌ها: تجمیع زیرشاخص‌ها قدم نهایی و اصلی در توسعه شاخص‌های کیفیت آب است. بدین منظور زیرشاخص‌های مربوط به هر پارامتر کیفی به همراه فاکتورهای وزنی مربوطه ادغام شده و با استفاده از یک تابع تجمیع، به شاخص کیفیت آب تبدیل می‌شوند.

در این رابطه G 1 Quality تا G 5 Quality نشان‌دهنده کیفیت آب بر مبنای هر یک از گروه‌های پنجگانه است که از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$G1 \text{ Quality} = (SI_{pH})^{-/180} \times (SI_{EC})^{-/200} \times (SI_{Na})^{-/200} \times (SI_{Cl})^{-/200} \times (SI_{SO_4})^{-/220} \quad (3)$$

$$G2 \text{ Quality} = (SI_{TA})^{-/1875} \times (SI_{TH})^{-/1875} \times (SI_{Ca})^{-/1875} \times (SI_{Mg})^{-/1875} \times (SI_{Fe})^{-/250} \quad (4)$$

$$G3 \text{ Quality} = (SI_F)^{-/1915} \times (SI_{NO_3})^{-/2128} \times (SI_{NO_2})^{-/2128} \times (SI_{Mn})^{-/2128} \times (SI_{Zn})^{-/1915} \quad (5)$$

$$G4 \text{ Quality} = (SI_{Cd})^{-/228} \times (SI_{Cr})^{-/228} \times (SI_{Pb})^{-/228} \times (SI_{Cu})^{-/158} \times (SI_{Ni})^{-/158} \quad (6)$$

$$G5 \text{ Quality} = (SI_{TC})^{-/1000} \quad (7)$$

$$\text{Proposed DWQI} = (\text{Aggregated index}) + (\text{Min} - \text{Max Operator}) \quad (8)$$

می‌شود. در صورتی که اختلاف بین کیفیت گروه‌های پنج‌گانه زیاد باشد، این عملگر، شاخص تجمیع (Aggregated index) را براساس انحراف بین کیفیت گروه‌های پنج‌گانه بهینه می‌کند. در صورتی که اختلافی بین کیفیت گروه‌های پنج‌گانه نباشد، این عملگر نیز برابر با صفر و شاخص تجمیع (Aggregated index) نشان‌دهنده شاخص کیفیت آب خواهد بود.

که در این رابطه Min-Max Operator، عملگر حداقل - حداکثر نامیده شده و از رابطه ۹ قابل محاسبه است.

$$\text{Min} - \text{Max Operator} =$$

$$10 \times \left[\left(\frac{\text{Aggregated index}}{\text{Min} + \text{Max}} \right) - 0.5 \right] \quad (9)$$

در رابطه ۹، Min و Max به ترتیب نشان‌دهنده کمینه و بیشینه مربوط به کیفیت گروه‌های پنج‌گانه هستند که از روابط ۳ تا ۷ به دست می‌آیند. عملگر حداقل - حداکثر به منظور بهینه‌سازی تصمیم در شرایط محیطی استفاده

جدول ۳. فاکتورهای وزنی اختصاص داده شده به هر یک از پارامترهای کیفی آب

فاکتور وزنی (W)		وزن موقت (W _t)	پارامتر کیفی	گروه‌های کیفیت آب
Conventional DWQI	Proposed DWQI			
۰/۰۲۷۸	۰/۱۸۰	۴/۵	pH	Group 1
۰/۰۳۰۹	۰/۲۰۰	۵	EC	
۰/۰۳۰۹	۰/۲۰۰	۵	Na	
۰/۰۳۰۹	۰/۲۰۰	۵	Cl	
۰/۰۳۴۰	۰/۲۲۰	۵/۵	SO ₄	
۰/۰۲۷۸	۰/۱۸۷۵	۴/۵	TA	Group 2
۰/۰۲۷۸	۰/۱۸۷۵	۴/۵	TH	
۰/۰۲۷۸	۰/۱۸۷۵	۴/۵	Ca	
۰/۰۲۷۸	۰/۱۸۷۵	۴/۵	Mg	
۰/۰۳۷۰	۰/۲۵۰۰	۶/۰	Fe	
۰/۰۵۵۶	۰/۱۹۱۵	۹/۰	F	Group 3
۰/۰۶۱۷	۰/۲۱۲۸	۱۰/۰	NO ₃	
۰/۰۶۱۷	۰/۲۱۲۸	۱۰/۰	NO ₂	
۰/۰۵۵۶	۰/۲۱۲۸	۹/۰	Mb	
۰/۰۵۵۶	۰/۱۹۱۵	۹/۰	Zn	
۰/۰۸۰۲	۰/۲۲۸	۱۳/۰	Cd	Group 4
۰/۰۸۰۲	۰/۲۲۸	۱۳/۰	Cr	
۰/۰۸۰۲	۰/۲۲۸	۱۳/۰	Pb	
۰/۰۵۵۶	۰/۱۵۸	۹/۰	Cu	
۰/۰۵۵۶	۰/۱۵۸	۹/۰	Ni	
۰/۰۵۵۶	۱/۰۰۰	۹/۰	TC	Group 5

در این روابط DWQI (A) و DWQI (G) به ترتیب شاخص‌های کیفیت آب حسابی و هندسی هستند. در این روابط i برابر با تعداد کل پارامترهای کیفی آب (معادل با ۲۱) و W_i نیز فاکتور وزنی هر پارامتر کیفی است که در ستون مربوط به فاکتورهای وزنی شاخص‌های متداول کیفیت آب در جدول ۳ ارائه شده است. پس از محاسبه شاخص‌های کیفیت آب، وضعیت کیفی آب براساس جدول ۵ و بر مبنای مقدار کمی DWQI توصیف می‌شود.

