



Aquifers Sustainability Assessment by Integrated Groundwater Footprint Indicator (Case Study: East Azerbaijan Province)

T. Mahdavi¹ and S.A. Hosseini^{2*}

Abstract

In arid and semi-arid regions with limited surface water resources, the growth of different economic and social sectors requires sustainable management of existing water resources, especially groundwater resources. The Groundwater Footprint Indicator is a useful tool for assessing the sustainable use of groundwater resources and its associated ecosystem services. In this study, the sustainable use of 27 alluvial aquifers in the east of Urmia Lake at northwest of Iran has been investigated by groundwater footprint indicator. In order to integrate quantitative assessment along with the sustainability of water quality for agricultural use, an integrated groundwater footprint indicator based on GIS spatial analysis has been used for assessment. This assessment will assist water sector managers in adopting appropriate policies and measures for the sustainable management of the aquifer system, especially for the Urmia Lake basin, which has faced salting water problems in the adjacent aquifers. The results show that 20 alluvial aquifers have a GF/A greater than 1 and 7 alluvial aquifers have a GF/A equal 1 and no alluvial aquifers have sustainable use of groundwater resources. Also, 24 alluvial aquifers have iGF/A greater than one and only three alluvial aquifers have iGF/A equal one, indicating that most aquifers are contaminated by saline water intrusion and excessive aquifer withdrawal. As a result of the scenario of a 10% reduction in agricultural consumption, the 14 aquifers shift to a quantity sustainable use state. This scenario also contributes to the improvement of the iGF indicator and shifts the 10 aquifers to a quality sustainable state.

Keywords: Integrated Assessment, Sustainability of Aquifers, Groundwater Footprint Indicator, Spatial Analysis.

Received: October 15, 2019

Accepted: January 21, 2020

ارزیابی پایداری آبخوان‌ها با شاخص رد پای آب زیرزمینی (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)

تقی مهدوی^۱ و سیدعباس حسینی^{۲*}

چکیده

در مناطق خشک و نیمه خشک "با منابع آب سطحی محدود" رشد بخش‌های مختلف نیازمند مدیریت پایدار منابع آب موجود بخصوص منبع آب زیرزمینی است. شاخص رد پای آب زیرزمینی ابزار مفیدی جهت ارزیابی استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی و خدمات اکوسیستم وابسته به آن است. در این تحقیق، پایداری ۲۷ آبخوان آبرفتی در شرق دریاچه ارومیه شمال غرب ایران توسط نشانگر رد پای آب زیرزمینی بررسی شده است. به منظور ارزیابی یکپارچه کمیت به همراه پایداری کیفیت آب در آبخوان‌ها جهت استفاده کشاورزی، شاخص رد پای یکپارچه آب زیرزمینی بر مبنای تحلیل مکانی GIS جهت ارزیابی استفاده شده است. این ارزیابی به مدیران بخش آب در اتخاذ سیاست‌ها و اقدامات مناسب جهت مدیریت پایدار سیستم آبخوان‌ها خصوصاً برای دریاچه ارومیه که با مشکل شور شدن آب در آبخوان‌های مجاور مواجه گردیده کمک شایانی می‌نماید. در این تحقیق شاخص‌های GF/A، iGF/A، بیانگر پایداری کمی و کیفی آب زیرزمینی اسفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد ۲۰ آبخوان آبرفتی از ۲۷ آبخوان آبرفتی منطقه دارای GF/A بزرگ‌تر از یک و ۷ آبخوان آبرفتی دارای GF/A برابر ۱ است و هیچ آبخوان آبرفتی حالت استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی ندارد. همچنین ۲۴ آبخوان آبرفتی از ۲۷ آبخوان آبرفتی استان دارای iGF/A بزرگ‌تر از یک می‌باشند و تنها سه آبخوان آبرفتی iGF/A برابر واحد دارد که نشان‌دهنده آلودگی اکثر آبخوان‌ها در اثر شوری ناشی از نفوذ آب شور دریا و برداشت بی‌رویه از آبخوان و افت کیفی آبخوان دارد. با اجرای سناریو ۱۰ درصد کاهش مصرف کشاورزی، ۱۴ آبخوان به لحاظ پایداری کمی به حالت پایدار، تغییر وضعیت می‌دهد این سناریو به بهبود شاخص iGF هم کمک کرده و ۱۰ آبخوان به حالت پایدار تغییر وضعیت می‌دهد.

کلمات کلیدی: ارزیابی یکپارچه، پایداری آبخوان‌ها، شاخص رد پای آب زیرزمینی، تحلیل مکانی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۱

1- Academic Member, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

2- Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email: abbas_hosseini@srbiau.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- عضو هیئت علمی گروه عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران.

۲- استادیار گروه عمران- آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

حال حاضر بر کیفیت آب به‌ویژه نفوذ آب‌شور در آبخوان‌های مرکزی و ساحلی تأثیر گذاشته است. در برخی مناطق، EC آب زیرزمینی از ۴۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ میکروموهوس بر سانتیمتر افزایش یافته است (FAO, 2009). بر اساس آمار برداشت از منابع آب زیرزمینی مندرج در شکل ۱، از دهه ۱۹۶۰ افزایش مداوم تعداد چاه‌های آبیاری و مقدار پمپاژ از آن‌ها منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از آبخوان‌ها در سراسر ایران شده است. بر اساس نتایج مطالعات به هنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی شرق دریاچه ارومیه مقدار شوری آب‌های زیرزمینی در فاصله زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۶ در برخی محدوده‌ها تا ۲ و ۳ برابر افزایش یافته است.

اولویت اصلی هر سیستم مدیریت منابع، مدیریت پایدار منابع هست. (2007) Mays پایداری منابع آب را به‌عنوان «توانایی استفاده از آب در مقادیر و کیفیت کافی از مقیاس محلی تا جهانی برای پاسخگویی به نیازهای انسان‌ها و اکوسیستم‌ها در حال حاضر و آینده برای حفظ زندگی و همچنین محافظت از انسان در برابر خسارت‌های ناشی از بلایای طبیعی و انسانی و حفظ زندگی پایدار» تعریف کرد. آب بسیاری از جنبه‌های وجود ما را تحت تأثیر قرار می‌دهد، جنبه‌های بسیاری وجود دارد که باید در پایداری منابع آب موردتوجه قرار گیرند. (2007) Unver اظهار داشت که «توسعه پایدار مفهومی است که هنوز در حال شکل‌گیری است.» وی یک رویکرد توسعه یکپارچه مبتنی بر توسعه پایدار منابع آب در مقیاس منطقه‌ای یا توسعه یکپارچه پایدار منطقه‌ای مبتنی بر آب (WSIRD) ارائه کرد.

آب‌های زیرزمینی منبع حیاتی مهم برای تولید محصولات کشاورزی، حفظ اکوسیستم‌ها، تأمین نیاز آب شرب و خدمات و صنعت هست. آب‌های زیرزمینی تشکیل‌دهنده بیش از ۹۵ درصد از ذخایر آب شیرین موجود جهان است و تأمین نیاز آب شرب و بهداشت بیش از ۱/۵ میلیارد ساکن شهری از محل آب زیرزمینی نشان از اهمیت ویژه آب زیرزمینی است (Howard, 2015). استفاده بدون برنامه‌ریزی و کنترل نشده از آب‌های زیرزمینی در بسیاری از کشورها تا حدودی به دلیل ماهیت غیرمتمرکز آن رخ داده است و به مشکلات جدی آبخوان شامل پایین افتادن تراز آب زیرزمینی و کاهش کیفیت منجر شده است.

کشور ایران با قرار گرفتن در ناحیه خشک و نیمه‌خشک در چند سال اخیر با بحران جدی آب مواجه گردیده است. بر اساس محاسبات بانک اطلاعاتی سرانه منابع آب تجدیدپذیر ایران برابر ۱۶۸۸ مترمکعب و ۲۵ درصد میانگین جهانی هست (FAO AQUASTAT, 2017). این در حالی است که بیش از ۹۰ درصد مصرف آب در ایران، توسط بخش کشاورزی استفاده می‌شود و نیاز آبی ۶۲ درصد از اراضی آبی در ایران از محل آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود که دارای راندمان آبیاری کمتر از ۳۰ درصد است. دوره‌های خشک‌سالی نیز بر توسعه استفاده از آب‌های زیرزمینی تأثیرگذار بوده است. تحلیل داده‌های طولانی‌مدت ایران نشان می‌دهد که دوره‌های خشک‌سالی ۶-۵ ساله با تناوب هر ۱۰ سال اتفاق می‌افتد. بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی در

