

Assessment of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Quality Using WQI during Two Decades in Aquifer of Golestan Province

FARZANEH KIA¹, KHALIL GHORBANI^{2*}, MEYSAM SALARIJAZI³

1. M.Sc. Water Resource Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran

2. Associate Professor of Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran

3. Assistant Professor of Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran

(Received: Aug. 6, 2017- Revised: May. 9, 2018- Accepted: May. 23, 2018)

ABSTRACT

Groundwater is of valuable resources that its conservation needs quality and quantity monitoring. Different indices such as WQI (water quality index) are used in order to monitor the groundwater quality. The objective of this study is to assess spatial-temporal changes in WQI in groundwater aquifer of Golestan province including Ghare-Sou, Grgan-Roud and Gorgan gulf basins. The Golestan province was selected as the study area. WQI was calculated based on the quality parameters data of 114 deep wells in the study area, collected during a 21-years period. After zoning WQI in GIS, the spatial-temporal changes of this index were investigated considering the range of changes, the observed minimum and maximum values during the study period. The empirical Bayesian kriging method presented better results in comparison to other methods for WQI zoning in GIS environment. The quality zoning of WQI in the studied area showed that the aquifer is in a good and very good condition and it is only bad in a small part of aquifer located in the eastern shores of the Caspian Sea and the northern part of the study area. In addition, no considerable differences were found between the WQI averages of the two events data sampling during the year. Also, the investigations show a decrease in water quality as closing to the sea shore and to the northern part of the study area. According to the fact that WQI follow the general slope of the region, there was a good spatial structure in the region which caused a better result for empirical Bayesian kriging interpolation method.

Keywords: Groundwater, Quality Monitoring, Kriging method, WQI

* corresponding author's email: ghorbani.khalil@yahoo.com

ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از WQI طی دو دهه در آبخوان استان گلستان

فرزانه کیا^۱، خلیل قربانی^{۲*}، میثم سالاری جزی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۲/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۳/۲)

چکیده

آب زیرزمینی از منابع ارزشمندی است و حفظ و نگهداری آن نیازمند پایش کمی و کیفی است. به منظور پایش کیفیت آب زیرزمینی از شاخص‌های مختلفی همچون WQI (water quality index) استفاده می‌شود. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تغییرات زمانی-مکانی WQI در آبخوان آب زیرزمینی استان گلستان شامل حوضه‌های خلیج گرگان، گرگانرود و قره‌سو می‌باشد. استان گلستان به‌عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی ۱۱۴ چاه عمیق در آبخوان این استان طی یک دوره ۲۱ ساله تهیه و بر اساس آن‌ها، WQI محاسبه شد. پس از پهنه‌بندی این شاخص در محیط GIS، تغییرات زمانی-مکانی آن از لحاظ میانگین، دامنه تغییرات، کمترین و بیشترین مقادیر مشاهده‌شده طی این دوره بررسی شد. در پهنه‌بندی WQI در محیط GIS، روش کریجینگ بیزین تجربی نتایج بهتری را ارائه کرد. پهنه‌بندی کیفی WQI در آبخوان مورد مطالعه نشان داد که آبخوان در وضعیت خوب و بسیار خوب قرار دارد و فقط بخش کوچکی از آن که به سواحل شرقی دریای خزر و شمال منطقه مطالعاتی منتهی می‌شوند، از لحاظ کیفی در وضعیت بد قرار دارند. با توجه به اندازه‌گیری پارامترهای کیفی در دو نوبت از سال، نتایج نشان داد میانگین WQI در نیمه اول و دوم سال اختلاف قابل‌توجهی ندارد. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر چه به سمت شمال منطقه مطالعاتی و ساحل دریا نزدیک می‌شویم، کیفیت آب کاهش می‌یابد. با توجه به تبعیت WQI از شیب عمومی منطقه، ساختار مکانی خوبی در منطقه وجود داشت که باعث شد تا روش درون‌یابی کریجینگ بیزین تجربی نتایج بهتری را ارائه کند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، پایش کیفی، روش کریجینگ، WQI

مقدمه

وارد آب زیرزمینی شده و کیفیت آن را کاهش دهد. آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی نه‌تنها کیفیت آب چاه‌ها و قنات‌ها را به خطر می‌اندازد، بلکه با عبور از دریاچه‌ها و رودخانه‌ها می‌تواند کیفیت آب‌های سطحی (آزاد) را به خطر بیندازد (Sadat-Noori et al., 2013). با توجه به نیاز به کیفیت مناسب آب در مصارف خانگی و کشاورزی، کیفیت آب‌های زیرزمینی موردتوجه بسیار قرار گرفته است. به‌منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی، روش‌ها و شاخص‌های متعددی تعریف شده است. تاریخچه شاخص کیفی آب به اواسط قرن بیستم برمی‌گردد. (هورتون، ۱۹۶۵)، ۱۰ شاخص عمومی شامل pH، DO، کلیفرم‌ها، هدایت الکتریکی، کلراید و قلیابیت را انتخاب کرد. دامنه تغییرات شاخص بین ۱ تا ۴ تعیین شد. مقدار شاخص از رابطه تجمعی خطی بدست می‌آید (Poonam et al., 2013; Bharti and katyal, 2011). تلاش - های پیشگام هورتون توسط محققان دیگری دنبال شد تا اینکه شاخص‌های کیفیت آب مختلفی فرموله شد (Chatterjee et al.,

آب‌های زیرزمینی از منابع باارزش ذخیره آب‌های شیرین در دنیا هستند. توسعه انسانی و گسترش فعالیت‌های اقتصادی، بدون شک منجر به افزایش نیاز آب برای اهداف مختلف می‌شود. قسمتی از نیاز آبی توسط باران و آب‌های جمع‌آوری‌شده در پشت سدها تأمین و بخشی دیگر، از منابع ذخیره‌ای آب زیرزمینی تأمین می‌شود. برداشت بی‌رویه از این منابع، باعث کاهش سطح ایستایی سفره آب زیرزمینی شده است. افت سطح سفره نیز خود موجب پیشروی آب‌های شور به سمت آب‌های شیرین و کاهش کیفیت آب‌ها می‌شود. از طرفی دیگر مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و سموم در کشاورزی و همچنین دفن نامناسب فضولات، باعث شده تا شیرابه‌های آن‌ها