در این پژوهش شاخص DWQI پیشنهادی (Proposed DWQI) با دو روش متداول شاخص کیفیت آب (Conventional DWQI) نیز مقایسه شد. این دو شاخص متداول به ترتیب از دو تابع تجمیع شامل تابع جمع و تابع ضرب، برای محاسبه DWQI استفاده می‌کنند که به ترتیب از روابط ۱۰ و ۱۱ قابل محاسبه هستند.

$$DWQI(A) = \sum_{i=1}^n (SI_i \times W_i) \quad (10)$$

$$DWQI(G) = \prod_{i=1}^n SI_i^{W_i} \quad (11)$$

جدول ۴. وزن موقت و فاکتور وزنی کلی برای گروه‌های کیفیت آب در شاخص DWQI پیشنهادی

گروه‌های کیفیت آب	وزن موقت (Wt)	فاکتور وزنی (W)
Group 1	۱۰	۰/۱۴۷
Group 2	۹	۰/۱۳۲
Group 3	۱۴	۰/۲۰۶
Group 4	۱۹	۰/۲۷۹
Group 5	۱۶	۰/۲۳۵

جدول ۵. طبقه‌بندی کیفیت آب بر مبنای مقادیر کمی DWQI

طبقه	دامنه شاخص DWQI	توصیف کیفی
عالی	۹۷/۵ - ۱۰۰	بهترین کیفیت
خوب	۹۲/۵ ≤ DWQI < ۹۷/۵	کیفیت خوب
نسبتاً خوب	۸۵/۰ ≤ DWQI < ۹۲/۵	کیفیت قابل قبول
مرزی	۷۵/۰ ≤ DWQI < ۸۵/۰	کیفیت دارای خطر
ضعیف	۶۰/۰ ≤ DWQI < ۷۵/۰	کیفیت ضعیف
بسیار ضعیف	DWQI < ۶۰/۰	بدترین کیفیت آب

صنعتی ایران مقدار مجاز نیترات را برابر 50 mg l^{-1} اعلام کرده است. با این حال، باید بیان کرد که در تعدادی از چاه‌های منطقه (معادل ۳۰ درصد نمونه‌ها) مقدار نیترات بیش از حد مجاز است که نشان‌دهنده احتمال آلودگی آب‌های منطقه بر اثر پساب‌های انسانی و یا فعالیت‌های کشاورزی باشد. سختی کل نیز در آب‌های منطقه به‌طور شایان توجهی بیش از مقادیر مجاز توصیه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی (100 mg l^{-1}) و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (200 mg l^{-1}) است. زیاده‌بودن سختی آب در منطقه را می‌توان به سازندهای زمین‌شناسی منطقه مرتبط دانست که اغلب ترکیبات آهکی دارند و

یافته‌ها

آمار توصیفی داده‌ها

در جدول ۶ توصیف آماری مربوط به مقادیر پارامترهای کیفی ارائه شده است. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران دامنه مجاز pH برای نمونه‌های آب در دامنه ۶/۵ - ۸/۵ توصیه کرده است که از این نظر نمونه‌های آب منطقه در محدوده مجاز قرار داشته و از نظر pH مطلوب ارزیابی می‌شوند [۱۴]. میانگین مقادیر نیترات به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در سلامتی آب آشامیدنی، در نمونه‌های آب منطقه برابر ۲۸/۱ میلی‌گرم بر لیتر است. سازمان بهداشت جهانی و مؤسسه استاندارد و تحقیقات

می‌شوند. با این حال، شاخص DWQI_G از نظر کمی تفاوت شایان توجهی با دو شاخص قبلی دارد و با در نظر گرفتن این شاخص، آب‌های زیرزمینی اغلب در محدوده آب‌های با کیفیت ضعیف محسوب می‌شوند. در بین پارامترهای مختلف کیفی آب، pH کمترین مقدار تغییرات در منطقه را دارد و به عنوان یک ویژگی پایدار در منطقه قابل ارزیابی است. در مقابل مقدار کادمیوم با ضریب تغییرات نزدیک به ۷۷۵ درصد بیشترین تغییرات در منطقه را دارد. به نظر می‌رسد به دلیل اینکه مقدار کادمیوم در بیش از ۹۰ درصد چاه‌ها نزدیک به صفر بوده و فقط در چند چاه مقدار آن نزدیک به 0.15 mg l^{-1} است، این اختلافات فاحش سبب افزایش شایان توجه ضریب تغییرات این پارامتر و سایر فلزات سنگین مشابه در منطقه شده باشد.

به دلیل اقلیم سرد منطقه قابلیت انحلال زیادی نیز دارند. میانگین مقدار فلئور در آب‌های منطقه نیز در مقایسه با مقادیر مجاز در نظر گرفته شده توسط سازمان بهداشت جهانی ($1/1 \text{ mg l}^{-1}$) بیشتر است. زیادبودن فلئور در آب آشامیدنی می‌تواند به بیماری‌های مرتبط با دندان منجر شود و در کودکان رشد طبیعی استخوان‌ها را دچار اختلال کند [۱۵]. نتایج مربوط به آنالیز نمونه‌های آب نشان می‌دهد از نظر محتوای فلزات سنگین در منطقه نگرانی چندانی وجود ندارد و تقریباً همه نمونه‌های آب منطقه مقادیر کمتر از حد مجاز توصیه شده توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران را دارد. آمار توصیفی مربوط به شاخص‌های کیفی آب شامل DWQI_{Proposed} و DWQI_A نشان می‌دهد آب‌های زیرزمینی منطقه در محدوده آب‌های با کیفیت خوب از نظر آشامیدن محسوب

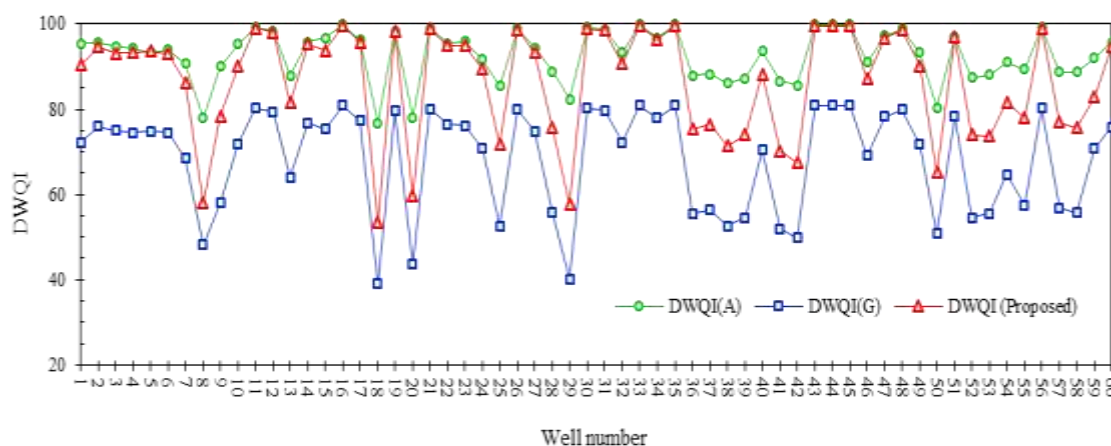
جدول ۶. آمار توصیفی مربوط به پارامترهای مختلف کیفیت آب

