

توسعه یک شاخص نوین کیفیت آب آشامیدنی (MDWQI) و استفاده از آن در ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی ایران

محمدرضا محبی^۱، کوشیار اعظم واقفی^۲، احمد منتظری^۳، مهرانوش ابطحی^۴، سوگل اکتایی^۵، رضا غلام‌نیا^۶،
فاطمه علی‌عسگری^۷، رضا سعیدی^۸

پذیرش: ۹۱/۱۱/۱۶

دریافت: ۹۱/۰۸/۲۰

چکیده

زمینه و هدف: در این مطالعه، یک شاخص نوین برای ارزیابی کیفیت منابع آب برای مصرف شرب با عنوان شاخص اصلاح شده کیفیت آب آشامیدنی (*Modified Drinking Water Quality Index: MDWQI*) توسعه یافت و از آن در بررسی وضعیت کیفیت منابع آب زیرزمینی تأمین‌کننده آب آشامیدنی در مناطق شهری ایران در سال ۱۳۹۰ استفاده گردید.

روش بررسی: تعداد ۲۳ خصوصیت کیفی آب بعنوان خصوصیات کیفی ورودی به شاخص استفاده شد و از استانداردهای کیفیت آب آشامیدنی ایران بعنوان معیار مقایسه استفاده گردید. شاخص *MDWQI* با استفاده از سه عامل تعداد خصوصیات متجاوز از معیار، تعداد اندازه‌گیری‌های متجاوز از معیار و بزرگی تخطی‌ها از معیار محاسبه می‌شود. این شاخص کیفیت منابع آب را با توجه به امتیاز کسب شده در محدوده ۰ تا ۱۰۰ در پنج دسته عالی (۹۵-۱۰۰)، خوب (۸۰-۹۴)، متوسط (۶۵-۷۹)، مرزی (۴۵-۶۴) و نامناسب (۰-۴۴) توصیف می‌نماید.

یافته‌ها: بر اساس شاخص *MDWQI*، کیفیت ۹۵٪ آب‌های زیرزمینی کشور در سطح خوب تعیین شد و در بقیه موارد متوسط یا مرزی بود، همچنین بهترین و بدترین کیفیت منابع آب زیرزمینی به ترتیب در استان‌های اردبیل و قم مشاهده شد. سه خصوصیت کیفی اول با بیشترین نرخ تخطی به ترتیب فلوراید، نیتریت و نیترات بودند که نرخ تخطی آنها به ترتیب ۷۴٪، ۳۲٪ و ۱۳٪ تعیین شد.

نتیجه‌گیری: میانگین کشوری امتیاز شاخص *MDWQI* حدود ۸۵ (وضعیت خوب) بود. این مطالعه نشان داد که شاخص *MDWQI* و زیرشاخص‌های آن کیفیت منابع آب را به سهولت، به درستی و به طور قابل اعتماد توصیف می‌کنند و می‌توان از آنها بطور گسترده در سراسر دنیا برای ارزیابی کیفیت منابع آب استفاده کرد.

واژگان کلیدی: آب آشامیدنی، منابع آب زیرزمینی، شاخص کیفیت آب، ایران

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
- ۲- کارشناس مهندسی شیمی، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
- ۳- کارشناس مهندسی عمران، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور
- ۴- دکترای مهندسی بهداشت محیط، استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز
- ۵- کارشناس مهندسی بهداشت محیط، فارغ‌التحصیل دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران
- ۶- دکترای مهندسی بهداشت حرفه‌ای، استادیار دانشکده سلامت، ایمنی و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی
- ۷- کارشناس مهندسی بهداشت محیط، فارغ‌التحصیل دانشکده سلامت، ایمنی و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی
- ۸- (نویسنده مسئول): دکترای مهندسی بهداشت محیط، استادیار دانشکده سلامت، ایمنی و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

مقدمه

در گذشته، ارزیابی کیفیت منابع آب تنها از طریق مقایسه خصوصیات کیفی آب با استانداردهای کیفیت آب متناظر صورت می‌گرفت. اگرچه این نوع ارزیابی به سهولت انجام می‌شود، اما تصویر جامع و موجزی از کیفیت آب بویژه برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان که نیازمند اطلاعات کلی در رابطه با کیفیت منابع آب هستند، ایجاد نمی‌کند. برای حل این مسئله و تبدیل خصوصیات کیفی آب به یک امتیاز مجموع، شاخص‌های کیفیت آب (Water Quality Index: WQI) توسعه یافتند. شاخص WQI با استفاده از توابع ریاضی، مقدار خصوصیات کیفی آب را به یک داده کمی (نمره یا امتیاز) تبدیل نموده و وضعیت کلی کیفیت منابع آب را توصیف می‌کند (۱-۴)

اولین بار شاخص WQI بوسیله Horton (۵) با انتخاب و وزن‌دهی خصوصیات کیفی آب و ارائه تابع مجموع توسعه داده شد. پس از آن بنیاد ملی بهسازی ایالات متحده (National Sanitation Foundation: NSF) با استفاده از تکنیک دلفی و اصلاح شاخص WQI، شاخص NSFQI را ارائه نمود که از آن زمان تاکنون، این شاخص به طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات کیفی آب و ضرایب وزنی (داخل پرانتز) مربوطه که در شاخص NSFQI مورد استفاده قرار گرفتند، عبارتند از اکسیژن محلول (۰/۱۷)، کلیرم مدفوعی (۰/۱۶)، pH (۰/۱۱)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (۰/۱۱)، نترات (۰/۱۰)، فسفات کل (۰/۱۰)، تغییرات دمایی (۰/۱۰)، کدورت (۰/۰۸) و کل جامدات (۰/۰۷). مقدار شاخص NSFQI بین ۰ تا ۱۰۰ بوده و منابع آب را در پنج گروه نامناسب (۰-۲۵)، نسبتاً بد (۲۵-۵۰)، متوسط (۵۰-۷۰)، خوب (۷۰-۹۰) و عالی (۹۰-۱۰۰) طبقه‌بندی می‌کند (۷ و ۶).