زیرزمینی آبخوان ساوه-نوبران در ایران با استفاده از WQI و نرم‌افزار GIS پرداخته شد، نتایج نشان داد که کیفیت آب از غرب به شرق در حال کاهش می‌باشد و یک سیستم جمع‌آوری فاضلاب مورد نیاز می‌باشد (Sadat-Noori *et al.*, 2013). در پژوهشی که به بررسی کیفیت آب سطحی بوکارو کولفیلد در هند پرداخته و WQI در هر یک از چاه‌های برداشتی محاسبه شد، نتایج حاکی از آن بود که ۲۸/۶ درصد نمونه‌ها در محدوده کیفیت خوب و ۷۱/۵ درصد در محدوده نامناسب قرار گرفتند (Kumar Singh *et al.*, 2014). طبق مطالعه‌ای که به کمک WQI و ارزیابی چندین پارامتر مهم کیفیت آب به بررسی کیفیت آب زیرزمینی شهر ویدیاناکار در هند پرداخته شد، نتایج حاکی از آن بود که اکثر نقاط دارای کیفیت خوب می‌باشند در صورتی که در بعضی نقاط، سختی و کدورت بالا می‌باشد و باید از ورود منابع آلودگی، جلوگیری به عمل آید (Kalpana *et al.*, 2014). در تحقیقی که با استفاده از WQI بر روی کیفیت آب زیرزمینی آناناگار که بخشی از شهر چنای در هند می‌باشد انجام شد، نتایج حاکی از آن بود که آب منطقه به‌منظور استفاده برای شرب مناسب است و برای بهبود بیشتر کیفیت، دولت باید حمایت‌های کافی را انجام دهد (Subbiah *et al.*, 2015). Kumar tiwari *et al.* (2014) به پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی بوکارو کولفیلد در هند با استفاده از WQI پرداختند و نتیجه گرفتند که درجات مختلفی از کیفیت آب در منطقه وجود دارد و ۷۹ درصد از منطقه در وضعیت عالی تا خوب و ۲۱ درصد در وضعیت بد قرار دارد. Bora and Goswami (2016) به کمک WQI، کیفیت آب رودخانه کولونگ در هند را مورد بررسی قرار دادند و نواحی از منطقه با کیفیت خوب و بد را مشخص کردند و به این نتیجه رسیدند که آب رودخانه نیاز به مراقبت ویژه از جمله جلوگیری از ورود شبکه‌های فاضلاب و همچنین جلوگیری از طغیان سیل و طوفان به رودخانه می‌باشد. (2014) Javid *et al.* به ارزیابی وضعیت کیفی دریاچه سد دز در ایران با استفاده از شاخص WQI و TSI پرداختند و خروجی کار نشان داد که آب مخزن در جهت انواع مصارف عمومی مطلوب بوده و فقط جهت شرب نیاز به تصفیه پیشرفته دارد. (2014) Ashayeri *et al.* کیفیت آب رودخانه دره رود در ایران برای آبیاری را با بهره‌گیری از رویکرد مدار حفاظتی و مدل CCME- WQI مورد ارزیابی قرار داده و خروجی حاصل از این مدل ایجاب کرد که اقدامات مدیریتی بهبود برای ارتقای سطح کیفی انجام گیرد. Fathi *et al.* (2016) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب تالاب چغاخور در ایران با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) پرداختند و نتایج حاصل، کیفیت آب تالاب

در بررسی کیفیت آب تالاب کولکاتا شرقی و همچنین اطراف آن در هند، با محاسبه WQI برای ۴۰ نمونه از آب‌های زیرزمینی و استفاده از نمودار پایپر، نواحی با کیفیت خوب و بد تعیین و با توجه به نتایج، مشخص شد که در مناطق جنوبی امکان بدتر شدن کیفیت آب و در مناطق مرکزی امکان بهتر شدن کیفیت وجود دارد (Sahu and sikdar, 2007). طبق تحقیقی که با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI)، کیفیت آب زیرزمینی ایالت تومکر تاک در هند مورد ارزیابی قرار گرفت، مشخص شد که اکثر نواحی این منطقه قبل از مصرف نیاز به تصفیه دارد (Ramakrishnaiah *et al.*, 2009). در تحقیقی که با استفاده از WQI و ترسیم ماتریس ضریب همبستگی داده‌ها به بررسی کیفیت آب رودخانه لندزو در نیجریا پرداخته شد، نتایج نشان داد آب رودخانه بدون هیچ مشکلی می‌تواند برای مصرف عموم مورد استفاده قرار بگیرد (J.Yisa and T.Jimoh., 2010). در بررسی کیفیت آب زیرزمینی به کمک WQI و نرم‌افزار GIS، به پهنه‌بندی کیفیت آب با روش اسپیلاین در منطقه دنبند در هند پرداخته شد و نتایج کار نشان داد که اکثر منطقه به‌منظور استفاده آب برای شرب، کشاورزی و صنعت مناسب می‌باشد (Chatterjee *et al.*, 2010). در تحقیقی دیگر که به کمک WQI به بررسی کیفیت آب زیرزمینی ترامینیماتار در هند پرداخته شد، نتایج نشان داد که منطقه کم‌کم در حال تهدید قرار دارد (Vasanthavigar *et al.*, 2010). J.M. Ishaku (2011) به بررسی کیفیت آب زیرزمینی منطقه جیمتایول در نیجریا پرداخت و با ترسیم ماتریس ضریب همبستگی داده‌ها نتیجه گرفت آب منطقه در چه در فصل خشکی و چه در فصل بارانی دچار آلودگی می‌باشد. طبق پژوهشی که با استفاده از WQI و همچنین نرم‌افزار GIS، به پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان الخیرات (ساحل تونس) پرداخته شد، خروجی کار نشان داد که تنها یک مکان از این منطقه نتیجه رضایت‌بخش را داشت (Ketata Rokbani *et al.*, 2013). در مطالعه‌ای که با بکارگیری WQI و محاسبه میانگین و انحراف معیار و رگرسیون داده‌ها بر روی کیفیت آب زیرزمینی شهر سورات در هند انجام شد، نتایج نشان داد که بخشی از این شهر دارای کیفیت بد و خیلی بد می‌باشد که نباید مستقیماً مورد استفاده قرار بگیرد (Rupal *et al.*, 2012). طبق تحقیقی که با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) به بررسی کیفیت آب زیرزمینی راتماپاسری در هند پرداخته شد، نتایج حاکی از آن بود که اکثر مناطق، دارای کیفیت نامناسب است و نیاز به تصفیه دارد (Al-Hadithi, 2012). در تحقیقی دیگر که به ارزیابی کیفیت آب

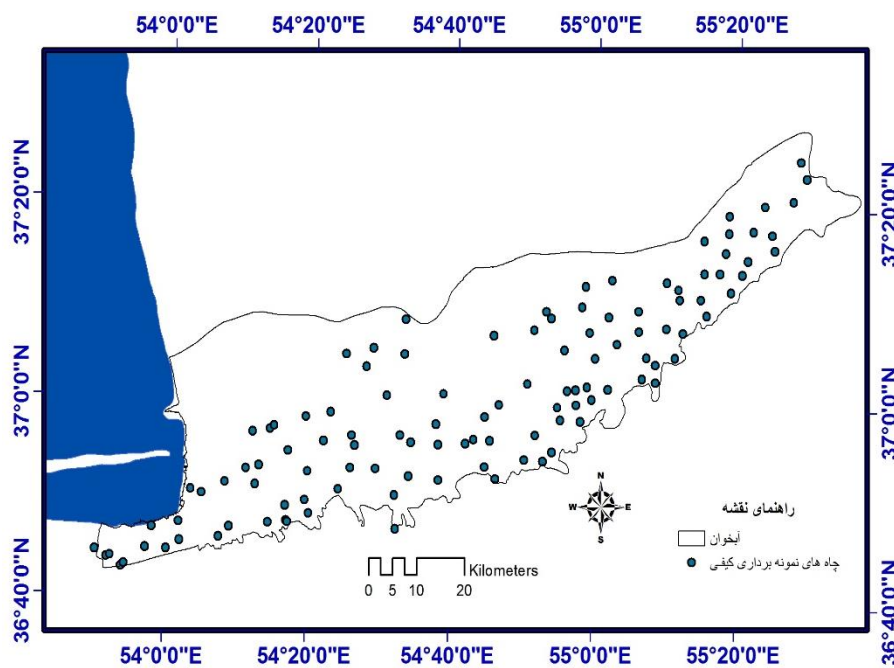
را در دو طبقه فقیر و نامناسب قرار داد.

بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد که WQI شاخص مناسبی در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. از طرفی استان گلستان از قطب‌های مهم کشاورزی در کشور می‌باشد که به دلیل مصرف کودهای شیمیایی و سموم و همچنین تأمین بخش زیادی از نیاز آبیاری از طریق چاه‌های آب زیرزمینی، خطر جدی برای کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی در این استان دیده می‌شود و ضرورت دارد تا این منابع ارزشمند آبی به کمک شاخص‌های ارزیابی کیفیت آب مورد مطالعه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها:

منطقه مورد مطالعه: منطقه مطالعاتی که آبخوان آب‌های

زیرزمینی استان گلستان را در برمی‌گیرد، شامل حوضه‌های گرگانرود، قره‌سو و خلیج گرگان می‌باشد. به منظور ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و محاسبه WQI از آمار ۲۱ ساله (۱۳۷۴-۱۳۹۴) ۱۱۴ چاه استفاده شد. برآورد مقدار عددی WQI بر اساس پارامترهایی انجام شده است که از نظر اهمیت آن برای مصارف انسانی (شرب) مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است (Sadat-Noori *et al.*, 2013). بر این اساس داده‌های پارامترهای کیفی آب شامل Ca, Mg, K, Na, HCO₃, pH, SO₄, Cl, TDS این داده‌ها برای چاه‌های نمونه برداری کیفی از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد. نمایشی از منطقه مورد مطالعه به همراه چاه‌های مطالعاتی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. منطقه مطالعاتی

روش انجام کار:

محاسبه شاخص WQI:

شاخص کیفیت آب جامع و همگانی توسط برون توسعه داده شد و سپس توسط دینینجر اصلاح شد (Sadat-Noori *et al.*, 2013). ابتدا به هر کدام از پارامترها وزنی بر اساس اهمیت و تأثیرشان بر روی سلامت بدن داده می‌شود (Ketata Robani *et al.*, 2013; Sadat-Noori *et al.*, 2013; Vasanthavigar *et al.*, 2010). حداکثر وزن که عدد ۵ می‌باشد به پارامترهایی مثل TDS, Cl, SO₄ به دلیل اهمیت بالای این پارامترها داده شد. بی-کربنات وزن یک را به دلیل اهمیت پایین به خود اختصاص

می‌دهد. به بقیه پارامترها وزنی بین ۱ تا ۵ بسته به اهمیتشان در کیفیت آب برای آب شرب داده شد (Ketata Rokbani *et al.*, 2013; Rupal *et al.*, 2012; Sahu and Sikdar, 2008). سپس وزن نسبی هر پارامتر با استفاده از رابطه ۱ بدست آمد. مجموع وزن‌های نسبی پارامترها برابر یک می‌باشد. در این پژوهش از استاندارد توصیه‌شده توسط سازمان سلامت جهانی (WHO) استفاده شد (WHO, 2004) (جدول ۱).

$$W_i = w_i \div \sum_{i=1}^n w_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

W_i : وزن هر پارامتر بین ۱ تا ۵، n : تعداد پارامترها، W_i :

بدست آمد (Ketata Rokbani et al., 2013; Sadat-*WQI* Noori et al., 2013; Al-Hadithi, 2012). در نهایت با استفاده از جدول (۲) وضعیت کیفی آب مشخص گردید. این طبقه‌بندی بر اساس تغییرات *WQI* می‌باشد (Bora and goswami, 2016; Sirajudeen et al., 2013).

$$SI_i = w_i \times Q_i \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$WQI = \sum SI_i \quad (\text{رابطه ۴})$$

وزن نسبی هر پارامتر سپس یک مقیاس سنجش کیفیت با استفاده از رابطه ۲ برای هر پارامتر محاسبه شد.

$$Q_i = (C_i \div S_i) \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

Q_i : ارزیابی کیفیت برای پارامتر i ام، C_i : مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده، S_i : WHO استاندارد برای هر پارامتر بر حسب mg/lit

سرانجام طبق رابطه ۳ برای محاسبه *WQI* ابتدا زیر شاخص SI_i محاسبه و طبق رابطه ۴ از مجموع SI_i ها مقدار

جدول ۱. وزن اختصاصی و وزن نسبی هر پارامتر

پارامتر	si=WHO	وزن اختصاص داده شده به هر پارامتر	وزن نسبی هر پارامتر
k	۱۲	۲	۰/۰۷۱
Na	۲۰۰	۴	۰/۱۴۳
Mg	۵۰	۳	۰/۱۰۷
Ca	۲۰۰	۳	۰/۱۰۷
So4	۲۵۰	۵	۰/۱۷۹
Cl	۲۵۰	۵	۰/۱۷۹
Hco3	۱۲۰	۱	۰/۰۳۶
pH	۸,۵	۳	۰/۱۰۳
TDS	۵۰۰	۵	۰/۱۷۹
Total		۳۱	۱

و بیزین کریجینک تجربی به کمک روش اعتبارسنجی تقاطعی ارزیابی شدند که در زیر به توضیح آن‌ها اشاره شده است.

روش چندجمله‌ای سراسری و موضعی: درون‌یابی به روش چندجمله‌ای سراسری یکی از روش‌های درون‌یابی است که برای سطوحی که تغییرات پیوسته و هموار دارند مناسب است. یک سطح هموار در این روش با استفاده از یک تابع ریاضی (یک چندجمله‌ای با درجات مختلف) به تمام نقاط نمونه ورودی برازش داده می‌شود. درون‌یابی به روش چندجمله‌ای موضعی قابلیت بیشتری دارد. این روش تعدادی تابع چندجمله‌ای (با درجات مختلف) را به نقاط واقع در یک همسایگی تعیین شده برازش می‌دهد. این کار سبب می‌شود که سطوح با دقت بیشتری ارائه شود (Ghorbani, 2012).

روش وزنی عکس فاصله: مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که نمونه‌برداری انجام نشده باشد از روی نقاط مجاورش با استفاده از رابطه ۵ تخمین زده می‌شود.

جدول ۲. تعیین وضعیت آب با توجه به تغییرات *WQI*

محدوده شاخص	بیان وضعیت
۲۵-۰	خیلی خوب
۲۶-۵۰	خوب
۵۱-۷۵	بد
۷۵<	خیلی بد

پهنه‌بندی شاخص *WQI*:

به منظور بررسی تغییرات منطقه‌ای *WQI* لازم است تا اطلاعات ایستگاهی با استفاده از روش‌های درون‌یابی در محیط GIS پهنه‌بندی شوند. برای این منظور روش‌های متعددی وجود دارد که می‌بایست روشی که با کمترین خطا همراه است انتخاب شود.