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
pH	۶/۴۴	۸/۱۹	۷/۵۰	۰/۳۲	۴/۳۳
EC (μScm^{-1})	۳۵۱/۰۰	۴۷۴۹/۰۰	۱۴۲۲/۰۰	۸۷۲/۰۰	۶۱/۱۲
Na (mg l^{-1})	۲۳/۹۰	۶۲۱/۴۰	۱۶۹/۳۰	۱۱۴/۳۰	۶۹/۵۲
Cl (mg l^{-1})	۲۰/۹۰	۱۰۷۷/۱۰	۱۵۶/۴۰	۱۷۱/۹۰	۹۱/۳۸
SO ₄ (mg l^{-1})	۰/۰۰	۱۹۷۳/۲۰	۳۳۳/۶۰	۳۲۲/۸۰	۸۷/۴۸
TA (mg l^{-1})	۲۲/۰۳	۲۳۰/۰۸	۹۱/۲۵	۳۹/۳۰	۴۰/۳۵
TH (mg l^{-1})	۱۴۲/۹۰	۱۹۶۴/۴۰	۶۰۵/۳۰	۳۵۶/۲۰	۵۷/۴۸
Ca (mg l^{-1})	۶/۶۰	۴۳۸/۲۰	۱۶۱/۹۰	۸۶/۹۰	۵۳/۳۹
Mg (mg l^{-1})	۱/۳۰	۲۱۰/۹۰	۴۶/۰۰	۴۰/۱۵	۷۷/۸۱
Fe ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۶۴	۲۵۸/۵۲	۵/۹۸	۴۸/۲۰	۱۹۹/۱۴
NO ₃ (mg l^{-1})	۰/۰۰	۱۴۳/۶۰	۲۸/۱۰	۳۳/۹۳	۸۴/۳۹
NO ₂ (mg l^{-1})	۰/۰۰	۰/۵۷	۰/۰۰	۰/۰۸	۳۴۳/۰۳
F (mg l^{-1})	۰/۱۸	۱/۳۶	۰/۷۴	۰/۳۱	۴۲/۸۶
Mn ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۰۰	۲۰۱/۴۳	۲/۷۶	۲۶/۰۲	۴۰۰/۴۷
Zn ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۲/۰۵	۱۵۳/۳۰	۷/۵۶	۳۲/۵۶	۱۷۱/۹۰
Cd ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۰۰	۱۵/۵۹	۰/۰۰	۲/۰۱	۷۷۴/۶۰
Cr ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۰۰	۱۲/۸۰	۰/۰۰	۱/۷۶	۲۲۶/۷۲
Pb ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۰۰	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۱۶	۲۳۴/۷۵
Ni ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۰۰	۱۵/۵۹	۰/۵۸	۲/۱۳	۱۹۸/۰۳
Cu ($\mu\text{g l}^{-1}$)	۰/۰۰	۳۸/۹۰	۱/۶۰	۷/۱۲	۱۷۸/۵۴
TC ($\text{MPN } 100\text{ml}^{-1}$)	۰/۰۰	۴۶۰/۰۰	۲۰/۰۰	۶۴/۶۶	۲۰۱/۵۴
DWQI (Proposed)	۵۳/۴۰	۹۹/۵۳	۹۱/۸۰	۱۲/۸۰	۱۴/۷۸
DWQI (A)	۷۶/۷۹	۹۹/۸۸	۹۴/۱۶	۶/۰۴	۶/۵۱
DWQI (G)	۳۹/۰۶	۸۰/۸۴	۷۳/۳۸	۱۲/۲۱	۱۷/۸۶

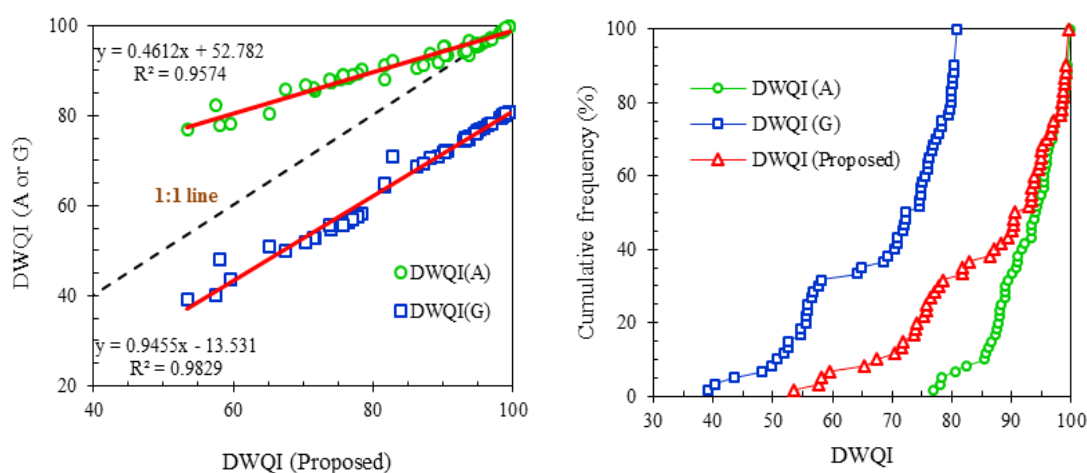
بحث و نتیجه‌گیری

مقایسه شاخص پیشنهادی با شاخص‌های متداول DWQI
 شاخص پیشنهادی DWQI با شاخص‌های محاسبه‌شده به‌روش متداول مقایسه شده و نتایج آن به تفکیک چاه‌های منطقه در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج در مجموع نشان می‌دهد مقادیر $DWQI_A$ در مقایسه با $DWQI_G$ و $DWQI_{Proposed}$ بیشتر و مقابل مقدار کمی $DWQI_G$ نیز در مقایسه با دو شاخص دیگر کمتر است. به بیان دیگر، مقادیر کمی این سه شاخص به ترتیب $DWQI_G < DWQI_{Proposed} < DWQI_A$ است. نتایج مربوط به آنالیز واریانس (ANOVA) انجام‌شده روی داده‌های این سه