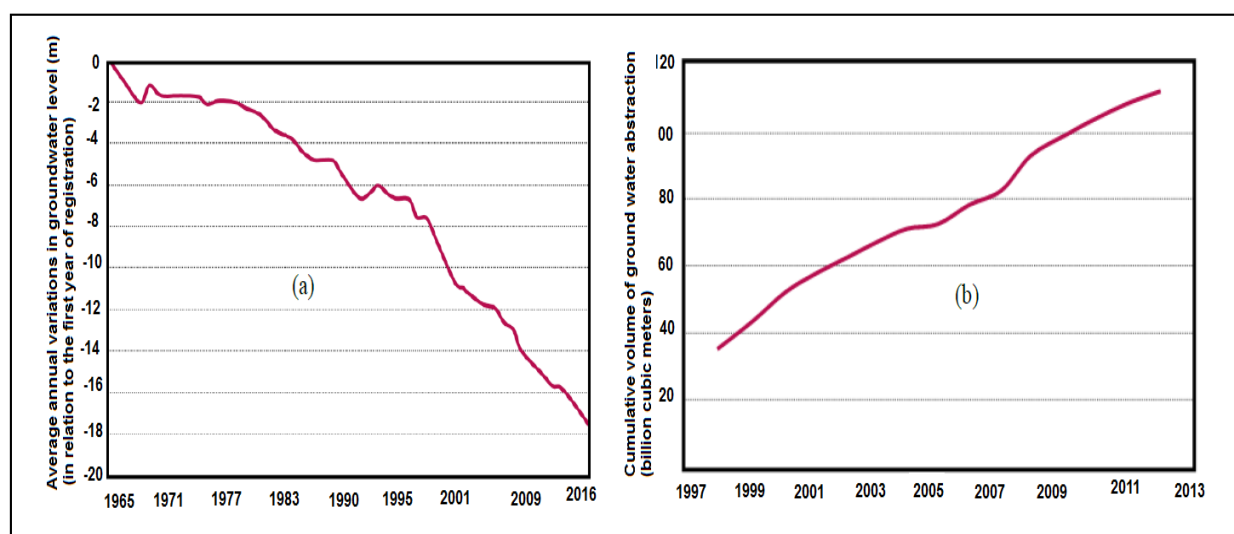


Fig. 1- a- Groundwater level b- Cumulative volume of groundwater abstraction in Iranian aquifers (Iranian Water Resources Management Organization, 2014)

شکل ۱- ا- افت تراز آب زیرزمینی b-جم تجمعی برداشت از آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های ایران (سازمان مدیریت منابع آب ایران، ۲۰۱۴)

مباحث اضافی در مورد پایداری مربوط به آب را می‌توان در انجمن مهندسان عمران آمریکا (Loucks et al. (1998, 2000)، (1997) Loucks، (2002) Howard، (1987) Bruntland و (2007) Mays یافت.

در دهه اخیر جامعه علمی به منظور ارزیابی و شناسایی تهدیدات و مشکلات بالقوه منابع در دسترس، شاخص‌های مختلفی نظیر شاخص رد پای اکولوژیکی (دارایی‌های زیست‌محیطی از قبیل مواد غذایی، محصولات گیاهی، محصولات دامی، محصولات جنگلی و فضای زیرساختی شهری و فضای مورد نیاز برای دفع زباله و انتشار کربن و در نهایت جمعیت مورد نیاز برای تولید منابع طبیعی مصرفی) (Hoekstra, 2009) و شاخص رد پای آب محصول (حجم آب مصرفی و آلودگی در تمام مراحل تولید) (Hoekstra and Chapagain, 2007) ارائه کرده‌اند.

در بحث پایداری منابع آب زیرزمینی بسته به نتیجه برداشت زیاد آب زیرزمینی که منجر به هزینه‌های زیاد پمپاژ و خسارت‌های زیست‌محیطی می‌شود، اینکه آبخوان با وضعیت غیرقابل برگشت و دائمی یا قابل برگشت و موقت مواجه شود تعبیرهای مختلفی دارد (Custodio, 2002; Hiscock et al., 2002; Llamas et al., 2006).

شاخص جدیدی که برای مطالعه پایداری، آسیب‌پذیری و تنش آبخوان‌ها استفاده می‌شود، مفهوم ردپای آب زیرزمینی (GF) (مساحت مورد نیاز برای حفظ بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی و خدمات اکوسیستم وابسته به آب‌های زیرزمینی) است (Gleeson et al., 2012). ردپای آب‌های زیرزمینی سعی در آشکار ساختن استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی یا استفاده پایدار در یک منطقه دارد. ردپای آب زیرزمینی مقایسه می‌کند که چه مقدار آب به سفره‌های آب زیرزمینی وارد می‌شود، چه مقدار آب زیرزمینی توسط انسان استفاده می‌شود و چه مقدار باید برای اکوسیستم‌ها باقی بماند همچنین این شاخص به تغذیه مجدد به‌عنوان شاخص پایداری توجه دارد. این شاخص می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید مدیریت آب زیرزمینی برای حفظ تعادل آن در مقیاس‌های مختلف بکار گرفته شود.

به‌منظور ارتقاء روش‌شناسی ردپای آب زیرزمینی به یک ابزار تصمیم‌گیری جامع برای مدیریت منابع آب، نقش حیاتی کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. به همین منظور Kourgialas et al. (2018) شاخص دیگری بنام ردپای یکپارچه آب زیرزمینی با ترکیب شاخص ردپای آب زیرزمینی با ترم‌های بیانگر

کیفیت آب زیرزمینی را ارائه نمودند. ترم‌های کیفیت مورد انتخاب، با توجه به مصرف غالب آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه آن‌ها که در بخش شرب و خدمات توریستی بوده، نیترات و سولفات و کلر با حدود مجاز پیشنهادی سازمان بهداشت جهانی بوده است. Gleeson and Wada (2013) با جمع‌آوری مقادیر R؛ E و C بر روی آبخوان‌های هند و ایالات‌متحده با استفاده از مطالعات قبلی و با تحلیل عدم قطعیت، درصد مساحت و جمعیت تحت تنش آب‌های زیرزمینی هر دو کشور را تعیین کردند.

(Pérez et al. (2019) با تخمین مقدار برداشت از طریق مصاحبه و محاسبه مقدار تغذیه از بیلان آب در هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی نهایتاً مقدار رد پای آب زیرزمینی را در سیستم آبخوان‌های بخش ساکر (Sucre) شمال کشور کلمبیا را برآورد کردند. Gleeson et al. (2012) با بکارگیری مدل هیدرولوژیکی جهانی شاخص مقدار رد پای آب زیرزمینی را برای آبخوان‌های مهم و بزرگ دنیا محاسبه کردند. Esnault et al. (2014) شاخص رد پای آب زیرزمینی محصولات کشاورزی را در دو سیستم آبخوان Central Valley and High Plain ارائه نمودند.

در این مقاله روش‌شناسی ارائه شده توسط Kourgialas et al. (2018) جهت ارزیابی یکپارچه کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی در سیستم آبخوان‌های آبرفتی واقع در شمال غرب ایران و شرق دریاچه ارومیه بکار گرفته شده است. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه منبع اصلی تأمین آب شرب، آب‌های سطحی بوده و استفاده غالب آب زیرزمینی در بخش کشاورزی هست، شاخص‌های کیفی شوری و میزان سدیم موجود در آب زیرزمینی با مقادیر مجاز معرفی شده در نمودار (US Salinity Laboratory Staff, 1954) مورد استفاده قرار گرفته به‌نحوی که بتوان نواحی و اراضی نامناسب جهت کشاورزی را بر اساس شاخص iGF شناسایی نمود. محاسبه شاخص iGF بر پایه نمودار (USSLS, 1954) از نوآوری این تحقیق می‌باشد.

۲- روش‌شناسی تحقیق

ردپای آب زیرزمینی می‌تواند به‌عنوان پهنه مورد نیاز برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی و خدمات اکوسیستم وابسته به آن در یک منطقه مورد علاقه مانند آبخوان تعریف شود. Gleeson et al. (2012) ردپای آب زیرزمینی را صورت زیر تعریف کردند:

$$GF = A[C/(R-E)] \quad (1)$$

که در آن C برداشت سالانه از آب‌های زیرزمینی، R مقدار تغذیه و E زهکشی آب زیرزمینی به رودخانه است که در جریان زیست محیطی

رودخانه نقش دارد و در شرایط جریان کم بسیار اهمیت دارد. بنابر پیشنهاد Smakhtin et al. (2004) زهکشی آب زیرزمینی به رودخانه (E) برابر با Q_{90} جریان ماهانه (بیش از ۹۰ درصد از زمان در طول دوره آماری ماهانه، دبی از این مقدار بیشتر است) گرفته می‌شود. در این تحقیق از معادله بیلان، با توجه به در دست داشتن همه اجزای آن، غیر از E استفاده شده است.