در این پژوهش روش‌های عکس وزن فاصله، روش‌های چند جمله‌ای‌های محلی و سراسری، روش اسپیلاین، کریجینگ

خطی ناریب است، لذا باید عاری از خطای سیستماتیک باشد و واریانس تخمین آن نیز حداقل باشد (Ghorbani, 2012).

روش بیزین کریجینگ تجربی: این روش یک روش درون‌یابی زمین‌آماری است که سختی‌های مربوط به ساختن یک مدل کریجینگ معتبر را خودکار می‌نماید؛ به عبارت دیگر در تحلیل‌های زمین‌آمار نیاز به تنظیم دستی پارامترها به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق است، اما در روش کریجینگ بیزین تجربی به‌طور اتوماتیک این پارامترها طی یک فرآیند شبیه‌سازی محاسبه می‌گردند. فرق دیگر این روش با سایر روش‌های کریجینگ این است که در این روش خطاهای مربوط به برآورد نیم تغییرنگار در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در سایر روش‌های کریجینگ، نیم تغییرنگار از مکان‌های با داده‌های مشخص استفاده می‌کند و سپس از این نیم تغییرنگار منفرد برای پیش‌بینی در مکان‌های نامشخص استفاده می‌شود. در نتیجه از آنجایی که عدم قطعیت برآورد نیم تغییرنگار را در محاسبات وارد نمی‌نمایند، منجر به برآورد خطای استاندارد پیش‌بینی می‌شوند (Bahrami Jovein and Hosseini, 2015).

بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص WQI:

برای این منظور پس از ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی شده‌ی WQI برای هر یک از دوره اول و دوم در هر سال، بر اساس دستور آماره‌های سلولی در محیط Arc GIS، پارامترهای آماری حاصل از این نقشه‌ها شامل میانگین، کمترین، بیشترین و دامنه‌ی تغییرات شاخص WQI در طول دوره آماری به‌صورت نقشه ترسیم و تغییرات مکانی آن‌ها بررسی شد. همچنین به‌منظور بررسی تغییرات کیفی این شاخص در طول زمان، میانگین دو دوره‌ی آماری بین سال‌های ۷۴ تا ۸۵ و ۸۶ تا ۹۴ محاسبه و پس از طبقه‌بندی این شاخص به دسته‌های مختلف، تغییرات این شاخص در بازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث:

انتخاب بهترین روش درون‌یابی شاخص WQI:

به‌منظور انتخاب بهترین روش درون‌یابی شاخص WQI، روش‌های مختلف درون‌یابی در محیط GIS به کمک روش اعتبارسنجی تقاطعی مورد آزمون قرار گرفتند. روشی که کمترین میزان مربعات خطا را بدست می‌دهد به عنوان روش بهتر انتخاب می‌شود (جدول ۳).

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^a}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^a}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن: z^* : مقدار برآورد شده بارش، z_i : مقدار مشاهده شده بارش در اطراف نقطه مورد نظر، d_i : فاصله بین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین، a : عدد صحیحی (بین ۱ تا ۵) و n : تعداد نقاط مشارکت داده شده در درون‌یابی است (Ghorbani, 2012).

روش اسپیلاین: اسپیلاین‌ها، توابع پیچیده‌ای شامل قطعاتی از چند جمله‌هایی با درجات مختلف بین هر دو نقطه از فضا هستند که در محل اتصالات، نرم شده‌اند. اسپیلاین‌ها یکی از بهترین روش‌ها برای نشان دادن تغییرات تدریجی سطوح مانند ارتفاع، عمق سطح ایستابی یا غلظت آلودگی می‌باشد. نتیجه درون‌یابی با این روش سطحی نرم و هموار می‌باشد. در روش اسپیلاین، نقاط مجهول بر اساس رابطه ۶ تخمین زده می‌شوند:

$$z(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i \phi(\|s_i - s_0\|) + \omega_{n+1} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$\phi(r)$: تابع پایه شعاعی، $r = \|s_i - s_0\|$: فاصله اقلیدسی بین پیش‌بینی مکان s_0 و هر داده مکانی s_i ، $\{\omega_i = 1, 2, \dots, n+1\}$ وزن‌هایی که تخمین زده می‌شوند (Ghorbani, 2012).

روش کریجینگ: کریجینگ یک روش تخمین آماری

است که مقادیر مجهول را با استفاده از مقادیر معلوم و یک نیم تغییرنما، برآورد می‌کند. این روش بر منطق "میانگین متحرک وزن‌دار" استوار می‌باشد. کریجینگ علاوه بر تخمین مقادیر مجهول، خطای مرتبط با آن تخمین را نیز حساب می‌کند؛ بنابراین می‌توان فاصله اطمینان را برای هر مقدار برآورد شده محاسبه کرد (رابطه ۷).

$$z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$z^*(x_i)$: مقدار برآورد در نقطه x_i ، λ_i : وزن مربوط به متغیر $z(x_i)$ ، مقدار مشاهده شده متغیر اصلی است (Ghorbani, 2012).

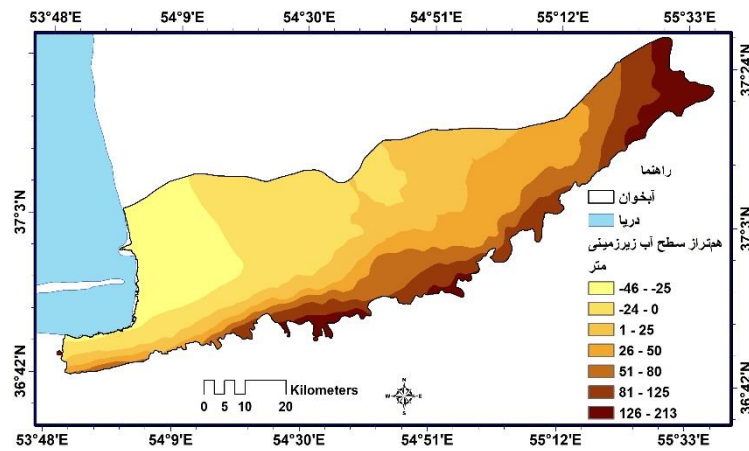
نرمال بودن متغیر z شرط استفاده از این تخمینگر است. اگر z توزیع نرمال نداشته باشد، باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد. از آن‌جا که تخمینگر کریجینگ بهترین تخمینگر