شاخص نشان می‌دهد تفاوت مشاهده‌شده بین شاخص‌های یادشده از نظر آماری نیز معنادار است ($P < 0.05$).
 با این حال، توجه به شکل ۲ به‌روشنی نشان می‌دهد این شاخص‌ها به‌رغم تفاوت کمی از نظر مقدار، روند مشابهی را در نمونه‌های آب چاه‌ها از خود نشان می‌دهند. به‌طوری که با کاهش یک شاخص در یک نمونه، شاخص‌های دیگر نیز همان رفتار را از خود نشان می‌دهند. از این‌رو، به‌منظور توصیف دقیق مقادیر کمی این شاخص‌ها، ارتباط بین شاخص $DWQI_{Proposed}$ با شاخص‌های $DWQI_A$ و $DWQI_G$ بررسی شده و در شکل ۳ به همراه توزیع فراوانی مقادیر مربوط به این شاخص‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲. نتایج مربوط به شاخص‌های کیفیت آب در منطقه به تفکیک نمونه‌ها



شکل ۳. ارتباط بین شاخص پیشنهادی کیفیت آب با شاخص‌های متداول به همراه توزیع فراوانی سه شاخص

کاهش و یا افزایش نشان می‌دهند (شکل ۳ و جدول ۷). یکسان بودن روند تغییرات در شاخص‌های DWQI امکان تصمیم‌گیری در زمینه کیفیت آب آبخوان را تا حدودی آسان‌تر می‌کند. جدول ۷ ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مختلف کیفیت آب و نیز گروه‌های کیفی آب را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد گروه‌های کیفیت آب، به‌رغم اینکه در محاسبات مربوط به $DWQI_G$ و $DWQI_A$ دخالت ندارند، همبستگی معناداری با این دو شاخص دارند. در این بین گروه‌های کیفی ۲ و ۳ بیشترین مقدار ضریب همبستگی با شاخص‌های متداول را دارند. گروه‌های کیفی ۲ و ۳ شامل پارامترهایی نظیر سختی کل و نیز نیترات هستند. به‌نظر می‌رسد که دامنه تغییرات نسبتاً زیاد این دو متغیر در کنار وزن شایان توجه آنها سبب این همبستگی زیاد شده باشد. شایان یادآوری است که برخی از پارامترهای کیفی مانند کادمیوم و یا سایر فلزات سنگین در گروه کیفی ۴ نیز وزن زیادی دارند، ولی از آنجا که در اغلب نمونه‌ها مقادیر آنها نزدیک به صفر است، عملاً شاخص‌های کیفی آب در این پارامترها متأثر نشده‌اند.

نتایج مربوط به توزیع فراوانی داده‌های شاخص‌های کیفی آب بیان‌کننده این واقعیت است که در منطقه مطالعه‌شده شاخص‌های مربوطه توزیع نرمال ندارند. الگوی توزیع فراوانی مقادیر نیز نشان می‌دهد شاخص‌های $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_G$ الگوی توزیع نسبتاً مشابهی دارند که این امر می‌تواند ناشی از چگونگی محاسبه شاخص $DWQI_{Proposed}$ باشد که در آن نیز از توابع ضربی به عنوان پایه اصلی محاسبه استفاده شده است. از سوی دیگر، مقادیر دو شاخص $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_A$ به‌ویژه در نمونه‌هایی که کیفیت مطلوبی دارند بسیار مشابه هم هستند، ولی با کاهش مقادیر کمی دو شاخص، اختلاف بین آنها نیز افزایش می‌یابد. از این‌رو، به‌نظر می‌رسد که در مناطق با کیفیت آب مطلوب، استفاده از هر دو شاخص به نتایج مشابهی می‌انجامد.

بررسی ارتباط بین شاخص $DWQI_{Proposed}$ با شاخص‌های $DWQI_G$ و $DWQI_A$ نیز نشان می‌دهد این شاخص‌ها به‌رغم داشتن اختلافات عددی، ارتباط معناداری با یکدیگر دارند ($r = 0.97-0.99$) و با افزایش و یا کاهش شاخص $DWQI_{Proposed}$ شاخص‌های دیگر نیز به‌طور مرتب

جدول ۷. ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مختلف کیفیت آب ($n=60$)

DWQI _G	DWQI _A	DWQI _{Proposed}	متغیر
-	-	۱	DWQI _{Proposed}
-	۱	۰/۹۷۸**	DWQI _A
۱	۰/۹۶۳**	۰/۹۹۱**	DWQI _G
۰/۵۶۵**	۰/۶۲۹**	۰/۵۹۳**	Group 1 Quality
۰/۷۰۱**	۰/۸۱۴**	۰/۷۲۸**	Group 2 Quality
۰/۸۸۴**	۰/۷۸۶**	۰/۸۵۱**	Group 3 Quality
۰/۳۰۳*	۰/۲۲۵	۰/۲۹۸*	Group 4 Quality
۰/۰۲۲	۰/۵۶۵**	۰/۰۸۱	Group 5 Quality