دیمانسیون سه پارامتر C, E, R در رابطه (۱) L/T و A مساحت آبخوان مورد مطالعه با دیمانسیون L^2 بوده که در آن مساحت، مقادیر C, E, R محاسبه شده است. در صورت عدم وجود زهکشی آب زیرزمینی به رودخانه، در معادله (۱) از ترم زهکشی آب زیرزمینی به رودخانه صرف نظر خواهد شد که در این صورت GF نشان‌دهنده وضعیت جریان آب ورودی به آبخوان (R) و جریان آب خروجی از آبخوان یا همان برداشت (C) خواهد بود.

مقدار سالانه برداشت از آب‌های زیرزمینی C می‌تواند از طریق داده‌های ثبت شده از برداشت آب از آبخوان، مصاحبه با مصرف‌کنندگان و محاسبه کمبود آب سطحی محلی برآورد شود. مقدار تغذیه R می‌تواند از طریق روش‌های بیلان آب، روش‌های ردیابی ژئوشیمیایی، مدل‌های هیدرولوژیکی جهانی و محلی و ضریب نفوذ باران برای هر سیستم آبخوان برآورد شود. مشارکت آب‌های زیرزمینی در جریان زیست‌محیطی رودخانه‌ای E می‌تواند از طریق داده‌های دقیق هیدرواکولوژیکی و مشاوره با متخصصین چند رشته‌ای (به دلیل تأثیر جریان زیست‌محیطی رودخانه در مسایل مختلف زیستی و جانوری و اجتماعی و اقتصادی و محیطی)، مطالعات هیدروژئولوژیکی، نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی و در صورت کمبود داده‌ها از قضاوت کارشناسی و یا به صورت کسری از R برآورد شود (Richter et al., 2012; Voudouris et al., 2007; Gleeson et al., 2012; McMahon et al., 2011; Wada et al., 2012; Kourgialas and Karatzas, 2015).

نسبت ردپای آب‌های زیرزمینی به مساحت منطقه آبخوان GF/A به‌عنوان شاخص تنش آب زیرزمینی تعریف شده و اگر:
 $GF/A > 1$ - نشان می‌دهد که مصرف آب زیرزمینی ناپایدار است که می‌تواند بر دسترسی آب زیرزمینی تأثیر بگذارد.
 $GF/A >> 1$ - نشان می‌دهد که معدن آب زیرزمینی بسیار ناپایدار است و اغلب تحت شرایط اقلیمی گذشته تغذیه شده است.
 $GF/A < 1$ - نسبت نشان‌دهنده استخراج پایدار از آب‌های زیرزمینی است.

گزارش‌های مهمی با به‌کارگیری شاخص رد پای آب زیرزمینی در بررسی پایداری استفاده از منابع آب زیرزمینی گزارش شده است. Gleeson et al. (2012) با به‌کارگیری مدل هیدرولوژیکی جهانی مبتنی بر فرایند مفهومی بنام PCR-GLOBWB مقادیر R و E را برآورد و با داده‌های ماهواره‌ای اعتبارسنجی کردند و سپس با استفاده از روش‌شناسی پیشنهادی Wada et al. (2012) به برآورد مقدار برداشت C و مقایسه آن با مقادیر گزارش شده کشورها پرداختند و در نهایت مقدار رد پای آب زیرزمینی را برای آبخوان‌های مهم و بزرگ دنیا محاسبه کردند و به این نتیجه رسیدند که $1/7 \pm 0/4$ میلیارد نفر در مناطقی با $GF/A > 1$ زندگی می‌کنند که ۶۰ درصد آن‌ها در هند و چین زندگی می‌کنند همچنین ۸۰ درصد از آبخوان‌های دنیا دارای ردپای آب‌های زیرزمینی کمتر از مساحت آن‌ها است.

Esnault et al. (2014) شاخص رد پای آب زیرزمینی محصولات کشاورزی را در دو سیستم آبخوان Central Valley and High Plain ارائه نموده و به بررسی تأثیر محصولات کشاورزی شامل ذرت بر منابع آب‌های زیرزمینی پرداختند.

به‌منظور ارتقاء روش‌شناسی ردپای آب زیرزمینی به یک ابزار تصمیم‌گیری در خصوص کیفیت آب‌های زیرزمینی Kourgialas et al. (2018) بر اساس قضاوت مهندسی شاخص ردپای یکپارچه آب زیرزمینی یکپارچه مطابق رابطه (۲) ارائه کردند:

$$iGF = GF * \left(1 + n \left[CF_1 * \frac{A_1}{A} + \dots + CF_j * \frac{A_j}{A} \right] \right) \quad (2)$$

که در آن، iGF: ردپای یکپارچه آب زیرزمینی با دیمانسیون L^2 : تعداد آلاینده‌ها در سیستم آب زیرزمینی، CF_j : عامل آلودگی برای انواع آلودگی خاص (j=1, 2, ..., n) در سیستم آب زیرزمینی هست. اگر غلظت یک آلاینده خاص (j) بالاتر از یک آستانه مشخص باشد (بر اساس استانداردهای مرجع به‌عنوان حداکثر غلظت مجاز آلودگی در آب بر اساس نوع مصرف)، CF_j برابر با ۱ (فعال)، در غیر این صورت به‌عنوان صفر (غیرفعال) خواهد بود.

A_j (j=1, 2, ..., n): میزان مساحت آلودگی با دیمانسیون L^2 جایی که غلظت آلودگی (j) بالاتر از آستانه تعریف شده است. A نیز مساحت کل آبخوان با دیمانسیون L^2 هست.

براساس معادله (۲)، هرچه مقدار مساحت آلوده شده و تعداد آلاینده‌ها موجود، بزرگ‌تر باشد شاخص ردپای یکپارچه آب زیرزمینی iGF بزرگ‌تر خواهد بود. مقدار نسبت iGF/A بیش از ۱ نشان‌دهنده شواهدی از آلودگی است. اگر مقدار iGF/A بسیار بزرگ‌تر از ۱ باشد

بیانگر آلودگی قابل توجه آبخوان هست، درحالی که مقدار iGF/A کمتر از ۱ نشان می‌دهد که آب زیرزمینی دارای کیفیت خوب است.

مرتب نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی از آب زیرزمینی صورت می‌گیرد در تهیه نقشه‌های رستر از این داده‌ها استفاده شده است.

در این تحقیق با توجه به نفوذ آب شور دریاچه ارومیه بر آبخوان‌های مجاور و تأثیر آن بر کیفیت آب جهت مصارف کشاورزی و با توجه به اهمیت کیفیت آب جهت مصرف کشاورزی از رابطه (۲) استفاده شده و ردیابی یکپارچه آب زیرزمینی محاسبه و مورد ارزیابی قرار است. در این تحقیق مبنای کیفیت مناسب آب جهت کشاورزی بر اساس نمودار (US Salinity Laboratory Staff (1954) برای طبقه‌بندی آب بر اساس شوری و سدیم به‌عنوان تنها معیار آلودگی در نظر گرفته شده است. بر اساس این نمودار آب مصرفی در کشاورزی به سه گروه آب‌های خوب (رده‌های $C1S1, C1S2, C2S1, C2S2$) و آب‌های با کیفیت متوسط (رده‌های $C1S3, C2S3, C3S3, C3S2$) و آب‌های نامناسب (رده‌های $C1S4, C2S4, C3S4$) و آب‌های نامناسب (رده‌های $C4S4, C4S3, C4S2, C4S1$) تقسیم می‌شوند. لذا جهت برآورد مساحتی از آبخوان دارای آب‌های نامناسب جهت کشاورزی در محاسبه شاخص رد پای یکپارچه آب زیرزمینی ابتدا نقشه‌های رستری EC و SAR با روش‌های درون‌یابی تولید شد. در محدوده مورد مطالعه به تعداد کافی چاه‌های با موقعیت مناسب در دشت و آبخوان‌های آبرفتی مشخص و تعیین شده که هر سال در دو نوبت و در زمان‌های تراز ماکزیمم و مینیمم آب زیرزمینی (آخر شهریور و اول خرداد) به صورت

سپس جهت پیاده‌سازی دیگرام $USSLS$ به صورت مکانی در سطح آبخوان‌های آبرفتی محاسبات با توابع شرطی توسط ابزار تحلیل مکانی $Map Algebra$ در نرم‌افزار $Arc map$ صورت گرفته است. مراحل انجام کار در فلوجارت شکل ۲ نشان داده شده است.

۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران حدفاصل طول جغرافیایی ۴۵ تا ۴۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ تا ۳۹ درجه شمالی و در شرق دریاچه ارومیه قرار گرفته است. حوضه دریاچه یکی از ارزشمندترین اکوسیستم‌های آبی و ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره تحت نظر یونسکو ایران است. دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر با افت تراز و سطح دریاچه مواجه گردیده و بحران‌های زیست‌محیطی جدی برای آن ایجاد شده است. به طوری که کاهش سطح دریاچه باعث افزایش غلظت گردوغبار و در نتیجه سبب ایجاد مشکلات بهداشتی تنفسی برای مردم منطقه شده و در آینده نزدیک سبب چالش‌های کشاورزی خواهد شد (Zagharmi et al., 2015).