جدول ۳. نتایج ارزیابی خطا روش‌های مختلف درون‌یابی

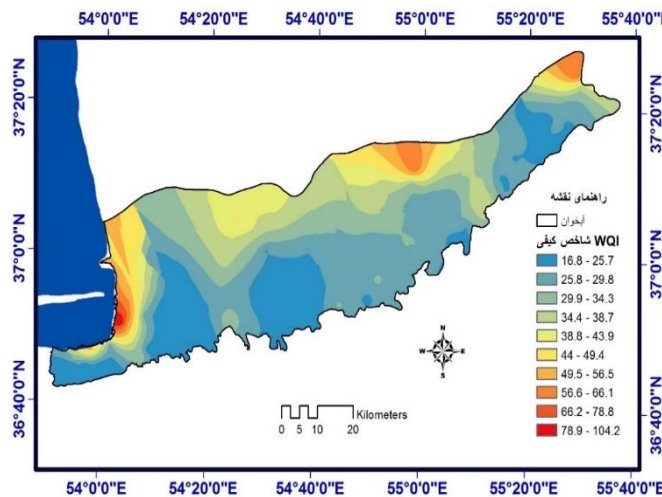
الگو	علامت اختصاری	RMSE
چندجمله‌ای سراسری با درجات ۱ و ۲ و ۳	GPI1	۹/۹۸
	GPI2	۱۰/۲۷
	GPI3	۱۰/۴۹
چندجمله‌ای موضعی با درجات ۱ و ۲ و ۳	LPI1	۷/۷۸
	LPI2	۷/۲۵
	LPI3	۷/۶
وزن عکس فاصله	IDW	۹/۱۵
کریجینگ معمولی	OK	۹/۰۶
بیزین کریجینگ		۸/۹۸
اسپیلاین	RBF	۹/۳۲

می‌زند. بر این اساس و با توجه به آنچه بر اساس شیب منطقه و نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی (شکل ۲) انتظار می‌رفت روش بیزین کریجینگ تجربی، روش مناسب‌تری انتخاب شد (شکل‌های ۳ و ۴).

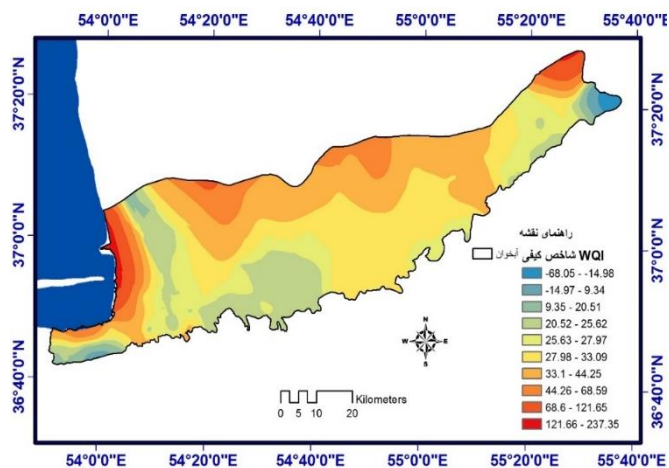
نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که روش چندجمله‌ای موضعی با وجود اینکه با مقدار خطای کمتری همراه است اما در خارج از محدوده ایستگاه‌ها که لازم است تا مقادیر WQI برون‌یابی شود، مقادیری چند برابر مقادیر WQI محاسباتی را تخمین



شکل ۲. نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی



شکل ۳. پهنه‌بندی WQI به روش بیزین کریجینگ تجربی



شکل ۴. پهنه‌بندی WQI به روش چندجمله‌ای موضعی

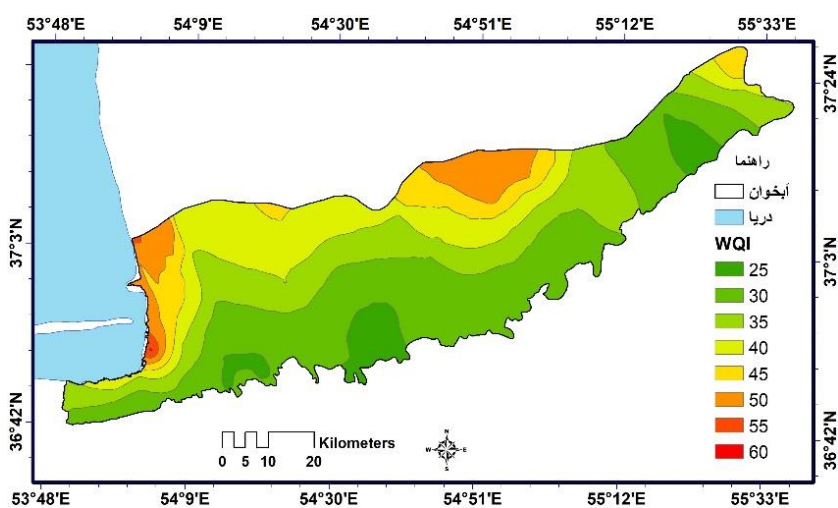
می‌باشد، در طبقه کیفی بسیار خوب و خوب قرار می‌گیرد. همچنین شکل (۵) نشان می‌دهد، هر چه به سمت شمال منطقه مطالعاتی و سمت سواحل شرقی دریای خزر نزدیک می‌شویم، مقدار WQI افزایش پیدا می‌کند و اندکی از کیفیت آب کاسته می‌شود. شواهد منطقه حاکی از آن است که در این مناطق هم‌تراز سطح آب زیرزمینی بالاست و هم خاک منطقه شور می‌باشد (شکل ۵).

میانگین تغییرات WQI در دوره‌ی پرآبی (آبان ماه) نیز، تقریباً مشابه دوره کم‌آبی می‌باشد. به طوری که قسمت‌های شمالی آبخوان و سواحل شرقی خزر از کیفیت پایین‌تری نسبت به دیگر نقاط برخوردارند (شکل ۶).

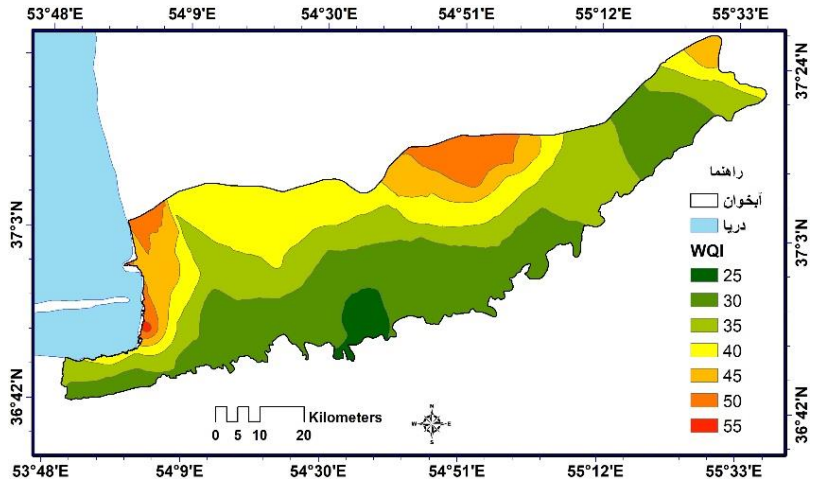
بررسی تغییرات منطقه‌ای شاخص WQI:

پس از انتخاب بهترین روش درون‌یابی، نقشه‌های WQI برای هر سال طی دوره آماری ۷۴-۹۴ و برای دو دوره در سال اردیبهشت (دوره کم‌آبی) و آبان (دوره پرآبی) بر اساس برداشت‌های آماری شرکت آب منطقه‌ای ترسیم و سپس بر اساس روش آماره‌های سلولی در محیط GIS، نقشه‌هایی بر اساس پارامترهای آماری میانگین، دامنه تغییرات، بیشترین و کمترین مقدار WQI ترسیم شدند.