چندین شاخص ترکیبی کیفیت آب بر پایه شاخص NSFQI و اصلاح جزئی آن ایجاد شده است (۸-۱۱). در میان شاخص‌های کیفیت آب، شاخص‌هایی که کیفیت منابع آب را با هدف تأمین آب در اجتماع ارزیابی می‌کنند، شاخص‌های کیفیت آب آشامیدنی (Drinking Water Quality Index: DWQI) نامیده می‌شوند. به عنوان مثال Ramesh

و همکاران (۱۲) با استفاده از ۲۲ خصوصیت کیفی آب، یک شاخص DWQI ارائه دادند. توسعه این شاخص طی چهار مرحله به شرح زیر انجام شد: (۱) انتخاب خصوصیات کیفی آب و دسته‌بندی آنها، (۲) توسعه زیرشاخص، (۳) تخصیص ضریب وزنی و ارائه منحنی استانداردسازی برای خصوصیات منتخب و (۴) ارائه تابع مجموع و توصیف شاخص DWQI. اگرچه این شاخص کارایی قابل قبولی دارد، اما ایراداتی از جمله پیچیدگی، محاسبات زمان‌بر، به‌کارگیری منحنی‌های استانداردسازی سلیقه‌ای و عدم انعطاف‌پذیری در انتخاب خصوصیات کیفی آب و معیار مقایسه و سنجش در آن به چشم می‌خورد.

یکی از موفق‌ترین تلاش‌ها در توسعه شاخص DWQI توسط شورای وزیران محیط‌زیست کانادا صورت گرفت (۱۳). در شاخص DWQI کانادا، برخلاف بیشتر شاخص‌های DWQI قبلی، به جای استاندارد کردن خصوصیات کیفی آب با منحنی‌های سلیقه‌ای، خصوصیات کیفی آب با استانداردهای کیفیت آب متناظر مقایسه می‌شود. از جمله مزایای شاخص DWQI کانادا می‌توان به محاسبه ساده و انعطاف‌پذیری در انتخاب خصوصیات کیفی آب و معیار مقایسه اشاره نمود، البته این شاخص معایبی نیز دارد که یکی از مهم‌ترین آنها تأثیر برابر خصوصیات کیفی مختلف بر امتیاز نهایی شاخص است (۱۴، ۱۵ و ۳).

هدف از این پژوهش بازنگری شاخص DWQI کانادا و ارائه یک شاخص کارآمد با عنوان شاخص اصلاح شده کیفیت آب آشامیدنی (Modified Drinking Water Quality Index: MDWQI) بود. پس از توسعه شاخص MDWQI، از آن برای ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی تأمین‌کننده آب آشامیدنی در سراسر ایران استفاده شد تا علاوه بر ارائه یک چهره کلی از کیفیت منابع آب زیرزمینی ایران، قابلیت این شاخص بررسی شده و حساسیت آن تحلیل گردد.

مواد و روش‌ها

توسعه شاخص MDWQI

مبنای محاسبه شاخص MDWQI، داده‌های کیفیت آب جمع‌آوری شده در طول یک سال است و این شاخص برای

که با استفاده از خصوصیات بهداشتی آب آشامیدنی توسعه می‌یابد. دو ملاک برای انتخاب خصوصیات کیفی آب ورودی به شاخص MDWQI در نظر گرفته شد: اندازه‌گیری منظم (حداقل چهار بار در سال) در منابع آب زیرزمینی و داشتن استاندارد کیفی آب آشامیدنی ایران. براساس ملاک‌های مذکور، ۲۳ خصوصیت کیفی آب برای توسعه شاخص MDWQI و زیرشاخص‌هایش انتخاب شدند (جدول ۱) و استانداردهای کیفیت آب آشامیدنی ایران (بجز یک مورد) به عنوان معیار مقایسه مورد استفاده قرار گرفتند (۱۶). از آنجایی که منابع آب زیرزمینی قبل از استفاده به عنوان آب آشامیدنی، الزاماً گندزدایی می‌شوند، استفاده از استاندارد کیفیت آب آشامیدنی ایران به عنوان معیار کلیفرم مدفوعی (MPN/۱۰۰mL) بسیار سختگیرانه بود، از این رو معیار کلیفرم مدفوعی (MPN/۱۰۰mL) ۲۰ در نظر گرفته شد، این مقدار معیار کیفیت مناسب منابع آب برای مصرف شرب در ایالات متحده است (۷).

داده‌های کیفیت آب حاصل از یک نمونه‌برداری منفرد قابل محاسبه نیست؛ در نتیجه شاخص MDWQI وضعیت پایدار و طولانی‌مدت کیفیت منابع آب را نشان می‌دهد. از میان ایستگاه‌های نمونه‌برداری، ایستگاه‌هایی که در آنها حداقل چهار خصوصیت کیفی آب، حداقل چهار بار در سال اندازه‌گیری شده‌اند، برای محاسبه شاخص MDWQI انتخاب می‌شوند. توسعه شاخص MDWQI طی چهار مرحله به شرح زیر صورت پذیرفت:

الف) انتخاب خصوصیات کیفی آب و معیار مقایسه: از یک دیدگاه کلی خصوصیات کیفی آب در دو گروه دسته‌بندی می‌شوند: خصوصیات بهداشتی و خصوصیات مقبولیت. براساس این دسته‌بندی، دو زیرشاخص برای شاخص MDWQI ارائه شد: شاخص مقبولیت کیفیت آب (Acceptability Water Quality Index: AWQI) که خصوصیات زیباشناختی و گوارایی آب آشامیدنی را مورد توجه قرار می‌دهد و شاخص کیفیت بهداشتی آب (Health Water Quality Index: HWQI)

جدول ۱: مقادیر استاندارد و ضریب وزنی خصوصیات کیفی ورودی به شاخص MDWQI

ضریب وزنی (W_{qi})	مقدار استاندارد		واحد	خصوصیت
	حداکثر مجاز	حداقل مجاز		
				خصوصیات مقبولیت
۱	۰/۲	-	mg/L	آلومینیوم (Al)
۱	۰/۳	-	mg/L	آهن (Fe)
۱	۸/۵	۶/۵	-	پی‌اچ (pH)
۱	۳	-	mg/L	روی (Zn)
۱	۵۰۰	-	mg/L	سختی کل (Total hardness)
۱	۲۵۰	-	mg/L	سدیم (Na)
۱	۴۰۰	-	mg/L	سولفات (SO_4^{2-})
۱	۴۰۰	-	mg/L	کلرید (Cl^-)
۱	۱۵۰۰	-	mg/L	کل جامدات محلول (TDS)
۱	۳۰۰	-	mg/L	کلسیم (Ca)
۱	۳۰	-	mg/L	منیزیم (Mg)