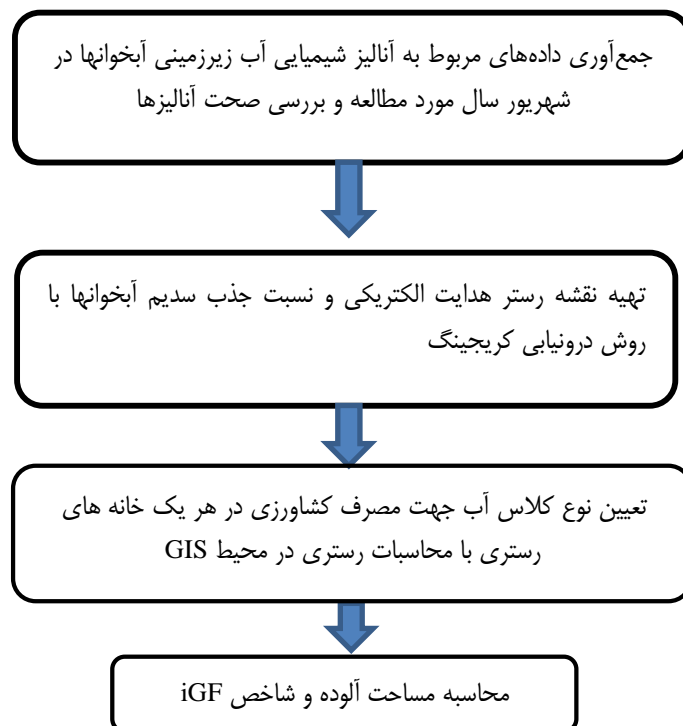


Fig. 2- Flowchart steps

شکل ۲- فلوجارت مراحل انجام کار

تحقیقات منابع آب ایران، سال پانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸
Volume 15, No. 4, Winter 2020 (IR-WRR)

منطقه ۲ میلیارد و ۳۰۰ میلیون مترمکعب است. بیشترین مصرف آن با ۸۷ درصد به بخش کشاورزی و کمترین آن ۲ درصد به صنعت اختصاص دارد. کسری مخازن آب‌های زیرزمینی منطقه ۱ میلیارد و ۲۰۰ میلیون مترمکعب است که نشان‌دهنده برداشت بیش از مقدار مجاز است و ۴۰۰ میلیون مترمکعب حجم برداشت غیرمجاز از چاه‌های غیرمجاز دارد. ۲۷ آبخوان آبرفتی در منطقه مورد مطالعه قرار دارد که موقعیت آن‌ها در شکل ۳ و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است (EARWC, 2018).

بر اساس نتایج بیلان آبخوان‌های مرنده، شبستر صوفیان و تسوج به ترتیب بیشترین کسری مخزن در منطقه مورد مطالعه را دارند (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۲۰۱۴). شکل ۴ آب‌نمود آبخوان آبرفتی تسوج را نشان می‌دهد. آبخوان‌های شبستر و صوفیان هم روند مشابهی دارند.

پراکنده شدن ذرات نمک نواحی خشک‌شده دریاچه در اراضی اطراف سبب توسعه شوری در منابع خاک و آب منطقه شده به طوری که در فاصله زمانی ۲۰ ساله، شوری برخی آبخوان‌ها تا سه برابر زیاد شده است. به دلیل تأثیرات متقابل دریاچه ارومیه و منطقه مورد مطالعه اهمیت بررسی شاخص‌های توسعه پایدار نمود بیشتری پیدا می‌کند.

سرانه آب قابل‌دسترس سالانه منطقه ۱۲۵۰ مترمکعب و معادل ۱۷ درصد میانگین جهانی است که خود نشان از شرایط بحرانی آب در این منطقه دارد. سرانه مصرف آب در منطقه مورد مطالعه ۸۰۰ مترمکعب برای هر نفر و میزان مصرف از منابع آب موجود در شرایط طبیعی ۲ میلیارد و ۸۰۵ میلیون مترمکعب است که ۵۶ درصد آن از محل آب زیرزمینی است در حالی که میزان آب تجدیدپذیر منطقه حدود سه میلیارد و ۲۰۰ میلیون مترمکعب است یعنی بیش از ۸۰ درصد از آب تجدیدپذیر منطقه مصرف می‌شود. میزان آب قابل‌برنامه‌ریزی در

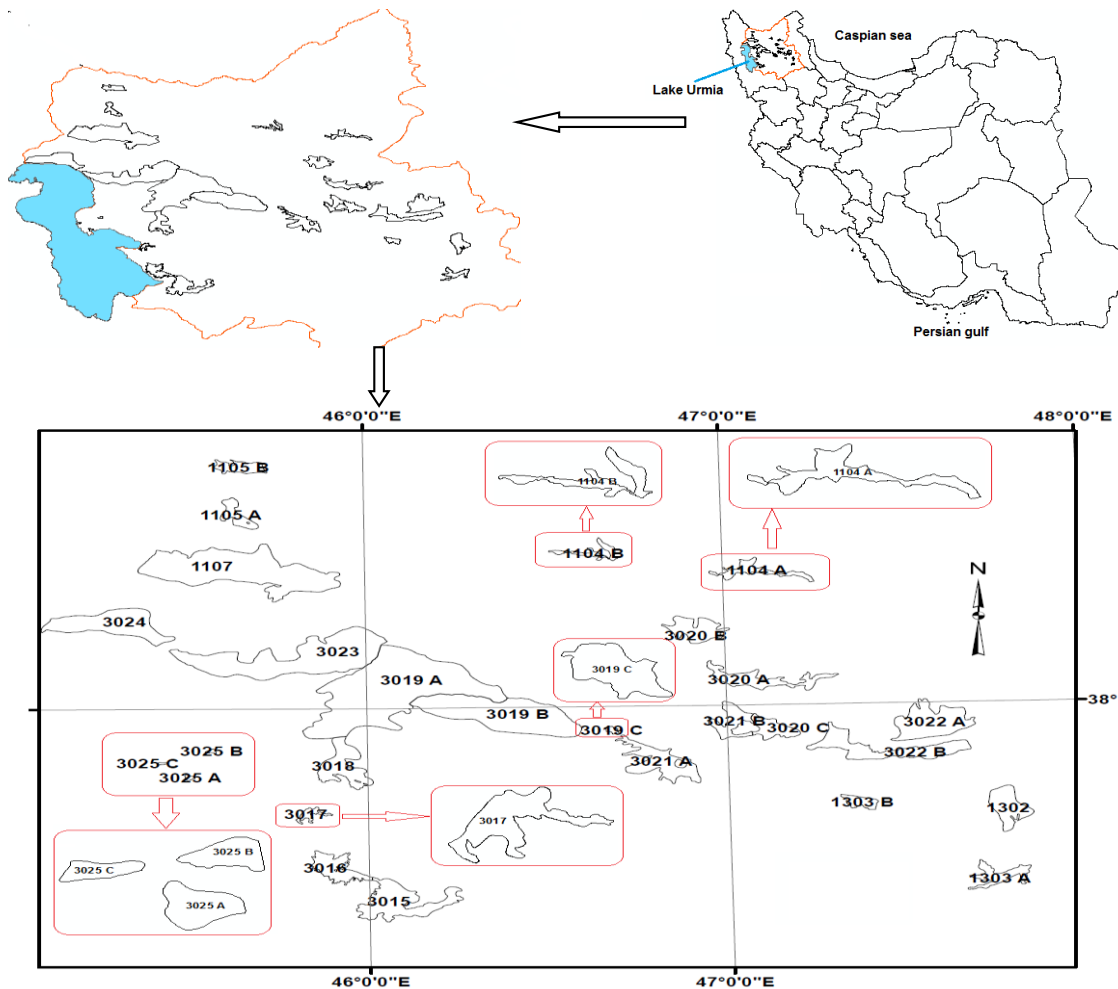


Fig. 3- Location of the study area and alluvial aquifers

شکل ۳- موقعیت منطقه مورد مطالعه و آبخوان‌های آبرفتی

Table 1- Characteristics of the alluvial aquifers of the study area
جدول ۱- مشخصات آبخوان‌های آبرفتی منطقه مورد مطالعه

| No. | code | Name aquifer | Area (Km ²) | No. | code | Name aquifer | Area (Km ²) |
|-----|-------|-------------------|-------------------------|-----|-------|-------------------|-------------------------|
| 1 | 3021A | Bostanabad | 137 | 15 | 3019A | Tabriz | 782.76 |
| 2 | 3021B | Kord Kandi | 68.68 | 16 | 3019B | Tabriz (Damaneh) | 395.61 |
| 3 | 3022A | Sarab | 180 | 17 | 1107 | Marand | 517.121 |
| 4 | 3022B | Asbfroshan | 174.32 | 18 | 3025A | Gamehchi | 3.5 |
| 5 | 3016 | Ajabshir | 88.18 | 19 | 3025C | Aggonbad | 1.6 |
| 6 | 3017 | Shiramin | 18.11 | 20 | 3025B | Saray | 2.6 |
| 7 | 3024 | Tasuj | 213 | 21 | 1104A | Ahar | 52.46 |
| 8 | 3023 | Shabstar-Sofian | 480.154 | 22 | 1104B | Varzagan | 30.17 |
| 9 | 3018 | Azarshahr | 123.43 | 23 | 3015 | Maragheh-Bonab | 189.323 |
| 10 | 3020A | Mehraban | 101.161 | 24 | 1303B | Mianeh | 57.4 |
| 11 | 3020C | Dozdozan | 59.79 | 25 | 1303C | Torkamanchai | 29.2 |
| 12 | 3020B | Bilaverdi | 90.139 | 26 | 1303A | Tarak | 97.7 |
| 13 | 3019C | Tabriz (Gori gol) | 6 | 27 | 1105A | Harzandat | 44.84 |
| 14 | 1105B | Hadishahr | 43.29 | | | | |