در دوره کم‌آبی، میانگین WQI نشان می‌دهد که تقریباً بیشتر نقاط آبخوان مورد مطالعه به‌جز ناحیه کوچکی در ساحل شرقی دریای خزر که کمتر از ۰/۳۲ درصد منطقه



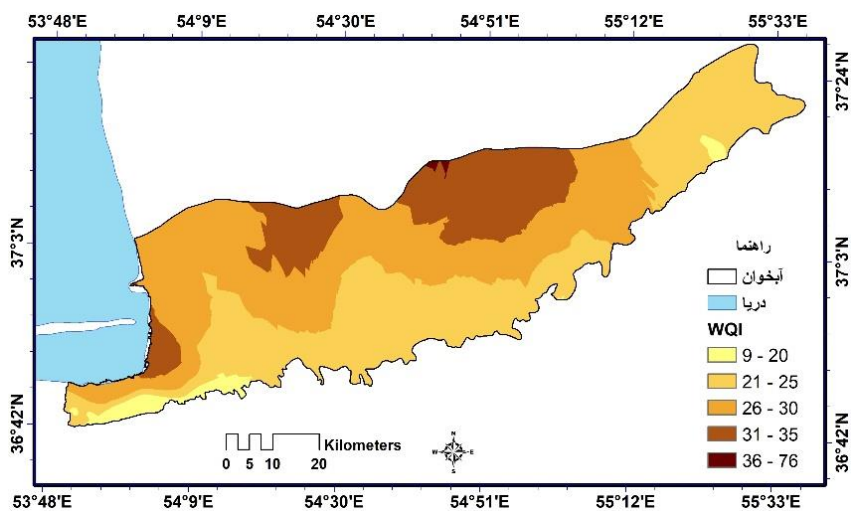
شکل ۵. میانگین WQI در دوره کم‌آبی طی دوره آماری ۷۴-۹۴



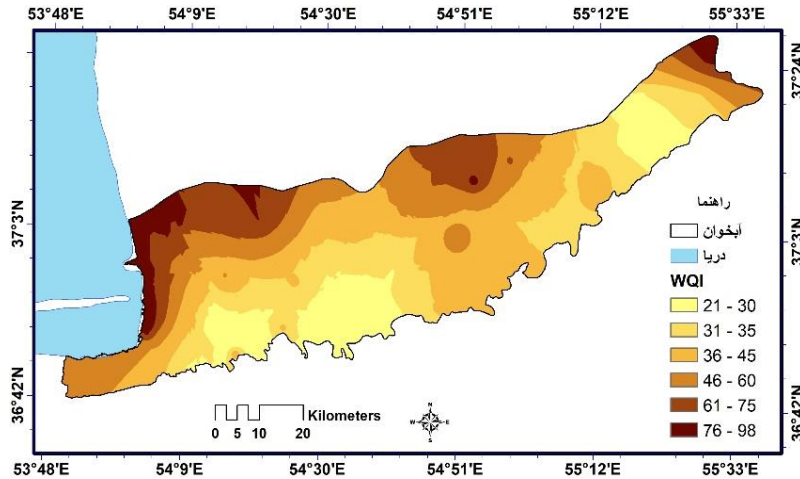
شکل ۶. میانگین WQI در دوره پراپی طی دوره آماری ۹۴-۷۴

جدول ۴. درصد سطح مناطق با WQI های مختلف

درصد مساحت	درصد مساحت دوره	WQI
دوره کم آبی	پراپی	
۶/۹۴	۲/۵۷	۲۵
۳۹/۳۶	۳۴/۹۳	۳۰
۲۴/۷۶	۲۶/۸۷	۳۵
۱۹/۹۱	۲۱/۰۴	۴۰
۸/۰۰	۸/۸۸	۴۵
۷/۷۰	۵/۶۱	۵۰
۰/۳۱	۰/۰۹	۵۵
۰/۰۱	.	۶۰



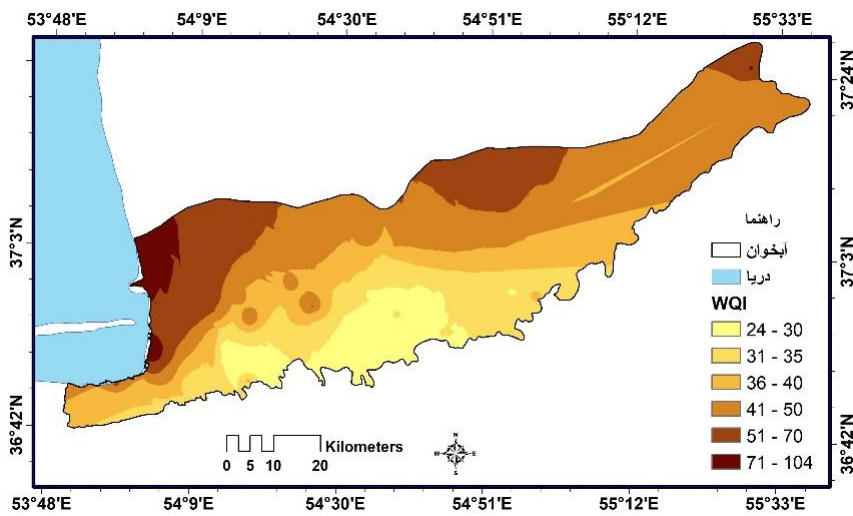
شکل ۷. کمترین مقدار مشاهده شده WQI در دوره آماری ۹۴-۷۴ در دوره کم آبی (اردیبهشت)



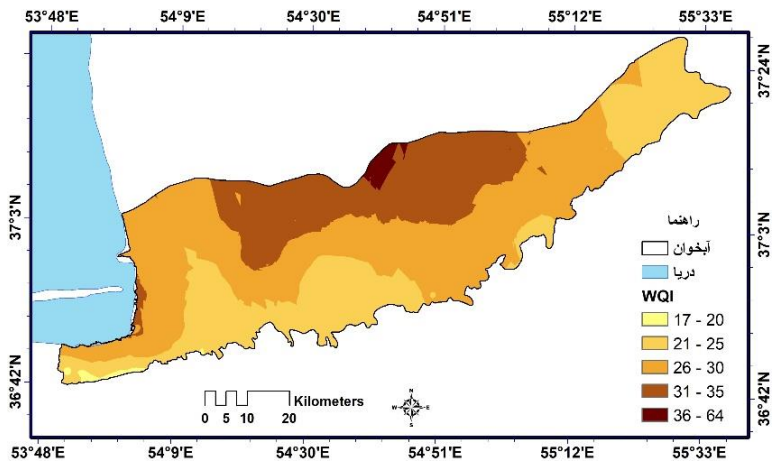
شکل ۸. بیشترین مقدار مشاهده شده WQI در دوره آماری ۷۴-۹۴ در دوره کم آبی (اردیبهشت)

کند. در برخی از سالها سواحل شرقی دریای خزر و قسمتی از شمال منطقه مطالعاتی در محدوده کیفی بد و خیلی بد قرار می گیرند ولی مابقی منطقه در محدوده کیفی خوب و بسیار خوب قرار می گیرند.