ادامه جدول ۱: مقادیر استاندارد و ضریب وزنی خصوصیات کیفی ورودی به شاخص MDWQI

ضریب وزنی (w_{q_i})	مقدار استاندارد		واحد	خصوصیت
	حداکثر مجاز	حداقل مجاز		
۱	۱/۵	-	mg/L	نیترژن آمونیاکی
خصوصیات بهداشتی				
۳	۰/۰۱	-	mg/L	آرسنیک (As)
۳	۰/۰۰۶	-	mg/L	جیوه (Hg)
۳	۰/۰۱	-	mg/L	سرب (Pb)
۲	۱/۵	0.5	mg/L	فلوراید (F ⁻)
۳	۰/۰۰۳	-	mg/L	کادمیوم (Cd)
۲	۵	-	NTU	کدورت
۳	۰/۰۵	-	mg/L	کروم (Cr)
۳	۲۰	-	MPN/100mL	کلیفرم مدفوعی
۲	۲	-	mg/L	مس (Cu)
۲	۰/۴	-	mg/L	منگنز (Mn)
-	۳	-	mg/L	نیتريت (NO ₂ ⁻)
-	۵۰	-	mg/L	نیترات (NO ₃ ⁻)
۳	۱	-	-	$* C_{NO_3^-} / SV_{NO_3^-} + C_{NO_2^-} / SV_{NO_2^-}$

* مجموع نسبت غلظت نیترات و نیتريت به مقدار رهنمودیشان نباید بیشتر از یک باشد.

از معیار تخطی می‌کنند. عامل F_p تابعی از تعداد اندازه‌گیری‌های موجود در مجموعه داده‌ها است که از معیار تخطی می‌کنند و عامل F_q نیز تابعی از مقدار تخطی از معیار در اندازه‌گیری‌های متجاوز از معیار است. عوامل F_p و F_q به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند:

$$F_p = \frac{\sum_{j=1}^n w_{q_j}}{\sum_{i=1}^m w_{q_i}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$F_q = \frac{\sum_{j=1}^n (w_{q_j} \times N_{q_j})}{\sum_{i=1}^m (w_{q_i} \times N_{q_i})} \quad (2)$$

ب) تخصیص ضریب وزنی برای خصوصیات کیفی ورودی: خصوصیات بهداشتی بویژه ترکیبات سرطان‌زا و کیفیت میکروبی در مقایسه با خصوصیات مقبولیت آب تأثیر بیشتری بر وضعیت کلی کیفیت آب آشامیدنی دارند، بمنظور در نظر گرفتن این تأثیر متفاوت در توسعه شاخص MDWQI، برای خصوصیات کیفی ورودی بسته به اهمیت ضریب وزنی به میزان یک، دو یا سه تعیین گردید. این کار با تلاش کارشناسان و متخصصان کیفیت آب در سراسر ایران و با استفاده از تکنیک دلفی انجام پذیرفت. ضرایب وزنی تعیین شده برای خصوصیات ورودی در جدول ۱ آمده است.

ج) محاسبه شاخص MDWQI: شاخص MDWQI با استفاده از سه عامل محاسبه می‌شود؛ عامل حوزه یا وسعت (F_p)، عامل تکرار یا فراوانی (F_q) و عامل بزرگی یا فاصله از معیار (F_r). عامل F_p تابعی از تعداد خصوصیات کیفی است که

خصوصیت متجاوز (ام) و NSE مجموع نرمال شده تخطی‌ها هستند.

عامل F_p و شاخص MDWQI به ترتیب از روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند:

$$F_p = \frac{NSE}{0.01NSE + 0.01} \quad (5)$$

$$MDWQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^x + F_2^x + F_3^x}}{1/732} \quad (6)$$

زیرشاخص‌های AWQI و HWQI نیز با استفاده از روابط فوق محاسبه می‌شوند، با این تفاوت که خصوصیات کیفی ورودی آنها به ترتیب خصوصیات مقبولیت و خصوصیات بهداشتی آب آشامیدنی هستند.

د) طبقه‌بندی و توصیف امتیاز شاخص MDWQI: امتیاز شاخص MDWQI (خروجی رابطه ۶) عددی بین ۰ تا ۱۰۰ است که عدد صفر نشان‌دهنده نامناسبترین کیفیت و عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت عالی است. در جدول ۲ طبقه‌بندی و توصیف امتیاز شاخص MDWQI ارائه شده است. مطابق جدول ۲، این شاخص کیفیت منابع آب را در پنج دسته عالی، خوب، متوسط، مرزی و نامناسب دسته‌بندی می‌کند.

جدول ۲: طبقه‌بندی کیفیت منابع آب با استفاده از شاخص MDWQI

وضعیت	امتیاز شاخص	توصیف
عالی	۹۵-۱۰۰	تمام سنجش‌ها همواره مطلوب است.
خوب	۸۰-۹۴	کیفیت آب به ندرت از سطح مطلوب خارج می‌شود.
متوسط	۶۵-۷۹	کیفیت آب گاهی اوقات از سطح مطلوب خارج می‌شود.
مرزی	۴۵-۶۴	کیفیت آب اغلب از سطح مطلوب خارج می‌شود.
نامناسب	۰-۴۴	کیفیت آب معمولاً از سطح مطلوب خارج می‌شود.

منابع آب آشامیدنی در کشور، تمام چاه‌های آب زیرزمینی با مصرف شرب واقع در مناطق شهری به تعداد ۵۳۱۴ حلقه مورد بررسی قرار گرفته و شاخص MDWQI در آنها براساس نمونه‌برداری‌های سالیانه (سال ۱۳۹۰) محاسبه گردید. تمام خصوصیات کیفی آب طبق دستورالعمل‌های کتاب روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (۱۸).

که در آنها w_{q_i} ضریب وزنی خصوصیت کیفی (ام) و w_{q_j} ضریب وزنی خصوصیت کیفی متجاوز از معیار (ام) هستند؛ m تعداد خصوصیات کیفی ورودی و n تعداد خصوصیات کیفی متجاوز از معیار هستند؛ N_{q_i} تعداد کل اندازه‌گیری‌های خصوصیات کیفی ورودی و N_{q_j} تعداد اندازه‌گیری‌های متجاوز از معیار هستند.