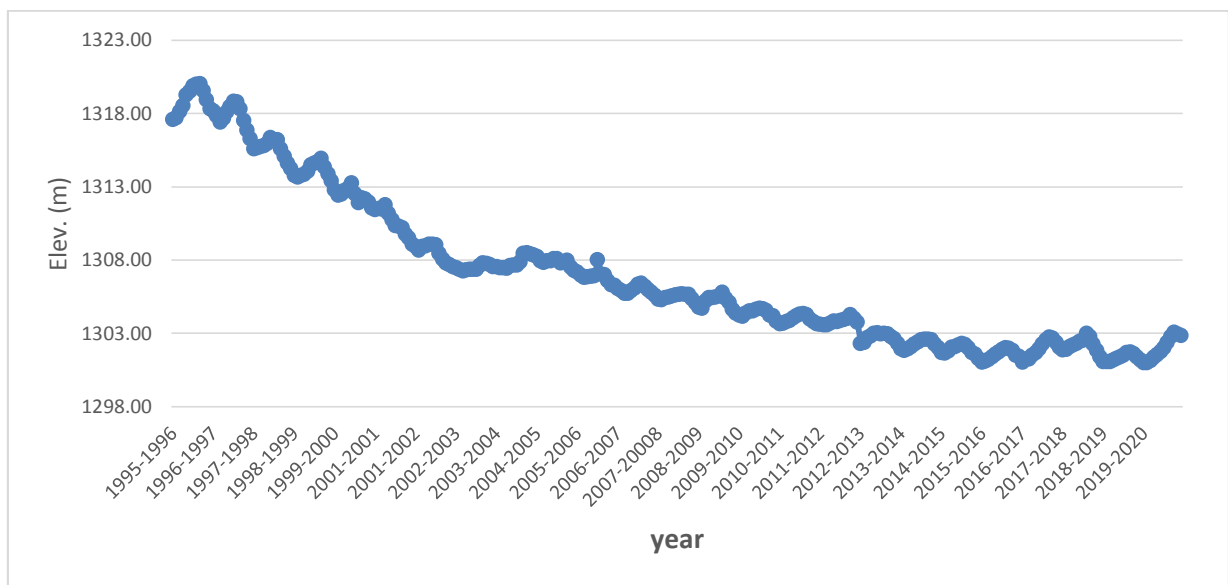


Fig. 4 – Hydrograph of alluvial aquifer Tasuj (Code 3024)

شکل ۴- آبنمود آبخوان آبرفتی تسوج کد ۳۰۲۴

مصرفی کشاورزی است، Q_{SW} : تغذیه از پساب آب مصرفی شرب و صنعت که عمده آن از طریق چاه‌های جذبی است، Q_R : تغذیه از جریان‌های سطحی یا رودخانه‌ها و میزان تغذیه مصنوعی احتمالی نیز در این عامل Q_R دیده می‌شود، برداشت و تخلیه توسط چاه، قنات و چشمه آبرفتی از آبخوان است و Q_{Eg} : تبخیر از آب زیرزمینی که از تحقیقات تجربی وایت استفاده شده است. عمق سطح آب زیرزمینی عامل اصلی تبخیر از آب زیرزمینی می‌باشد و هر چه سطح آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیکتر باشد، تبخیر از آن بیشتر است. با استفاده از عمق سطح آب زیرزمینی و تبخیر از تش، وایت تحقیقات تجربی و منحنی برای تخمین تبخیر از آب زیرزمینی ارائه کرد. E : زهکشی از آبخوان توسط رودخانه، Q_{out} : جریان زیرزمینی خروجی از آبخوان و ΔV : تغییر ذخیره ثابت آبخوان است.

۴- نتایج

در این تحقیق ابتدا به صورت مستقل برای تک تک آبخوان‌های آبرفتی معادله بیلان آب زیرزمینی طبق معادله (۳) تکمیل شده است:

$$(Q_{in} + Q_{is}) - (Q_w + Q_{Eg} + E + Q_{out}) = \Delta V \quad (3)$$

در معادله (۳)، Q_{in} : جریان زیرزمینی ورودی جانبی از سمت ارتفاعات و احتمالاً از بالادست دشت به آبخوان آبرفتی بوده که از معادله داری با توجه به ضریب قابلیت انتقال آبخوان به دست می‌آید. Q_{is} : تغذیه از سطح آبخوان که شامل نفوذ از آب‌های متفاوت و طبق معادله (۴) به دست می‌آید:

$$Q_{is} = Q_p + Q_i + Q_{sw} + Q_r \quad (4)$$

که در آن، Q_p : نفوذ از بارش بر سطح آبخوان که از معادله بیلان هیدروکلیماتولوژی تورنت وایت به دست می‌آید، Q_i : تغذیه از آب

نیاز در رابطه (۱) برای محاسبه رد پای آب زیرزمینی جمع‌آوری و تعیین گردیدند. در تعداد کثیری از آبخوان‌ها، مطالعات مدل‌سازی با Modflow وجود دارد که نتایج برآورد پارامترهای مورد نیاز شاخص ردپای آب زیرزمینی در این تحقیق با نتایج مدل‌سازی با نرم‌افزار Modflow که در گذشته در منطقه صورت گرفته مقایسه و اعتبار سنجی شده است. نتایج اعتبارسنجی برای چند آبخوان در جدول ۳ ارائه شده است.

مقادیر شاخص ردپای آب زیرزمینی (GF) و ردپای یکپارچه آب زیرزمینی (iGF) برای ۲۷ آبخوان آبرفتی از معادلات (۱) و (۲) محاسبه شده و در جدول ۴ نتایج به همراه مقادیر C, E, R و تنش آبی GF/A و تنش یکپارچه آبی iGF/A آورده شده است.

در انجام مطالعات بیلان میزان شارژ حاصل از بازگشت آب کشاورزی با توجه به روش آبیاری غالب و جنس خاک و وضعیت کربندی بر اساس نشریه ۳۸ فایو بین ۲۶ درصد تا ۳۲ درصد و شارژ حاصل از بازگشت آب شرب و صنعت ۶۰ درصد تا ۷۵ درصد و در صورت تکمیل بودن شبکه جمع‌آوری فاضلاب ۵۰ درصد تا ۶۰ درصد لحاظ شده است. مقدار آب برداشتی Q_w با توجه به تراکم چاه‌ها در منطقه و آماربرداری مرتب با توجه به نتایج آماربرداری سال ۱۳۸۷ از منابع برداشت به‌دست آمده است. مقدار E از معادله بیلان آبخوان با توجه به مشخص بودن تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی از نتایج شبکه پیژومتری (حاصل ضرب مساحت آبخوان در ضریب ذخیره و متوسط افت تراز آب زیرزمینی) و جایگذاری سایر پارامترهای در معادله بیلان تنها مجهول E به‌دست آمده است. جدول بیلان آبخوان‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه گردیده است. بدین ترتیب پارامترهای مورد