در بررسی تغییرات WQI طی دوره مطالعاتی در دوره کم آبی (اردیبهشت ماه)، نقشه بیشترین و کمترین مقدار WQI مشاهده شده ترسیم شدند (شکل های ۷ و ۸) و نشان دادند در منطقه مطالعاتی در بدترین سالها، WQI از ۱۰۰ تجاوز نمی-



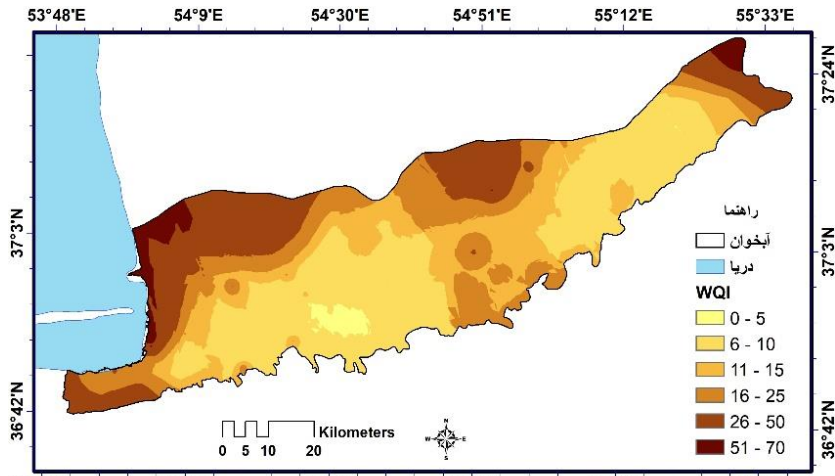
شکل ۹. بیشترین مقدار مشاهده شده در دوره آماری ۷۴-۹۴ در دوره پر آبی (آبان)



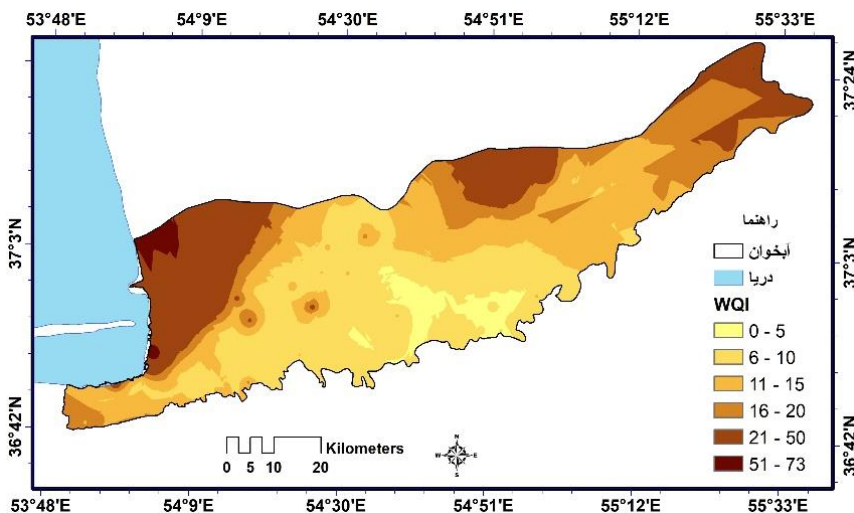
شکل ۱۰. کمترین مقدار مشاهده شده WQI در دوره آماری ۷۴-۹۴ در دوره پر آبی (آبان)

شرقی دریای خزر و قسمتی از شمال منطقه مطالعاتی در محدوده کیفی بد و خیلی بد قرار می‌گیرند و مابقی نقاط در محدوده کیفی خوب و بسیار خوب قرار می‌گیرند.

نقشه‌های بیشترین و کمترین مقدار WQI مشاهده شده در طی دوره مطالعاتی در دوره پر آبی (آبان ماه) ترسیم شدند (شکل‌های ۹ و ۱۰). نتایج نشان داد، در بدترین سال‌ها بیشترین مقدار WQI از ۱۱۰ تجاوز نکرده و در برخی از سال‌ها سواحل



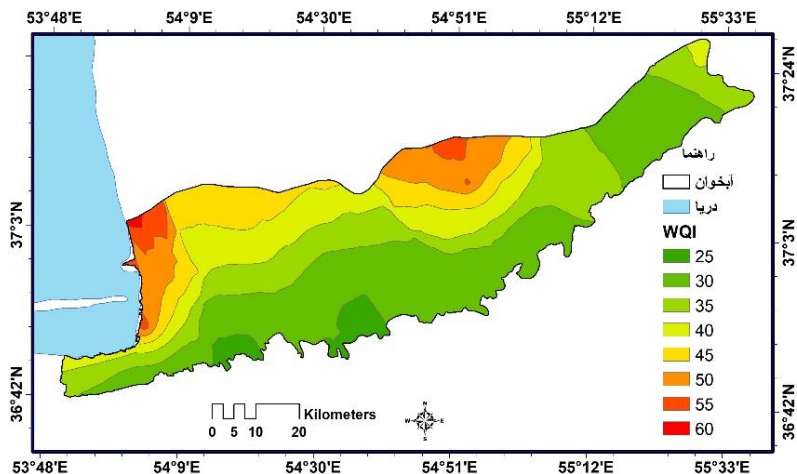
شکل ۱۱. دامنه تغییرات WQI مشاهده شده در دوره آماری ۹۴-۷۴ در دوره کم آبی (اردیبهشت)



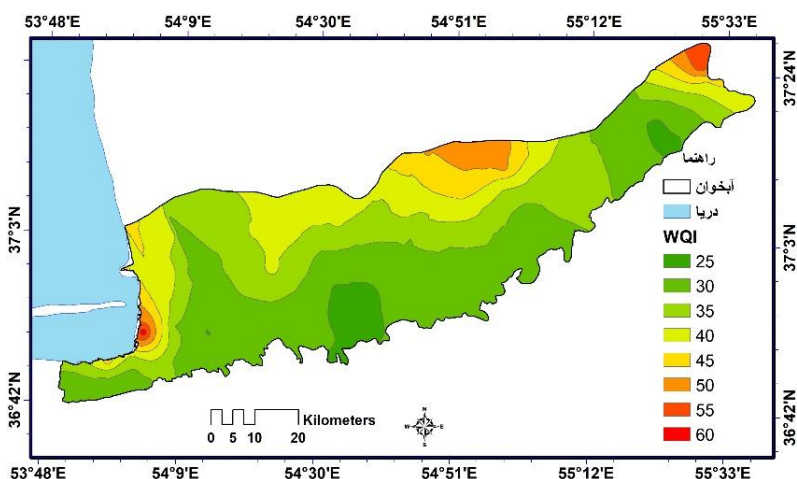
شکل ۱۲. دامنه تغییرات WQI مشاهده شده در دوره آماری ۹۴-۷۴ در دوره پر آبی (آبان)