بمنظور محاسبه عامل F_p ، ابتدا باید بزرگی تخطی خصوصیات متجاوز از معیار (E_{q_j}) محاسبه شده و سپس عامل مجموع نرمال شده تخطی‌ها (Normalized Sum of Excursions: NSE) تعیین گردد. عوامل E_{q_j} و NSE به ترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند:

$$E_{q_j} = \sum_{N_{q_j}} \left(\frac{C_{q_j}}{SV_{q_j}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$NSE = \frac{\sum_{j=1}^n (w_{q_j} \times E_{q_j})}{\sum_{i=1}^m (w_{q_i} \times N_{q_i})} \quad (4)$$

که در آنها E_{q_j} بزرگی تخطی خصوصیت متجاوز از معیار j ام، C_{q_j} غلظت خصوصیت متجاوز (ام)، SV_{q_j} مقدار استاندارد

میدان مطالعه و نمونه‌برداری

این مطالعه در مناطق شهری ایران بوسیله شرکت مهندسی آب و فاضلاب ایران با همکاری ۴۰ شرکت آب و فاضلاب واقع در ۳۱ استان کشور انجام پذیرفت. در مناطق شهری ایران تقریباً ۶۷٪ آب اجتماع از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود (۱۷)، از این‌رو در این مطالعه برای تهیه یک شمای کلی از

تحلیل حساسیت شاخص MDWQI

به منظور بررسی درستی روابط توسعه یافته برای محاسبه شاخص MDWQI، حساسیت این شاخص به داده‌های خصوصیات کیفی ورودی تحلیل گردید. این اقدام با حذف دو عامل از خصوصیات کیفی مقبولیت و بهداشتی با بالاترین نرخ تخطی انجام شد و سپس نتایج شاخص جدید (حاصل از حذف دو خصوصیت) با نتایج حاصل از شاخص MDWQI مقایسه گردید و تجزیه و تحلیل شد.

یافته‌ها

ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص MDWQI

تصویر کلی کیفیت منابع آب زیرزمینی ایران با استفاده از شاخص MDWQI و زیرشاخص‌های آن در جدول ۳ و شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ آمده

است، منابع آب زیرزمینی استان اردبیل با کسب امتیاز ۹۴، بالاترین میانگین استانی امتیاز شاخص MDWQI را به خود اختصاص دادند. بالاترین میانگین استانی امتیاز شاخص‌های HWQI و AWQI به ترتیب ۹۵ و ۹۹ بدست آمد که به ترتیب مربوط به استان‌های اردبیل و کردستان بود. در ۲۵ استان کشور، میانگین استانی امتیاز شاخص MDWQI در محدوده خوب بود و در ۴ و ۲ استان دیگر نیز میانگین استانی امتیاز این شاخص به ترتیب در محدوده متوسط و مرزی قرار داشت (شکل ۱). در هیچ یک از استان‌های کشور میانگین استانی امتیاز شاخص MDWQI در سطح عالی و یا نامناسب نبود. مطابق جدول ۳، پایین‌ترین میانگین استانی امتیاز شاخص‌های MDWQI، HWQI و AWQI به ترتیب ۵۶، ۶۵ و ۳۸ بدست آمد. این مقادیر به ترتیب در استان‌های قم، هرمزگان و قم مشاهده شد، بنابراین بر اساس شاخص MDWQI، پایین‌ترین کیفیت آب زیرزمینی مربوط به استان قم بود.

جدول ۳. شاخص‌های MDWQI، HWQI و AWQI در منابع آب زیرزمینی ایران

شماره	استان	خصوصیات با				MDWQI	HWQI	AWQI
		بیشترین نرخ تخطی		بالاترین NSE				
		AWQI	HWQI	AWQI	HWQI			
۱	آذربایجان شرقی	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۲	۷۰	۹۲
۲	آذربایجان غربی	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۲	۷۵	۹۳
۳	اردبیل	فلوراید	سختی	فلوراید	سختی	۹۴	۹۵	۹۲
۴	اصفهان	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۴	۸۵	۸۲
۵	البرز	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۵	۷۹	۹۶
۶	ایلام	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۹۲	۸۸	۹۵
۷	بوشهر	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۶۱	۷۹	۴۷
۸	تهران	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۷	۷۸	۹۷
۹	چهارمحال و بختیاری	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۹۲	۸۸	۹۸
۱۰	خراسان جنوبی	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۷۴	۷۱	۷۷
۱۱	خراسان رضوی	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۵	۸۰	۹۰
۱۲	خراسان شمالی	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۷۵	۷۲	۷۸
۱۳	خوزستان	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۶	۸۲	۸۹
۱۴	زنجان	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۶	۷۵	۹۵
۱۵	سمنان	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۹۰	۹۲	۸۷
۱۶	سیستان و بلوچستان	فلوراید	منیزیم	فلوراید	منیزیم	۸۰	۸۸	۷۴

ادامه جدول ۳: شاخص‌های MDWQI، HWQI و AWQI در منابع آب زیرزمینی ایران

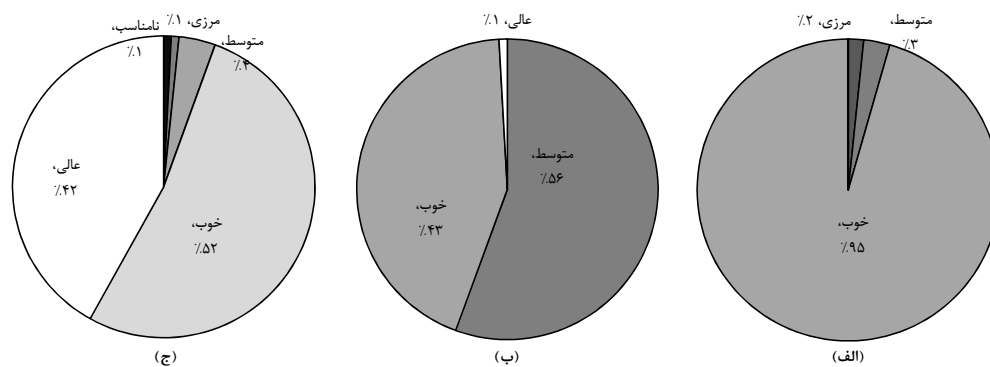
شماره	استان	خصوصیات با				AWQI	HWQI	MDWQI
		بالاترین NSE		بیشترین نرخ تخطی				
		AWQI	HWQI	AWQI	HWQI			
۱۷	فارس	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۸۷	۸۰	۸۳
۱۸	قزوین	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۷	۸۶	۹۱
۱۹	قم	منیزیم	فلوراید	منیزیم	نترات	۳۸	۷۷	۵۶
۲۰	کردستان	منیزیم	فلوراید	آهن	فلوراید	۹۹	۷۶	۸۶
۲۱	کرمان	منیزیم	آرسنیک	منیزیم	آرسنیک	۹۲	۷۹	۸۵
۲۲	کرمانشاه	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۷	۸۲	۸۹
۲۳	کهگیلویه و بویراحمد	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۸	۷۵	۸۴
۲۴	گلستان	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۵	۷۵	۸۵
۲۵	گیلان	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۸۸	۶۶	۷۶
۲۶	لرستان	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۵	۶۸	۸۵
۲۷	مازندران	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۳	۷۴	۸۴
۲۸	مرکزی	سدیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۸۹	۸۳	۸۶
۲۹	هرمزگان	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۶۴	۶۵	۶۵
۳۰	همدان	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۴	۸۰	۸۷
۳۱	یزد	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۸۴	۹۱	۸۸
۳۲	کل کشور	منیزیم	فلوراید	منیزیم	فلوراید	۹۱	۷۹	۸۵