** و * به ترتیب نشان‌دهنده معناداری ضریب همبستگی با سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد است.

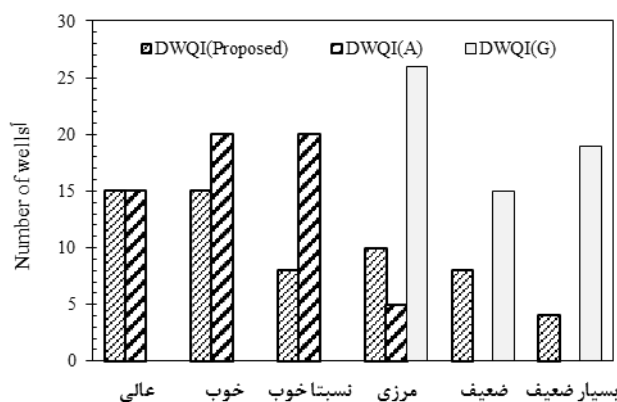
شاخص $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_A$ به‌ویژه برای حالاتی که مقدار شاخص بیش از ۹۲/۵ است، کاملاً مشابه یکدیگر است. برای نمونه، همان‌گونه که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، درصد فراوانی چاه‌های با کیفیت عالی بر مبنای هر دو شاخص برابر ۲۵ (۱۵ حلقه چاه) است. این امر نشان می‌دهد در مناطق با مقادیر زیاد شاخص کیفی آب تصمیم‌گیری بر مبنای شاخص پیشنهادی کاملاً با

به‌منظور نشان‌دادن تأثیر واقعی مقادیر کمی شاخص‌های یادشده در تصمیم‌گیری برای کیفیت منابع آب، فراوانی چاه‌های با درجه کیفی مختلف برای هر یک از شاخص‌ها براساس جدول ۵ استخراج و در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود براساس شاخص $DWQI_{Proposed}$ اغلب چاه‌های منطقه (حدود ۵۰ درصد) کیفیت عالی و خوب دارند. رفتار دو

مختلف کیفی و همچنین شاخص‌های کیفیت آب را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد ترتیب تأثیرپذیری شاخص $DWQI_{Proposed}$ از ترکیبات یونی موجود در نمونه‌های آب به صورت $Cl < Na < Mg < SO_4 < EC < TH < Ca$ است. در واقع ترتیب تأثیرگذاری این پارامترها نشان‌دهنده اثر پارامترهای مرتبط با قابلیت شرب آب در منطقه است. از بین شاخص‌های مرتبط با سلامتی و بهداشت آب در منطقه، نیترات دارای بیشترین تأثیر بر مقادیر کمی شاخص $DWQI_{Proposed}$ است. وجود نیترات بیش از حد مجاز در آب آشامیدنی می‌تواند با ایجاد اختلال در سیستم انتقال اکسیژن در خون موجب بروز بیماری مت‌هموگلوبینیا و نیز سرطان‌های گوارشی شود [۱۷]. در این زمینه می‌توان به آمار زیاد سرطان‌های گوارشی در این استان اشاره کرد که براساس گزارش‌ها بیش از ۴۵ درصد انواع سرطان‌ها در منطقه مربوط به سرطان دستگاه گوارش است [۱۸]. علاوه بر آسیب‌های مرتبط با سلامتی، وجود بیش از حد نیترات در آب می‌تواند در مصرف صنعتی آن نیز از طرفی ایجاد خوردگی در دیگ‌های بخار، اختلال ایجاد کند [۱۹]. ترتیب همبستگی بین ویژگی‌های کیفی آب و شاخص‌های متداول $DWQI$ نیز کم و بیش مشابه و با شاخص $DWQI_{Proposed}$ است. بررسی ارتباط بین کیفیت در هر یک از گروه‌های پنج‌گانه کیفی نیز می‌تواند اهمیت هر یک از پارامترها در گروه‌های پنج‌گانه را نشان دهد. مقدار سولفات و کلسیم بیشترین تأثیر بر گروه‌های کیفی اول و دوم را دارند و می‌توانند به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای مرتبط با قابلیت شرب آب در منطقه قلمداد شوند.

تصمیم‌گیری بر مبنای $DWQI_{Proposed}$ مطابقت دارد. بر مبنای شاخص $DWQI_G$ اغلب چاه‌های منطقه (۴۳ درصد) کیفیت آب مرزی دارند. اختلاف بین شاخص‌های مختلف نشان‌دهنده اهمیت نوع روش محاسبه شاخص‌ها و همچنین دامنه کلاس‌های کیفی در نظر گرفته‌شده برای هر یک است. برای نمونه، در شکل ۳ توزیع فراوانی دو شاخص $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_A$ الگوی کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهد. این رفتار متفاوت می‌تواند ناشی از ابهام و عدم قابلیت تبیین مناسب اثر پارامترهای کیفی در مقدار نهایی شاخص‌های متداول است. برای نمونه، در شاخص $DWQI_A$ که تابع تجمیع حالت عملگر جمع دارد، اثر یک پارامتر نامطلوب نمی‌تواند در مقدار کل شاخص تغییر زیادی ایجاد کند. به بیان دیگر، در شرایطی که فقط یکی از پارامترهای کیفی به شدت در شرایط نامطلوب قرار داشته باشد، شاخص $DWQI_A$ حساسیت چندانی نسبت به آن شاخص نشان نخواهد داشت [۱۱ و ۱۶] چون مقادیر کمی شاخص $DWQI_A$ در مقایسه با دو شاخص $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_G$ بیشتر است. استفاده صرف از توابع ضربی مانند آنچه در شاخص $DWQI_G$ رخ می‌دهد نیز سبب می‌شود تا با ضرب پی‌درپی مقادیر زیرشاخص‌هایی که نشان‌دهنده کیفیت نامطلوب هستند، مقدار شاخص کیفی از نظر کمی به شدت کاهش یابد. معایبی مانند عدم حساسیت و همچنین تبیین نامناسب، با طبقه‌بندی پارامترها و همچنین استفاده از عملگر حداقل - حداکثر در روش $DWQI_{Proposed}$ برطرف شده است.