Table 2- Components of the alluvial aquifers balance

جدول ۲- مؤلفه‌های بیلان آبخوانهای آبرفتی

| Aquifer | Q_{in} (mcm) | Q_P (mcm) | Q_R (mcm) | Q_I (mcm) | Q_{sw} (mcm) | Q_w (mcm) | Q_{out} (mcm) | E (mcm) | Q_{Eg} (mcm) | ΔV (mcm) |
|---------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|--------------------|------------|-------------------|---------------------|
| 3021A | 8.38 | 4.69 | 4.18 | 6.90 | 2.60 | 21.52 | 0.31 | 5.5 | 0.52 | -1.1 |
| 3021B | 6.5 | 2.2 | 2.3 | 6.9 | 1 | 18.51 | 0.45 | 0.25 | 0.01 | -0.32 |
| 3022A | 30.82 | 5.3 | 12 | 24.4 | 8.2 | 78.7 | 0.22 | 1.5 | 1.1 | -0.8 |
| 3022B | 15.73 | 5.7 | 1.84 | 10.5 | 1.1 | 30.59 | 0.58 | 2.5 | 1.5 | -0.3 |
| 3016 | 7.15 | 2.86 | 4.48 | 15.06 | 2.62 | 30.91 | 0 | 1.5 | 0.36 | -0.6 |
| 3017 | 1.79 | 0.13 | 0.13 | 0.56 | 0.43 | 2.82 | 0.24 | 0 | 0 | -0.02 |
| 3024 | 5.95 | 2 | 3.88 | 5.67 | 1.1 | 19.43 | 4.37 | 0 | 0 | -5.2 |
| 3023 | 41.17 | 7.62 | 4.66 | 25.06 | 8.1 | 85.6 | 6.21 | 2.1 | 1.3 | -8.6 |
| 3018 | 16.71 | 1.6 | 7.18 | 10.15 | 4.2 | 38.54 | 0.75 | 0.5 | 0.4 | -0.35 |
| 3020A | 4.75 | 1.32 | 6.25 | 6.37 | 0.97 | 14.63 | 0.26 | 3.63 | 1.14 | 0 |
| 3020C | 5.37 | 0.8 | 2.45 | 11.5 | 0.3 | 20.57 | 0 | 0 | 0 | -0.15 |
| 3020B | 2.08 | 2.4 | 0.85 | 2.3 | 0.3 | 4.62 | 0.95 | 2.92 | 0.16 | -0.72 |
| 3019C | 0.77 | 0.25 | 0.01 | 0.2 | 0.02 | 0.8 | 0.43 | 0 | 0.07 | -0.05 |
| 3019A | 17.17 | 18.04 | 17.51 | 40.3 | 78.7 | 125.83 | 5.29 | 28.52 | 14.03 | -1.95 |
| 3019B | 27.06 | 12.4 | 19.92 | 5.53 | 3.2 | 71.1 | 1.91 | 0 | 0 | -4.9 |
| 1107 | 87.88 | 11.56 | 4.16 | 59.3 | 19.71 | 196.88 | 0 | 1.28 | 0 | -15.54 |
| 3025A | 0.39 | 0.025 | 0 | 0.14 | 0 | 0.56 | 0 | 0 | 0.007 | -0.008 |
| 3025C | 0.243 | 0.011 | 0 | 0.14 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | -0.006 |
| 3025B | 0.56 | 0.015 | 0 | 0.3 | 0.1 | 0.97 | 0 | 0 | 0.008 | 0 |
| 1104A | 5.82 | 0.87 | 4.78 | 8.87 | 7.05 | 4.77 | 0 | 22.2 | 0.41 | 0 |
| 1104B | 2.18 | 0.79 | 2.15 | 1.49 | 0.25 | 1.84 | 0 | 4.96 | 0.06 | -0.01 |
| 3015 | 11.04 | 6.28 | 4.75 | 37.15 | 20.44 | 70.2 | 4.6 | 3.82 | 1.1 | -0.06 |
| 1303B | 10.75 | 1.12 | 1.39 | 5.87 | 3.2 | 17 | 2.5 | 2.47 | 0.69 | -0.33 |
| 1303C | 2 | 0.86 | 0.54 | 0.1 | 0 | 0.59 | 1.16 | 1.75 | 0 | 0 |
| 1303A | 1.53 | 4.05 | 0.7 | 1.1 | 0.2 | 7.08 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 1105A | 1.71 | 0.88 | 0.19 | 1.67 | 0.24 | 4.27 | 0 | 0.94 | 0 | -0.52 |
| 1105B | 6.2 | 0.73 | 0.24 | 1.85 | 2.64 | 10.91 | 0 | 1 | 0 | -0.26 |

**Table 3- Comparison and validation of Modflow models and the last balance results
(Modflow models source: Yekom Consulting Engineers)**

جدول ۳- مقایسه و اعتبارسنجی نتایج مدل‌های مادفلو و آخرین بیلان (منبع مدل‌های مادفلو: مهندسیین مشاور یکم)

| | Aquifer | Q _{in} (mcm) | Q _p (mcm) | Q _R (mcm) | Q _w (mcm) | Q _{out} (mcm) | E (mcm) | Q _{Eg} (mcm) |
|-------------------------------------|---------|--------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|------------|--------------------------|
| Latest Balance Results (2011-2012) | 3016 | 7.15 | 2.86 | 4.48 | 30.91 | 0 | 1.5 | 0.36 |
| Average Modflow result (2006-2012) | 3016 | 10.99 | 8.56 | 4.49 | 24.20 | 1.49 | 0 | 1.14 |
| Latest Balance Results (2011-2012) | 3017 | 1.79 | 0.13 | 0.13 | 2.82 | 0.24 | 0 | 0 |
| (Average Modflow result (2002-2006) | 3017 | 3.32 | 0.628 | 0.919 | 6.092 | 1.256 | 0 | 0 |
| Latest Balance Results (2011-2012) | 3024 | 5.95 | 2 | 3.88 | 19.43 | 4.37 | 0 | 0 |
| Average Modflow result (2002-2006) | 3024 | 5.02 | 3.96 | 2.08 | 20.65 | 4.83 | 0 | |
| Latest Balance Results (2011-2012) | 3018 | 16.71 | 1.6 | 7.18 | 38.54 | 0.75 | 0.5 | 0.4 |
| (Average Modflow result (2000-2004) | 3018 | 30.29 | 2.09 | 3 | 70.74 | 0.57 | 0.5 | 0 |
| Latest Balance Results (2011-2012) | 3015 | 11.04 | 6.28 | 4.75 | 70.2 | 4.6 | 3.82 | 1.1 |
| Average Modflow result (2002-2005) | 3015 | 6.3 | 5.70 | 11.70 | 18.2 | 0.5 | 0.2 | 1.40 |
| Latest Balance Results (2011-2012) | 1105A | 1.71 | 0.88 | 0.19 | 4.27 | 0 | 0.94 | 0 |
| Average Modflow result (2001-2006) | 1105A | 1.07 | 0.78 | - | 2.42 | 0.25 | - | 0.105 |
| Latest Balance Results (2011-2012) | 1105B | 6.2 | 0.73 | 0.24 | 10.91 | 0 | 1 | 0 |
| (Average Modflow result (2004-2006) | 1105B | 12.78 | 0.58 | 2.59 | 3.14 | 12.70 | 0 | 0 |

در نهایت در شکل ۷ مقادیر رد پای آب زیرزمینی GF/A و در شکل ۸ رد پای کیفی و یا رد پای یکپارچه آب زیرزمینی iGF/A تمامی آبخوان‌های آبرفتی (۲۷ آبخوان) منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. همانطور که در نتایج ملاحظه می‌گردد ۲۰ آبخوان آبرفتی دارای GF/A بزرگ‌تر از یک و ۷ آبخوان آبرفتی دارای GF/A برابر ۱ است و هیچ آبخوان آبرفتی حالت استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی ندارد. ۲۴ آبخوان آبرفتی دارای iGF/A بزرگ‌تر از یک می‌باشند و تنها سه آبخوان آبرفتی iGF/A برابر واحد دارد که نشان‌دهنده آلودگی اکثر آبخوان‌ها در اثر شوری ناشی از نفوذ آب شور دریا و برداشت بی‌رویه از آبخوان و افت کیفی آبخوان دارد. نتایج بیلان آبخوان‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که به‌غیر از آبخوان‌های مهربان (3020A)، اهر (1104A)، ترکمانچای (1303C)، ترک (1303A) و جزیره سرای (3025B) بقیه آبخوان‌ها بیلان منفی دارد که این موضوع بر نتایج شاخص تنش کمی و کیفی آبخوان‌ها نیز تأثیرگذار بوده است.

مطابق نمودار USSLS در بررسی کیفیت آب جهت کشاورزی به لحاظ شوری چهار گروه C1 تا C4 و از نظر نسبت جذب سدیم به چهار گروه S1 تا S4 وجود دارد که کلاس‌های دارای گروه‌های S4، C4 برای کشاورزی نامناسب هست و از آنجایی که در محدوده مورد مطالعه کلاس‌های دارای گروه C4 به مراتب بیشتر از کلاس‌های دارای گروه S4 بود لذا تأثیر EC بر iGF به مراتب بیشتر از SAR بود.

در شکل ۵ نتایج نقشه رستری هدایت الکتریکی (EC) و نقشه رستری نسبت جذب سدیم (SAR) تعدادی از آبخوان‌های آبرفتی مجاور با دریاچه ارومیه به روش درونبایی کریجینگ با توجه به نتایج آزمایش‌های آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی در شهریور سال ۱۳۹۰ ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به برخی از آبخوان‌های ساحلی دریاچه ارومیه شامل شیرامین (۳۰۱۷)، آذرشهر (۳۰۱۸)، تبریز (۳۰۱۹)، جزایر دریاچه ارومیه (۳۰۲۵) و تسوج (۳۰۲۴) در سال‌های گذشته تصدیق می‌شود. به‌طوری‌که آبخوان شیرامین (۳۰۱۷) و جزایر (۳۰۲۵) در مجاورت دریاچه به کلی تخریب شده است.