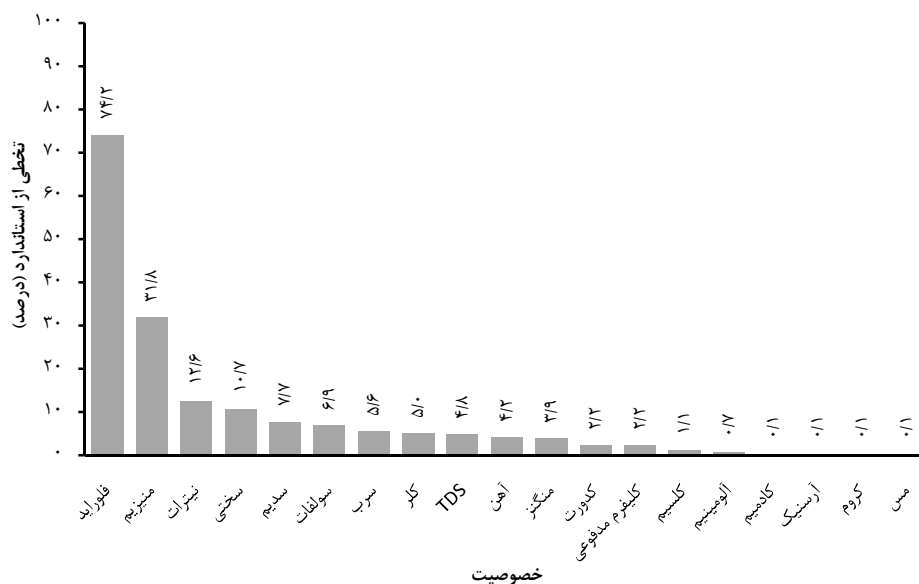
شکل ۱: تصویر کلی کیفیت منابع آب زیرزمینی ایران با استفاده از شاخص MDWQI (میانگین استانی)

از میان ۲۳ خصوصیات کیفی ورودی شاخص MDWQI، از مقدار استاندارد خود تخطی کرده و تنها نیتروژن آمونیاکی، pH، روی و جیوه همواره در حد استاندارد بودند. در میان خصوصیات کیفی مقبولیت و بهداشتی، به ترتیب منیزیم و فلوراید بیشترین نرخ تخطی را نشان دادند. طبقه بندی آب های زیرزمینی کشور (بر حسب میزان جریان) بر اساس غلظت فلوراید و غلظت منیزیم در شکل ۴ ارائه شده است.

طبقه بندی آب های زیرزمینی کشور (بر حسب میزان جریان) با استفاده از شاخص های MDWQI، HWQI و AWQI در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس شاخص MDWQI، کیفیت ۹۵٪ آب های زیرزمینی کشور در سطح خوب تعیین شد و در بقیه موارد متوسط یا مرزی بود (شکل ۲). شکل ۳ نرخ تخطی (بر حسب درصد) خصوصیات کیفی آب را در سطح کشور ارائه می دهد. با توجه به شکل ۳، تعداد ۱۹ پارامتر



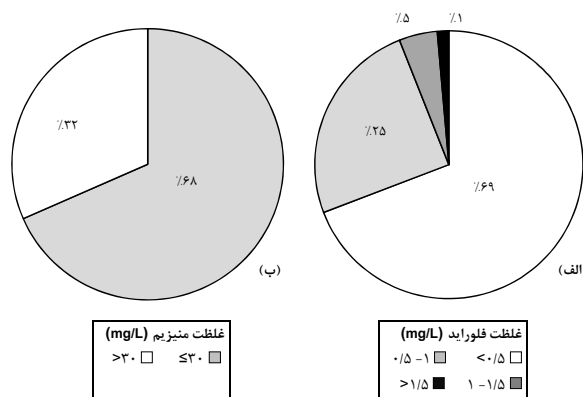
شکل ۲: طبقه بندی آب های زیرزمینی کشور (بر حسب میزان جریان) با استفاده از شاخص های MDWQI (الف)، HWQI (ب) و AWQI (ج)



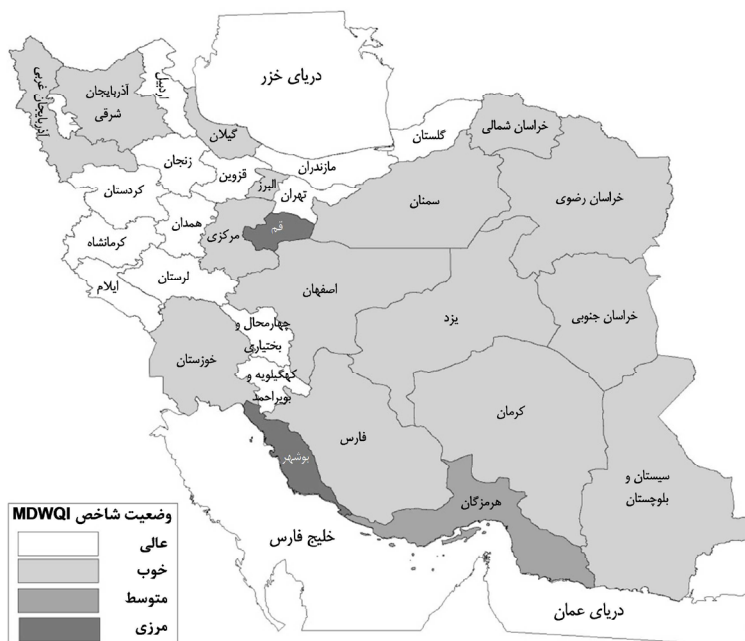
شکل ۳: نرخ تخطی (بر حسب درصد) خصوصیات کیفی آب در سطح کشور