جدول ۸ ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای



شکل ۴. ارزیابی تعداد چاه‌های مربوط به کلاس‌های کیفی مختلف بر مبنای شاخص‌های کیفیت گوناگون

جدول ۸. ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مختلف کیفیت آب و پارامترهای کیفی (n=۶۰)

متغیر	DWQI _{Proposed}	DWQI _G	DWQI _A	Group 1 Quality	Group 2 Quality	Group 3 Quality	Group 4 Quality	Group 5 Quality
pH	۰/۳۷۶**	۰/۳۸۶**	۰/۳۹۹**	۰/۱۵۹	-	-	-	-
EC	-۰/۶۴۷**	-۰/۶۰۰**	-۰/۷۵۱**	-۰/۶۸۵**	-	-	-	-
Na	-۰/۵۵۴**	-۰/۵۱۲**	-۰/۶۶۳**	-۰/۷۰۲**	-	-	-	-
Cl	-۰/۴۱۶**	-۰/۳۷۶**	-۰/۵۲۴**	-۰/۶۳۳**	-	-	-	-
SO ₄	-۰/۶۲۷**	-۰/۶۱۳**	-۰/۶۵۲**	-۰/۹۰۶**	-	-	-	-
TA	۰/۴۳۸**	۰/۴۴۷**	۰/۴۶۲**	۰/۴۵۹**	-	-	-	-
TH	-۰/۷۱۰**	-۰/۶۷۴**	-۰/۸۰۴**	-۰/۹۲۷**	-	-	-	-
Ca	-۰/۷۱۸**	-۰/۶۹۶**	-۰/۷۸۲**	-۰/۹۳۴**	-	-	-	-
Mg	-۰/۵۸۵**	-۰/۵۳۷**	-۰/۷۰۴**	-۰/۷۶۹**	-	-	-	-
Fe	۰/۱۰۴	۰/۱۲۰	۰/۰۷۷	۰/۶۶۰	-	-	-	-
NO ₃	-۰/۷۸۲**	-۰/۸۱۵**	-۰/۷۱۲**	-	-	-۰/۸۵۸**	-	-
NO ₂	-۰/۲۸۴*	-۰/۲۰۴	-۰/۳۳۶**	-	-	-۰/۲۱۵	-	-
F	-۰/۲۸۳*	-۰/۲۵۸*	-۰/۴۱۰**	-	-	-۰/۱۳۱	-	-
Mn	-۰/۲۸۸*	-۰/۲۱۳	-۰/۳۲۰*	-	-	-۰/۲۹۳*	-	-
Zn	۰/۱۲۱	۰/۱۲۴	۰/۰۷۴	۰/۱۳۱	-	-	-	-
Cd	-۰/۲۹۸*	-۰/۳۰۳*	-۰/۲۲۵	-۰/۵۳۲**	-	-	-	-
Cr	۰/۲۰۳	۰/۲۱۳	۰/۱۸۵	-۰/۰۲۹	-	-	-	-
Pb	-۰/۲۹۸*	-۰/۲۸۹*	-۰/۲۷۱*	-۰/۴۶۲**	-	-	-	-
Ni	-۰/۳۲۳*	-۰/۳۰۰*	-۰/۲۶۴*	-۰/۴۹۷**	-	-	-	-
Cu	۰/۲۱۸	۰/۲۲۰	۰/۱۹۰	۰/۰۲۴	-	-	-	-
TC	-۰/۱۳۰	-۰/۰۷۵	-۰/۰۹۵	-۰/۶۰۳**	-	-	-	-

** و * به ترتیب نشان‌دهنده معناداری ضریب همبستگی با سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد است.

جدول ۹. پارامترهای مربوط به مدل‌های تئوریک نیم‌تغییرنا برای هر یک از شاخص‌های DWQI

متغیر	مدل تئوریک	اثر قطعه‌ای (C ₀)	آستانه (C ₀ +C)	شعاع تأثیر (km)	C ₀ /(C ₀ +C) (%)	RMSE
DWQI _{Proposed}	نمایی	۲۷/۸۸	۳۶۹/۶۳	۱۰/۶۳	۷/۵۴	۴/۷۸
DWQI _A	قوسی	۱/۰۴	۲۶/۲۶	۲/۱۰	۳/۹۶	۵/۰۳
DWQI _G	نمایی	۲۷/۷۰	۱۵۴/۰۸	۱۰/۳۸	۱۷/۹۷	۵/۷۹