بررسی تغییرات دوره‌ای: نقشه‌ها برای دو دوره از سال ۷۴ تا ۸۴ و ۸۵ تا ۹۴ بر اساس روش آماره‌های سلولی در محیط GIS، پارامتر آماری میانگین ترسیم شدند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). نتایج بررسی تغییرات زمانی WQI طی دوره زمانی ۹۴-۷۴ نشان داد که میانگین WQI در دوره دوم (۸۵-۹۴) نسبت به دوره اول (۷۴-۸۴) تغییرات چشمگیری نداشته و کیفیت، با توجه به پارامترهای بررسی شده کاهش پیدا نکرده است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

در بررسی تغییرات WQI طی دوره مطالعاتی، نقشه دامنه تغییرات در دوره کم آبی و همچنین دوره پر آبی ترسیم شدند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). نتایج نشان داد که سواحل شرقی دریای خزر و قسمتی از شمال منطقه مطالعاتی دارای بیشترین تغییرات می‌باشند و در قسمت‌های شمالی منطقه مطالعاتی هر چه به سمت حوضه‌های پایین‌تر (شمالی‌تر) و سمت دریا نزدیک می‌شویم، مقدار WQI بیشتر شده و از کیفیت آب کاسته می‌شود.



شکل ۱۳. میانگین شاخص WQI در دوره آماری ۷۴-۸۴



شکل ۱۴. میانگین شاخص WQI در دوره آماری ۸۵-۹۴

می‌دهد که میانگین WQI در نیمه اول سری با نیمه دوم سری زمانی داده‌ها اختلاف قابل توجهی ندارند.

قسمت اعظم آبخوان مورد مطالعه از لحاظ WQI، وضعیت بسیار خوب و خوب را دارند. فقط بخش کوچکی از این آبخوان که به سواحل شرقی دریای خزر و شمال منطقه مطالعاتی منتهی می‌شوند، به دلیل شوری آب و خاک و بالا بودن جامدات محلول در این مناطق، مقادیر WQI آن‌ها در طبقه بد قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری:

مهم‌ترین نتایجی که در بررسی WQI در حوضه گرگانرود بدست آمد عبارتند از:

روش بیزین کریجینگ، روش مناسبی برای درون‌یابی WQI می‌باشد.

طی دوره کم‌آبی، پارامترهای کیفی که در اردیبهشت ماه انجام می‌شود با دوره پرآبی که در آبان ماه اندازه‌گیری می‌شود، اختلاف زیادی در مقادیر WQI دیده نمی‌شود.

تغییرات زمانی WQI طی دوره زمانی ۷۴ تا ۹۴ نشان

REFERENCES:

Al-Hadithi, M. (2012). Application of water quality index to assess suitability of groundwater quality for drinking purposes in Ratmao-Pathri Rao watershed, Haridwar district, India. American journal of scientific and industrial research. DOI:10.5251/ajsir.

Ashayeri, A., Karbasi, A. and Baghvand, A. (2014). Assessing Darreh-rood river water quality for irrigation using sustainable conservation

approach and CCME-WQI model. ISSN 2251-7480,3(4):51-61. (In Farsi)

Bahrami Jovein, E. and Hosseini, S.M. (2015). A systematic comparison of Geostatistical methods for estimation of groundwater salinity in Desert areas. Case study: Feyz Abad Mahvelat plain. Iran-water Resources,11(2):1-15. (In Farsi)

Bharti, N., Katyal, D. (2011). Water quality indices used for surface water Vulnerability

- assessment. International journal of environmental sciences, 2(1).
- Bora, M. and Goswami, D.C. (2016). water quality assessment in terms of warwe quality index(WQI): Case study of the Kolong river, Assam, India. Appl water Sci. DOI:10.1007/s13201-016-0451-y.
- Chatterjee, R., Tarafder, G. and Paul, S. (2010). Groundwater quality assessment of Dhanbad district Jharkhand, India. Bull Eng Geol Environ, 69:137-141.
- Fathi, P., Ebrahimi, E. and Mirghafari, N. (2016). The study and temporal changes of water quality in choghakhor wetland using water quality index(WQI). Journal of Aquatic Ecology, 5(3):41-50. (In Farsi)
- Ghorbani, Kh. (2012). Geographically weighted regression: A method for mapping isohyets in Gilan province. Journal of water and soil, 26(3):743-752. (In Farsi)
- Javid, A.H., Mirbagheri, S.A. and Karimian, A. (2014). Assessing Dez Dam reservoir water quality by application of WQI and TSI indices. Iran.J.Health and Environ, 7(2):133-142. (In Farsi)
- Ishaku. J.M. (2011). Assessment of groundwater quality index for Jimeta-Yola area, Northeastern Nigeria. Journal of geology and mining research vol.3(9), pp.219-231.
- Yisa. J. and T. Jimoh(2010). Analytical studies on water quality index of river Landzu. American journal of applied sciences, 7(4):453-458.
- Kalpana, G.R., Nagarajappa, D.P., Sham Sunder, K.M. and Suresh, B. (2014). Determination of Groundwater Quality Index in Vidyanagar, Davanagere city, Karnataka State, India. International Journal of Engineering and Innovative Technology(IJEIT), 3(12).
- Ketata Rokbani, M., Gueddari, M. and Bouhlila, R. (2013). Use of Geographical Information System and Water Quality Index to Assess Groundwater Quality in Ei Khairat Deep Aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel). Iranica Journal of Energy and Environment, 2(2):133-144.
- Kumar Tiwari, A., Kumar Singh, P. and Kumar-Mahato, M. (2014). GIS-based of evaluation of warwe quality index of groundwater resources in West Bokaro Coalfield, India. Current world environment, 9(3):843-850.
- Poonam, T., Tanushree, B. and Sukalyan, Ch. (2013). Water quality indices-Important tools for water quality assessment: A Review. International journal of Advanus in cheistry, 1(1).
- Ramakrishnaiah, C.R., Sadashivaiah, C. and Ranganna, G. (2009). Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka, India. CODEN ECJHAO E-Journal of chemistry, 6(2):523-530.
- Rupal, M., Tanushree, B. and Sukalyan, Ch. (2012). Quality characterization of groundwater using water quality index in Surat city, Gujarat, India. International Research Journal of Environment Sciences, 1(4):14-23
- Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K. and Liaghat, A.M. (2013). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. Environ Earth Sci. Doi:10/1007/s12665-013-2770-80.
- Sahu, P. and Sikdar, O.K. (2007). Hydrochemical frame work of the aquifer in and around East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. Environ Geol, 55:823-835. Doi:10.1007/s00254-007-1034-x.
- Subbiah, K., Magesh, N.S., Samuel Godson, P. and Chandrasekar, N. (2015). Hydro-geochemistry and application of water quality in index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai city, Tamil Nadu, India. Appl water Sci, Doi:10.1007/s13201-014-0196-4.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Ganthi, R., Chidambaran, S., Anadhan, P., Manivannan, R. and Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar Sub-basin, Tamilnadu, India. Environ Monit Assess, 171:595-609. Doi:10/1007/s10661-009-1302-1.
- WHO (2004). Guidelines for drinking water quality: training pack. WHO, geneva, Switzerland.