تحلیل حساسیت شاخص MDWQI

شکل ۵ تأثیر حذف دو خصوصیت کیفی مقبولیت و بهداشتی با بالاترین نرخ تخطی (به ترتیب منیزیم و فلوراید) از خصوصیات ورودی به شاخص MDWQI را نشان می‌دهد. در نتیجه حذف فلوراید و منیزیم از خصوصیات کیفی ورودی به شاخص MDWQI، میانگین استانی امتیاز این شاخص در ۱۳ استان در وضعیت عالی قرار گرفت که بهبود قابل ملاحظه‌ای نسبت به وضعیت اصلی این شاخص محسوب می‌شود.



شکل ۴: طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی کشور (بر حسب میزان جریان) بر اساس (الف) غلظت فلوراید و (ب) غلظت منیزیم



شکل ۵: تأثیر حذف فلوراید و منیزیم از خصوصیات کیفی ورودی به شاخص MDWQI

HWQI در سطح عالی بود (استان اردبیل)، در حالی که در ۱۱ استان میانگین استانی شاخص AWQI در سطح عالی قرار داشت، بعلاوه شکل ۲ نشان می‌دهد که شاخص‌های HWQI و AWQI به ترتیب در ۱٪ و ۴۲٪ از آب‌های زیرزمینی مورد مطالعه در وضعیت عالی قرار داشتند، بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت زیبایی‌شناختی منابع آب زیرزمینی ایران از کیفیت بهداشتی آنها بهتر بود. بالاترین میانگین استانی امتیاز شاخص MDWQI به میزان ۹۴ در استان اردبیل مشاهده شد، منابع آب زیرزمینی این استان بالاترین میانگین

بحث

ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص MDWQI

شاخص‌های ترکیبی کیفیت آب آشامیدنی تصویر جامعی از مطلوبیت آب برای مصرف شرب ارائه نموده و قضاوت در مورد کیفیت منابع آب را تسهیل می‌نمایند (۱-۳). مطابق جدول ۳، میانگین کشوری امتیاز شاخص‌های MDWQI، HWQI و AWQI به ترتیب ۸۵ (خوب)، ۷۹ (متوسط) و ۹۱ (خوب) بود. در سطح استانی تنها در یک استان میانگین امتیاز شاخص

استانی امتیاز شاخص HWQI (به میزان ۹۵) را نیز به خود اختصاص دادند، بنابراین بر پایه شاخص MDWQI، منابع آب زیرزمینی استان اردبیل از بهترین کیفیت برخوردار بودند. پایین‌ترین میانگین استانی شاخص MDWQI در استان قم مشاهده شد، در این استان بیشترین نرخ تخطی خصوصیات کیفی بهداشتی و مقبولیت به ترتیب مربوط به نترات و منیزیم بود، در حالی که بالاترین مقادیر NSE خصوصیات کیفی بهداشتی و مقبولیت به ترتیب به فلوراید و منیزیم تعلق گرفت. مطابق شکل ۳، در سطح کشور، سه خصوصیت کیفی اول با بیشترین نرخ تخطی به ترتیب فلوراید، منیزیم و نترات بودند که نرخ تخطی آنها به ترتیب ۷۴٪، ۳۲٪ و ۱۳٪ تعیین شد. نرخ بالای تخطی از معیار فلوراید عمدتاً ناشی از غلظت کم فلوراید در منابع آب زیرزمینی مورد مطالعه بود. شکل ۴ نشان می‌دهد که در ۶۹٪ از آب‌های زیرزمینی استحصال شده، غلظت فلوراید پایین‌تر از حداقل غلظت مجاز 0.5 mg/L بود، در ۳۰٪ آنها غلظت فلوراید در محدوده مجاز $0.5 - 1.5 \text{ mg/L}$ قرار داشت و تنها در ۱٪ باقیمانده غلظت فلوراید بالاتر از حداکثر غلظت مجاز 1.5 mg/L بدست آمد. غلظت پایین فلوراید در منابع آب زیرزمینی ایران در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است. Mesdaghinia و همکاران (۱۹) میانگین غلظت فلوراید در منابع آب زیرزمینی ایران را $0.28 \pm 0.47 \text{ mg/L}$ بدست آوردند. شکل ۴ نشان می‌دهد که در ۳۲٪ از آب‌های زیرزمینی استخراج شده، غلظت منیزیم بالاتر از استاندارد کیفیت آب آشامیدنی (30 mg/L) بود. طبق بررسی‌های انجام شده، در اکثر موارد فرایند تصفیه آب‌های زیرزمینی در تأمین آب اجتماع در ایران تنها گندزدایی با کلر است که تأثیری بر غلظت فلوراید و منیزیم ندارد. در بعضی از شرکت‌های آب و فاضلاب، یکی از استراتژی‌های دستیابی به کیفیت مطلوب آب آشامیدنی، استفاده از چند منبع آب و تنظیم میزان برداشت آب از منابع آبی مختلف است (۱۷)، بنابراین در مواردی که از چند منبع آب برای تغذیه شبکه توزیع آب اجتماع استفاده می‌شود، اختلاط آب‌های زیرزمینی با یکدیگر و یا با آب‌های سطحی می‌تواند کیفیت آب در شبکه توزیع را بهبود ببخشد. مقایسه استاندارد کیفیت آب آشامیدنی ایران برای فلوراید و منیزیم با استانداردهای متناظر سایر کشورها و رهنمودهای