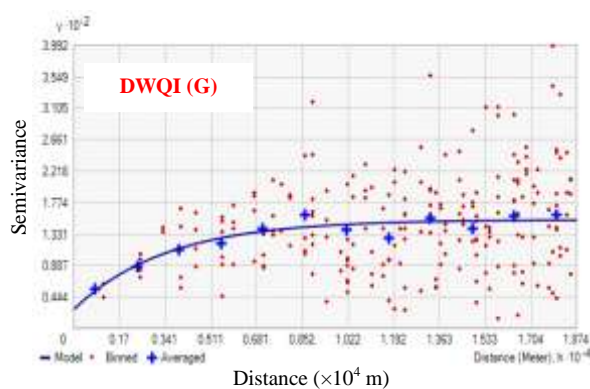
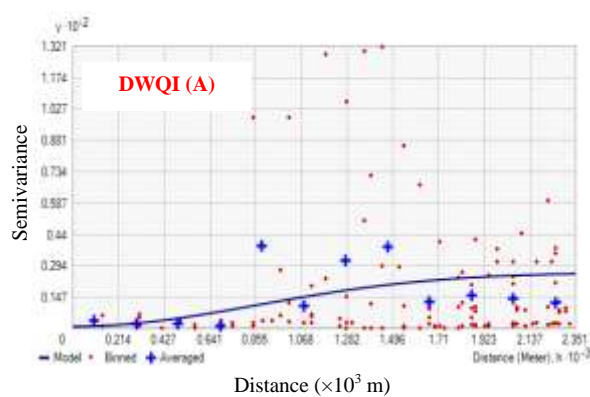
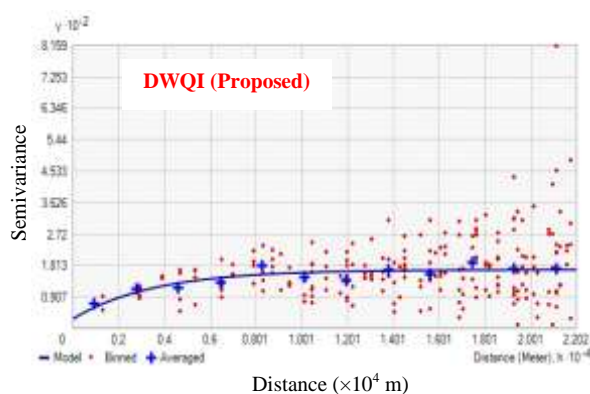
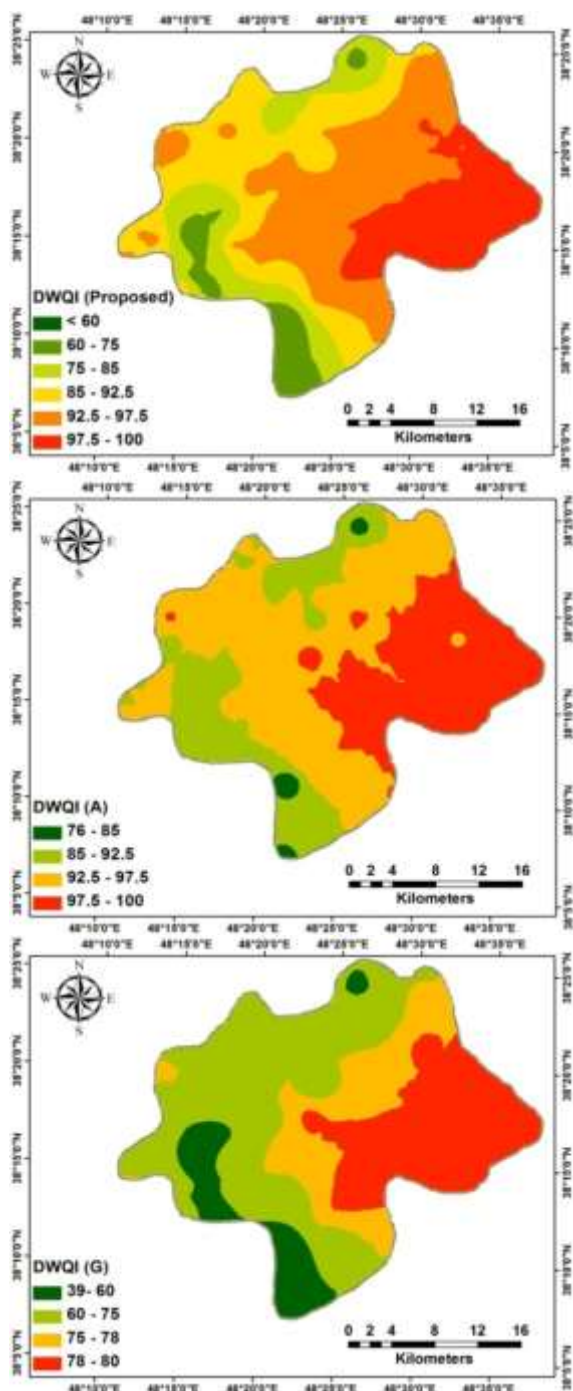
الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه به‌منظور بررسی توزیع مکانی وضعیت کیفی آب در منطقه اقدام به تهیه نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی براساس شاخص‌های مختلف با استفاده از روش کریجینگ شد. نتایج مربوط به واریوگرافی شاخص‌های کیفیت آب در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد الگوی نیم‌تغییرنا برای دو شاخص DWQI_{Proposed} و DWQI_G از مدل تئوریک نمایی تبعیت می‌کند. این مشابهت با توجه به تشابه الگوی توزیع فراوانی دو شاخص تا حدودی قابل انتظار بود، ولی برای شاخص DWQI_A نیم‌تغییرنا با مدل تئوریک قوسی مناسب تشخیص داده شد. در این جدول همچنین استحکام ساختار فضایی متغیرها ارائه شده است که با استفاده از نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه مدل تئوریک نیم‌تغییرنا قابل سنجش است.

به‌عنوان قاعده‌ای کلی در صورتی که این نسبت برای متغیری کمتر از ۲۵ درصد باشد، به‌عنوان یک متغیر با پیوستگی مکانی زیاد قلمداد می‌شود. اگر این نسبت در محدوده ۲۵-۷۵ درصد باشد، پیوستگی مکانی متغیر متوسط و برای زمانی که این نسبت بیش از ۷۵ درصد

الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه به‌منظور بررسی توزیع مکانی وضعیت کیفی آب در منطقه اقدام به تهیه نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی براساس شاخص‌های مختلف با استفاده از روش کریجینگ شد. نتایج مربوط به واریوگرافی شاخص‌های کیفیت آب در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد الگوی نیم‌تغییرنا برای دو شاخص DWQI_{Proposed} و DWQI_G از مدل تئوریک نمایی تبعیت می‌کند. این مشابهت با توجه به تشابه الگوی توزیع فراوانی دو شاخص تا حدودی قابل انتظار بود، ولی برای شاخص

فضایی مستحکم در نظر گرفته شوند. در شکل ۵ نیز نقشه‌های کریجینگ مربوط به هر یک از شاخص‌ها به همراه نیم‌تغییرنمای مربوط به هر یک از متغیرها نشان داده شده است.

است پیوستگی مکانی ضعیف محسوب می‌شود [۲۰ و ۲۱]. مقادیر نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه برای شاخص‌های کیفیت آب بیانگر این واقعیت است که شاخص‌های یاد شده می‌توانند به‌عنوان متغیرهای مکانی با ساختار



شکل ۵. توزیع مکانی مقادیر کمی هر یک از شاخص‌های DWQI به همراه نیم‌تغییرنمای استفاده‌شده برای هر شاخص

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از سازمان حفاظت محیط زیست به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مربوط به کیفیت آب زیرزمینی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