پس از تهیه نقشه‌های هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم آبخوان‌ها بر اساس داده‌های آنالیز شیمیایی اندازه‌گیری شده با انجام محاسبات پایه رستری و با توجه به مقادیر SAR، EC هر سلول توسط ابزارهای تحلیل مکانی GIS بخش‌های نامناسب و مناسب آبخوان‌ها بر اساس معیار طبقه‌بندی آب کشاورزی بر اساس شوری و سدیم US Salinity Laboratory Staff (1954) مشخص و در شکل ۶ نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود بیش از ۵۰ درصد سطح آبخوان‌های آبرفتی شیرامین (۳۰۱۷)، آذرشهر (۳۰۱۸)، تبریز (۳۰۱۹)، جزایر دریاچه ارومیه (۳۰۲۵) و تسوج (۳۰۲۴) در اثر نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به دلیل پایین افتادن سطح ایستابی در آبخوان‌های ساحلی مجاور به وضعیت نامناسب به کشاورزی تنزل پیدا کرده است. صحت نتایج بدست آمده در این خصوص با مشاهدات محلی سازگاری دارد.

Table 4- Area and input parameters for determination of GF, GF/A, iGF, iGF/A values in the studied alluvial aquifers

جدول ۴- مساحت و پارامترهای ورودی جهت تعیین مقادیر GF, GF/A, iGF, iGF/A در آبخوان‌های ابرفتی مورد مطالعه

| No. | Name aquifer | Code | Area (Km ²) | Area of contaminated area (qualitative parameter Km ²) | C (mcm) | R (mcm) | E (mcm) | GF (Km ²) | GF/A | iGF/A | iGF (Km ²) | ΔV (mcm) |
|------|-------------------|-------|-------------------------|--|---------|---------|---------|-----------------------|------|-------|------------------------|----------|
| 1 | Bostanabad | 3021A | 137 | 3.53 | 22.35 | 26.75 | 5.5 | 144.1 | 1.05 | 1.08 | 147.8 | -1.1 |
| 2 | Kord Kandi | 3021B | 68.68 | 0 | 18.97 | 18.9 | 0.25 | 69.9 | 1.02 | 1.02 | 69.9 | -0.32 |
| 3 | Sarab | 3022A | 180 | 0 | 80.02 | 80.72 | 1.5 | 181.8 | 1.01 | 1.01 | 181.8 | -0.8 |
| 4 | Asbfroshan | 3022B | 174.32 | 0 | 32.67 | 34.87 | 2.5 | 175.9 | 1.01 | 1.01 | 175.9 | -0.3 |
| 5 | Ajabshir | 3016 | 88.18 | 22.06 | 31.27 | 32.17 | 1.5 | 89.9 | 1.02 | 1.27 | 112.4 | -0.6 |
| 6 | Shiramin | 3017 | 18.11 | 16.23 | 3.06 | 3.04 | 0 | 18.2 | 1.01 | 1.91 | 34.6 | -0.02 |
| 7 | Tasuj | 3024 | 213 | 87.73 | 23.8 | 18.6 | 0 | 272.5 | 1.28 | 1.81 | 384.8 | -5.2 |
| 8 | Shabstar-Sofian | 3023 | 480.154 | 173.39 | 93.11 | 86.61 | 2.1 | 529.0 | 1.10 | 1.50 | 720.1 | -8.6 |
| 9 | Azarshahr | 3018 | 123.43 | 76.41 | 39.69 | 39.84 | 0.5 | 124.5 | 1.01 | 1.63 | 201.6 | -0.35 |
| 10 | Mehraban | 3020A | 101.161 | 34.52 | 16.03 | 19.66 | 3.63 | 101.2 | 1.00 | 1.34 | 135.7 | 0 |
| 11 | Dozdozan | 3020C | 59.79 | 0 | 20.57 | 20.42 | 0 | 60.2 | 1.01 | 1.01 | 60.2 | -0.15 |
| 12 | Bilaverdi | 3020B | 90.139 | 6.57 | 5.73 | 7.93 | 2.92 | 103.1 | 1.14 | 1.23 | 110.6 | -0.72 |
| 13 | Tabriz (Gori gol) | 3019C | 6 | 0 | 1.3 | 1.25 | 0 | 6.2 | 1.04 | 1.04 | 6.2 | -0.05 |
| 14 | Tabriz | 3019A | 782.76 | 544.58 | 145.15 | 171.72 | 28.52 | 793.4 | 1.01 | 1.72 | 1345.4 | -1.95 |
| 15 | Tabriz (Damaneh) | 3019B | 395.61 | 18.12 | 73.01 | 68.11 | 0 | 424.1 | 1.07 | 1.12 | 443.5 | -4.9 |
| 16 | Marand | 1107 | 517.121 | 72.5 | 196.88 | 182.61 | 1.28 | 561.5 | 1.09 | 1.24 | 640.2 | -15.54 |
| 17 | Gamehchi | 3025A | 3.5 | 3.33 | 0.567 | 0.555 | 0 | 3.6 | 1.02 | 1.99 | 7.0 | -0.008 |
| 18 | Aggonbad | 3025C | 1.6 | 1.63 | 0.4 | 0.394 | 0 | 1.6 | 1.02 | 2.05 | 3.3 | -0.006 |
| 19 | Saray | 3025B | 2.6 | 2.6 | 0.978 | 0.975 | 0 | 2.6 | 1.00 | 2.01 | 5.2 | 0 |
| 20 | Ahar | 1104A | 52.46 | 9.31 | 5.18 | 27.39 | 22.2 | 52.4 | 1.00 | 1.18 | 61.7 | 0 |
| 21 | Varzagan | 1104B | 30.17 | 0 | 1.9 | 6.86 | 4.96 | 30.2 | 1.00 | 1.00 | 30.2 | -0.01 |
| 22 | Maragheh-Bonab | 3015 | 189.323 | 16.13 | 75.9 | 79.66 | 3.82 | 189.5 | 1.00 | 1.09 | 205.6 | -0.06 |
| 23 | Mianeh | 1303B | 57.4 | 42 | 20.19 | 22.33 | 2.47 | 58.4 | 1.02 | 1.76 | 101.1 | -0.33 |
| 24 | Torkamanchai | 1303C | 29.2 | 0 | 1.75 | 3.5 | 1.75 | 29.2 | 1.00 | 1.00 | 29.2 | 0 |
| 25 | Tarak | 1303A | 97.7 | 0 | 7.58 | 7.58 | 0 | 97.7 | 1.00 | 1.00 | 97.7 | 0 |
| 26 | Harzandat | 1105A | 44.84 | 7.96 | 4.27 | 4.69 | 0.94 | 51.1 | 1.14 | 1.34 | 60.1 | -0.52 |
| 27 | Hadishahr | 1105B | 43.29 | 4.96 | 10.91 | 11.66 | 1 | 44.3 | 1.02 | 1.14 | 49.4 | -0.26 |
| Sum. | | | 3987.5 | | | | | 4216 | | | 5421.1 | |

بایستی توجه شود که مزیت استفاده از شاخص iGF این است که می‌توان تأثیر چند پارامتر کیفی را در قالب نقشه‌های رستری جداگانه ترکیب نموده و تأثیر یک سلول مکانی را چندین بار به خاطر عدم برآورد حدود مجاز در شاخص iGF لحاظ نمود. همچنین شاخص iGF با ترکیب ترم‌های کیفی با شاخص ردپا GF به صورت یکپارچه شاخص مناسبی جهت درک وضعیت کمی و کیفی آبخوان فراهم آورده و می‌توان تأثیر سناریوهای مختلف را به صورت هم‌زمان در وضعیت کمی و کیفی آبخوان مشاهده نمود. اگرچه پایین رفتن تراز آب دریاچه ارومیه مشکلات زیست‌محیطی را گسترش داده است ولی به جهت کاهش پیشرفت جبهه آب‌شور و کاهش گرادیان هیدرولیکی فرصتی برای احیای آبخوان‌های ساحلی فراهم شده است تا در صورت اجرای سیاست‌های کاهش برداشت آب زیرزمینی و اجرای پروژه‌های تزریق مصنوعی شاخص iGF بهبود پیدا کند.

مقایسه نتایج ردپای کمی و کیفی در اشکال ۷ و ۸ نشان می‌دهد که وضعیت اکثر آبخوان‌های مورد مطالعه از لحاظ کمی و کیفی شبیه هم هست. به عبارت دیگر آبخوان‌هایی که به لحاظ تنش آبی دارای بحران می‌باشند به لحاظ ردپای کیفی نیز بحران وجود دارد. در آبخوان‌هایی که شاخص کیفی خیلی بزرگ‌تر از شاخص کمی هست به دلیل کاهش کیفیت آب، برداشت آب زیرزمینی محدودیت پیدا کرده و سبب بهبود نسبی شاخص کمی شده است.