سازمان جهانی بهداشت نشان می‌دهد که استاندارد کیفیت آب آشامیدنی ایران برای خصوصیات مذکور سختگیرانه است، برای مثال سازمان جهانی بهداشت برای فلوراید فقط رهنمود حداکثر غلظت مجاز به میزان 1.5 mg/L را ارائه داده و برای منیزیم رهنمودی پیشنهاد نداده است (۲۰). استاندارد اولیه کیفیت آب آشامیدنی کشور آمریکا برای فلوراید 4 mg/L است، در این کشور برای منیزیم استاندارد ملی کیفیت آب آشامیدنی وضع نشده است (۲۱). این مقایسه نشان می‌دهد که نرخ بالای تخطی فلوراید و منیزیم در منابع آب زیرزمینی ایران ناشی از استاندارد سختگیرانه این خصوصیات است. نتایج این مطالعه نشان داد که استانداردهای کیفیت آب آشامیدنی فلوراید و منیزیم بسیار سختگیرانه بوده و قابلیت اجرا ندارند، بنابراین توصیه می‌شود این استانداردها بر اساس رهنمودهای سازمان جهانی بهداشت و با توجه به منابع مالی، فنی و کیفیت منابع آب کشور بازنگری و اصلاح گردند.

امروزه افزایش غلظت نترات در منابع آب، بسیاری از سیستم‌های تأمین آب آشامیدنی در سراسر دنیا را با مشکل مواجه کرده است. غلظت بالای نترات در آب آشامیدنی از طریق ایجاد مسمومیت متهموگلوبینمیا بویژه در نوزادان خطر بزرگی برای سلامت انسان بشمار می‌رود (۲۲). در سال‌های اخیر غلظت نترات در منابع آب ایران نیز افزایش یافته است (۲۳ و ۲۴). مهم‌ترین منابع آلودگی آب به نترات شامل فعالیت‌های کشاورزی (استفاده از کودهای شیمیایی نیتروژنه و کود حیوانی)، شیرابه محل دفن زباله، نشت از سپتیک تانک، رواناب‌های شهری، دفع فاضلاب شهری و صنعتی خام و یا با تصفیه ناکافی می‌شود (۲۲). در مواردی که غلظت نترات در منابع آب تأمین‌کننده آب آشامیدنی بالاست، باید منابع آب دیگری را جایگزین منابع آب آلوده کرده و یا نترات را از طریق فرآیندهای تصفیه آب حذف کرد.

برای مقایسه عملکرد شاخص MDWQI با سایر شاخص‌های کیفیت آب، داده‌های کیفیت آب مورد مطالعه با شاخص DWQI کانادا نیز ارزیابی شد؛ در این ارزیابی میانگین کشوری امتیاز شاخص DWQI کانادا ۸۷ (سطح خوب) بدست آمد (داده‌ها نشان داده نشده است) که کمی بیشتر از میانگین کشوری امتیاز شاخص MDWQI (به میزان ۸۵) است، علت

به درستی تدوین و تنظیم شده‌اند و توصیف این شاخص از کیفیت آب صحیح است، بنابراین از این روابط می‌توان در سایر مطالعات برای ارزیابی کیفیت منابع آب استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، شاخص اصلاح شده کیفیت آب آشامیدنی (MDWQI) توسعه یافت و از آن برای ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی تأمین‌کننده آب آشامیدنی در سراسر ایران در سال ۱۳۹۰ استفاده گردید. میانگین کشوری امتیاز شاخص MDWQI و زیرشاخص‌های کیفیت بهداشتی و زیبایی‌شناختی آن، HWQI و AWQI به ترتیب ۸۵ (خوب)، ۷۹ (متوسط) و ۹۱ (خوب) بود. در ۲۵ استان کشور، میانگین استانی امتیاز شاخص MDWQI در محدوده خوب بود و در ۴ و ۲ استان دیگر نیز میانگین استانی امتیاز این شاخص به ترتیب در محدوده متوسط و مرزی قرار داشت. درستی روابط و معادلات ارائه شده برای توسعه شاخص MDWQI با تحلیل حساسیت آن به اثبات رسید. این مطالعه نشان داد که شاخص MDWQI و زیرشاخص‌های آن کیفیت منابع آب را به سهولت، به درستی و به طور قابل اعتماد توصیف می‌کنند و می‌توان از آنها بطور گسترده در سراسر دنیا برای ارزیابی کیفیت منابع آب استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت‌های آب و فاضلاب سراسر کشور به خاطر همکاری در نمونه‌برداری و اندازه‌گیری نمونه‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایند. همچنین رضا سعیدی از حمایت‌های مالی بنیاد ملی نخبگان تشکر می‌کند.

امتیاز بالاتر شاخص DWQI کانادا عدم وزندهی (یا وزن برابر) خصوصیات کیفی ورودی به شاخص است. ساختار متفاوت شاخص‌های کیفیت آب مورد استفاده در مطالعات دیگر، مقایسه نتایج ارزیابی آنها با یکدیگر را مشکل می‌سازد. Ocampo-Duque و همکاران (۳) بر اساس منطق فازی و با استفاده از ۲۷ خصوصیت کیفی آب، یک شاخص فازی کیفیت آب توسعه داده و از آن برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه Low Ebro استفاده کردند، در این مطالعه امتیاز شاخص کیفیت آب ۶۷ با توصیف متوسط تعیین گردید. شاخص کیفیت آب توسعه یافته در مطالعه Vasanthavigar و همکاران (۱۱)، کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه Thirumanimuttar را در بیشتر موارد نامناسب نشان داد. مقایسه نتایج ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی ایران با شاخص MDWQI با نتایج سایر مطالعات با توجه به ساختار متفاوت شاخص‌های بکار گرفته شده در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که وضعیت کلی کنونی آب‌های زیرزمینی ایران قابل قبول بوده، اما حفظ و یا ارتقاء کیفیت موجود باید با تمرکز و توجه بیشتر از طریق طراحی و اجرای برنامه‌های جامع مدیریت کیفیت آب دنبال شود (۳، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۲۵).