- [1]. Khadam IM, Kaluarachchi JJ. Water quality modeling under hydrologic variability and parameter uncertainty using erosion-scaled export coefficients. *Journal of Hydrology*. 200; 330(1):354-67.
- [2]. Ramesh S, Sukumaran N, Murugesan AG, Rajan MP. An innovative approach of drinking water quality index- A case study from Southern Tamil Nadu, India. *Ecological Indicators*. 2010; 10(4):857-68.
- [3]. Cude CG. Oregon water quality index a tool for evaluating water quality management effectiveness1. *Journal of American Water Resource Association*. 2001; 37(1): 125-137.
- [4]. Horton RK. An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*. 1965; 37(3): 300-306.
- [5]. Ott WR. *Water Quality Indices: A Survey of Indices used in the United States*. US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, 1978; p. 128
- [6]. Nasirian M. A new water quality index for environmental contamination contributed by mineral processing: A case study of Amang (Tin Tailing) processing activity. *Journal of applied sciences*. 2007; 7(20): 2977-2987.
- [7]. Kannel PR, Lee S, Lee YS, Kanel SR, Khan SP. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007; 132(1-3): 93-110.
- [8]. Sargaonkar A, Deshpande V. Development of an overall index of pollution for surface water based on a general classification scheme in Indian context. *Environmental monitoring and assessment*. 2003; 89(1): 43-67.
- [9]. Singh RP, Nath S, Prasad SC, Nema AK. Selection of suitable aggregation function for estimation of aggregate pollution index for River Ganges in India. *Journal of environmental Engineering*. 2008; 134(8):689-701.
- [10]. Nagels JW, Davies-Colley RJ, Smith DG. A water quality index for contact recreation in New Zealand. *Water Science and Technology*. 2001; 43(5): 285-292.

همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، بخش شرقی آبخوان که مشرف به ارتفاعات گردنه حیران است، کیفیت آب مطلوبی دارد. در حالی که کیفیت آب بر مبنای هر سه شاخص در جنوب غربی منطقه نامطلوب ارزیابی می‌شود. محدوده شهر اردبیل نیز در بخش جنوب غربی آبخوان واقع شده و منطبق بر ناحیه‌ای است که بر مبنای هر سه شاخص و به‌ویژه شاخص‌های $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_G$ کیفیت کمی دارد. با توجه به این واقعیت که مقدار نیترا ت بیشترین همبستگی با دو شاخص یادشده را دارد، به نظر می‌رسد که ورود نیترا ت به آب‌های زیرزمینی از طریق فاضلاب‌های شهری در محدوده شهر اردبیل از دلایل اصلی افت کیفیت آب در این بخش از منطقه باشد. مناطق شرقی که کیفیت آب مطلوبی دارند بیشتر مناطق کوهستانی و شیب‌دار هستند که تجمع و فعالیت‌های انسانی در آنها بسیار کم است و چاه‌های این مناطق کمتر در معرض آلاینده‌های با منشأ انسانی هستند. در این پژوهش شاخص جدیدی که بر مبنای گروه‌بندی پارامترهای کیفی آب و با استفاده از توابع تجمیع ترکیبی توسعه داده شده است ($DWQI_{Proposed}$) با شاخص‌های متداول کیفیت آب شامل $DWQI_G$ و $DWQI_A$ مقایسه شد. نتایج نشان داد به‌رغم تفاوت کمی در مقادیر، الگوی توزیع فراوانی دو شاخص $DWQI_{Proposed}$ و $DWQI_G$ مشابه است. در حالی که الگوی توزیع فراوانی شاخص $DWQI_G$ متفاوت است و فقط در مقادیر کمی زیاد، مشابه $DWQI_{Proposed}$ است. این امر بیان‌کننده اهمیت نوع توابع تجمیع در محاسبات مربوط به شاخص‌های کیفیت آب است. شاخص‌های کیفیت آب همبستگی مطلوب و معناداری با یکدیگر داشتند. در بین پارامترهای کیفی آب آشامیدنی، مقدار نیترا ت بیشترین همبستگی با شاخص‌های یادشده را داشت که اهمیت توجه به آلودگی نیترا ت در آب‌های زیرزمینی منطقه را گوشزد می‌کند. براساس الگوی نقشه‌های توزیع مکانی کیفیت آب، شرایط مطلوب کیفی در مناطق شرقی و مشرف به ارتفاعات گردنه حیران قرار دارند در حالی که در بخش جنوب غربی ناحیه که منطبق با مکان جغرافیایی شهر اردبیل است، کیفیت آب نامطلوب ارزیابی شد که به احتمال بسیار زیاد آلودگی‌های ناشی از فاضلاب‌های خانگی و صنعتی می‌تواند منشأ اصلی کیفیت نامطلوب آب در این منطقه باشد.

- [11]. Liou SM, Lo SL, Wang SH. A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2004; 96(1-3): 35-52.
- [12]. Ocampo-Duque W, Ferré-Huguet N, Domingo JL, Schuhmacher M. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International*. 2006; 32(6): 733-742.
- [13]. World Health Organization. *Guidelines For Drinking Water Quality*. second addendum. Vol. 1, Recommendations. 3rd ed. ISBN 978 92 4 154760 4. 2008; World Health Organization.
- [14]. Institute of Standards and Industrial Research of Iran. *Drinking water - Physical and chemical specifications*. ISIRI, 1053. 2008; 5th Revision.
- [15]. Devi R, Alemayehu E, Singh V, Kumar A. Removal of fluoride, arsenic and coliform bacteria by modified homemade filter media from drinking water. *Bioresource Technology*. 2008; 99: 2269-2274.
- [16]. Gupta AK, Gupta SK, Patil RS. A comparison of water quality indices for coastal water. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2003; 38(11): 2711-2725.
- [17]. Gulis G, Czompolyova M, Cerhan J R. An ecologic study of nitrate in municipal drinking water and cancer incidence in Trnava District, Slovakia. *Environmental research*. 2002; 88(3): 182-187.
- [18]. Yazdanbod E, Samadi F, Malekzade R, Babaie M, Iranparvar M, Azami A. Four-Year Survival Rate of Patients with Upper GI Cancer in Ardabil. *Journal of Ardabil University of Medical Sciences*. 2005; 5 (2):180-184.
- [19]. Bødtker G, Thorstenson T, Lillebø BLP, Thorbjørnsen, BE, Ulvøen RH, Sunde E, Torsvik T. The effect of long-term nitrate treatment on SRB activity, corrosion rate and bacterial community composition in offshore water injection systems. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*. 2008; 35(12): 1625-1636.
- [20]. Cambardella CA, Moorman AT, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1994; 58:1501-1511
- [21]. Fu W, Zhao K, Zhang C, Wu J, Tunney H. Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling. *Precision Agriculture*. 2016; 17(2): 121-135