تحلیل حساسیت شاخص MDWQI

حذف فلوراید و منیزیم از خصوصیات کیفی ورودی به شاخص MDWQI به میزان قابل توجهی توصیف این شاخص از کیفیت منابع آب زیرزمینی کشور را بهبود بخشید، بطوری‌که میانگین استانی امتیاز آن در ۱۳ استان در وضعیت عالی قرار گرفت و در ۱، ۱۵ و ۲ استان به ترتیب در سطح خوب، متوسط و مرزی به ثبت رسید. با حذف فلوراید و منیزیم، میانگین استانی امتیاز شاخص MDWQI در استان لرستان ۱۰۰ بدست آمد؛ این امتیاز بدین معنی است که در طول یکسال دوره نمونه‌برداری، در نمونه‌های برداشت شده از منابع آب زیرزمینی استان لرستان، هیچ‌کدام از خصوصیات کیفی ورودی (۲۱ خصوصیت) از حد استاندارد تخطی نکردند. افزایش امتیاز شاخص MDWQI با حذف دو خصوصیت کیفی مقبولیت و بهداشتی با بالاترین نرخ تخطی نشان داد که روابط و معادلات ارائه شده برای توسعه شاخص MDWQI

منابع

- 1- Boyaciolu H. Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA*. 2007;33:101–106.
- 2- Icaga Y. Fuzzy evaluation of water quality classification. *Ecological Indicators*. 2007;7:710–18.
- 3- Ocampo-Duque W, Ferre-Huquet N, Domingo JL, Schuhmacher M. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: a case study. *Environment International*. 2006;32:733–42.
- 4- Silvert W. Fuzzy indices of environmental conditions. *Ecological Modelling*. 2000;130:111–19.
- 5- Horton RK. An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 1965;37:300–306.
- 6- Chang N, Chen HW, King SK. Identification of river water quality using the fuzzy synthetic evaluation approach. *Journal of Environmental Management*. 2001;63:293–305.
- 7- Ott WR. *Water quality indices: a survey of indices used in the United States*. Washington DC: US Environmental Protection Agency; 1978.
- 8- Cude CG. Oregon water quality index: A tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*. 2001;37:125–37.
- 9- Liou S-M, Lo S-L, Wang S-H. A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2004;96:35–52.
- 10- Ocampo-Duque W, Schuhmacher M, Domingo JL. A neural-fuzzy approach to classify the ecological status in surface waters. *Environmental Pollution*. 2007;148:634–41.
- 11- Vasanthavigar M, Srinivasamoorthy K, Vijayaragan K, Rajiv Ganthi R, Chidambaram S, Anandhan P, et al. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2010;171:595–609.
- 12- 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;10:857–68.
- 13- CCME. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME water quality index 1.0, user's manual. Winnipeg, Manitoba: Canadian Council of Ministers of the Environment; 2001.
- 14- Rickwood CJ, Carr GM. Development and sensitivity analysis of a global drinking water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2009;156:73–90.
- 15- Lumb A, Halliwell D, Sharma T. Application of the CCME water quality index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006;113:411–29.
- 16- ISIRI. Chemical specifications of drinking water, ISIRI No. 1053. 5th ed. Tehran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran; 2009 (in Persian).
- 17- Iranian Water and Wastewater Engineering Company. Annual performance report of Iranian rural water and wastewater companies in 2011. Tehran: Iranian Water and Wastewater Engineering Company; 2011 (in Persian).
- 18- APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association; 2005.
- 19- Mesdaghinia AR, Azam Vaghefi K, Montazeri A, Mohebbi MR, Saeedi R. Monitoring of fluoride in groundwater resources of Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2010;84:432–37.
- 20- WHO. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4th ed. Geneva: World Health Organization; 2011.
- 21- USEPA. National primary drinking water regulations. USA: United States Environmental Protection Agency; 2009. Report No.: EPA 816-F-09-004.
- 22- Saeedi R, Naddafi K, Nabizadeh R, Mesdaghinia A, Nasserli S, Alimohammadi M, et al. Denitrification of drinking water using a hybrid heterotrophic/autotrophic/BAC bioreactor. *Desalination and Water Treatment*. 2012;45:1–10.
- 23- Gheysari MM, Houdaji M, Najafi P, Abdollahi A. Assessment of nitrate pollution of groundwater in South-East of Isfahan region. *Journal of Environmental Studies*. 2007;33:43–50 (in Persian).

- 24- Khosravi Dehkordi A, Afyouni M, Mousavi SF. Nitrate concentration in groundwater in the Zayanderoud river basin. *Journal of Environmental Studies*. 2006;32:33–40 (in Persian).
- 25- Shokuhi R, Hosinzadeh E, Roshanaei G, Alipour M, Hoseinzadeh S. Evaluation of Aydughmush Dam Reservoir water quality by National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSF-WQI) and water quality parameter changes. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2012;4(4):439–50 (in Persian).

Development of a modified drinking water quality index (MDWQI) and its application for assessing water quality in groundwater resources of Iran

**Mohebbi Mohammad-Reza.¹, Montazeri Ahmad.¹, Azam Vaghefi Koshyar.¹, Abtahi Mehrnoosh.², Oktaei Sogol.³,
Gholamnia Reza.⁴, Aliasgari Fatemeh.⁴, *Saeedi Reza.⁴**

¹Water Quality Control Bureau, National Water and Wastewater Engineering Company, Tehran, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

³Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

⁴Department of Public Health, Faculty of Health, Safety and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 10 November 2012 ; Accepted: 4 February 2013

ABSTRACT

Background and objectives: In this research, an innovative drinking water quality index for assessing water resources as “modified drinking water quality index (MDWQI)” was developed and applied for evaluating all of the groundwater resources utilized for community water supply in urban areas of Iran during 2011.

Materials and methods: Twenty-three water quality parameters and relevant Iranian standards for drinking water quality were selected as input parameters and benchmarks respectively. The MDWQI is calculated using three factors including the number of parameters that excure benchmarks, the number of measurements in a dataset that excure benchmarks and the magnitude of excursions. The MDWQI scores range from 0 to 100 and classify water quality in five categories as excellent (95-100), good (80-94), fair (65-79), marginal (45-64), and poor (0-44).

Results: According to the MDWQI value, about 95% of the groundwater resources were in the good condition and the others were in the fair or marginal condition; also the best and the worst water quality of water resources were observed in Ardebil Province and Qom Province respectively. The three parameters of fluoride, magnesium, and nitrate recorded the highest rates of violation to be 74, 32, and 13% respectively.

Conclusion: The nationwide average score of the MDWQI was 85 (good description). This study indicated that the MDWQI and its sub-indices could describe the overall water quality of water bodies easily, reliably and correctly and have the potential suitability for extensive application all over the world.

Keywords: Drinking water, Groundwater resources, Water quality index, Iran

*Corresponding Author: reza.saeedi@gmail.com

Tel: +98 21 77302969 Fax: +98 21 77309961