قطعاً استفاده از ترم‌های کیفی متنوع و یا تغییر معیار مقبولیت ترم کیفی به غیر دیگرام USSLS می‌تواند نتایج متفاوتی را برای iGF به همراه داشته باشد. همچنین اگر مصرف آب اهداف چندگانه شرب، کشاورزی و صنایع مختلف مطرح باشد ترکیب ترم‌های کیفی می‌تواند خیلی متنوع‌تر باشد.

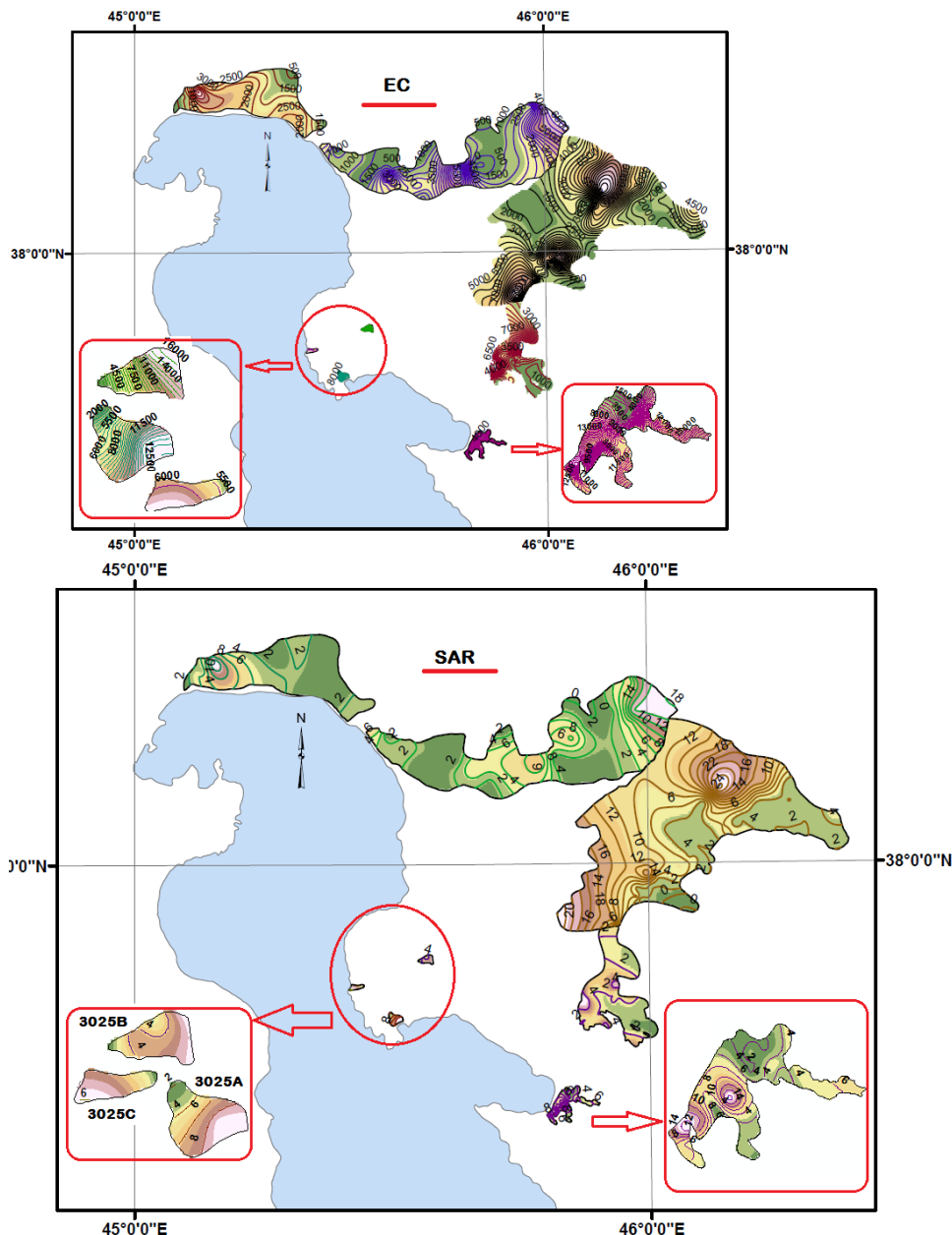


Fig. 5- Results of EC raster map- micromohus per centimeter -and SAR raster map- Milliequivalents per liter- of alluvial aquifers adjacent Lake Urmia

شکل ۵- نتایج نقشه رستری هدایت الکتریکی برحسب میکروموهوس بر سانتی متر (EC) و نقشه رستری نسبت جذب سدیم برحسب میلی اکی والان بر لیتر (SAR) تعدادی از آبخوان‌های آبرفتی مجاور با دریاچه ارومیه

کاهش تعداد آبخوان‌های دارای وضعیت بحران کیفیت بیش از ۵۰ درصد است. مقایسه نتایج اجرای این سناریو در جدول ۵ نشان داده شده است. این موضوع بیانگر آن است با محاسبه و تعیین هم‌زمان GF و iGF می‌توان تأثیرات کمی و کیفی هر سناریو را به خوبی مشاهده نموده و با توجه به اهمیت افت تراز آب زیرزمینی یا افت کیفیت آب تصمیم مناسب را اتخاذ نمود.

با توجه به مصرف بالای بخش کشاورزی در این تحقیق با اجرای سناریو کاهش ۱۰ درصد مصرف آب (بخش کشاورزی) نتایج محاسبه مجدد شاخص‌های GF و iGF نشان داد که با اجرای این سناریو ۱۴ آبخوان به لحاظ پایداری کمی به حالت پایدار تغییر وضعیت می‌دهد یعنی در حدود ۳۰ درصد تعداد آبخوان‌های دارای وضعیت بحرانی کاهش می‌یابد. این سناریو به بهبود شاخص iGF هم کمک کرده و ۱۰ آبخوان به حالت پایدار تغییر وضعیت می‌دهد. تأثیر این سناریو در

۵- محدودیتهای تحقیق

در رابطه تجربی ارایه شده توسط Kourgialas et al. (2015)، جهت محاسبه نشانگر ردپای آب زیرزمینی یکپارچه iGF پارامترهای کیفی به صورت ساده و برای چند نوع آلاینده خاص و با توجه به حدود مجاز پیشنهادی مرکز جهانی بهداشت WHO برای آن پارامترها، جهت مصرف شرب بکار رفته است. در این تحقیق با توجه به محدودیت داده‌های آنالیز شیمیایی آبخوان‌ها در خصوص برخی پارامترها مانند نیترات و همچنین از آنجایی که برای مصرف کشاورزی برای هر کدام از آنیون‌ها و کاتیون‌ها حدود مجازی از طرف فایو پیشنهاد نشده است از پارامتر ترکیبی SAR و EC در نمودار ویلکوکس استفاده گردید.

بنابراین پیشنهاد می‌شود در آینده در صورت وجود داده‌های کامل آزمایشگاهی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها و حدود مجاز برای آن‌ها برای مصارف کشاورزی، به جای پارامتر ترکیبی SAR و EC، آلاینده‌ها به صورت مستقل اندازه‌گیری و ملاک تعیین iGF قرار گیرند.

۶- جمع‌بندی

در این تحقیق ارزیابی یکپارچه کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی در ۲۷ آبخوان آبرفتی استان آذربایجان شرقی واقع در شمال غرب ایران توسط دو شاخص ردپای آب زیرزمینی (GF) و ردپای یکپارچه آب زیرزمینی (iGF) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ۲۰ آبخوان آبرفتی از ۲۷ آبخوان آبرفتی استان دارای GF/A بزرگ‌تر از یک و ۷ آبخوان آبرفتی دارای GF/A برابر ۱ است و هیچ آبخوان آبرفتی استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی ندارد. همچنین ۲۴ آبخوان آبرفتی از ۲۷ آبخوان آبرفتی استان دارای iGF/A بزرگ‌تر از یک می‌باشند و تنها سه آبخوان آبرفتی iGF/A برابر واحد دارد که نشان‌دهنده آلودگی اکثر آبخوان‌ها در اثر شوری ناشی از نفوذ آب شور دریا و برداشت بی‌رویه از آبخوان و افت کیفی آبخوان دارد. با توجه اینکه در مقیاس جهانی ۸۰ درصد از آبخوان‌های دنیا دارای ردپای آب‌های زیرزمینی کمتر از مساحت آن‌ها است. بنابراین وضعیت آبخوان‌های آبرفتی محدوده مورد مطالعه از این لحاظ در موقعیت مطلوبی قرار ندارد.

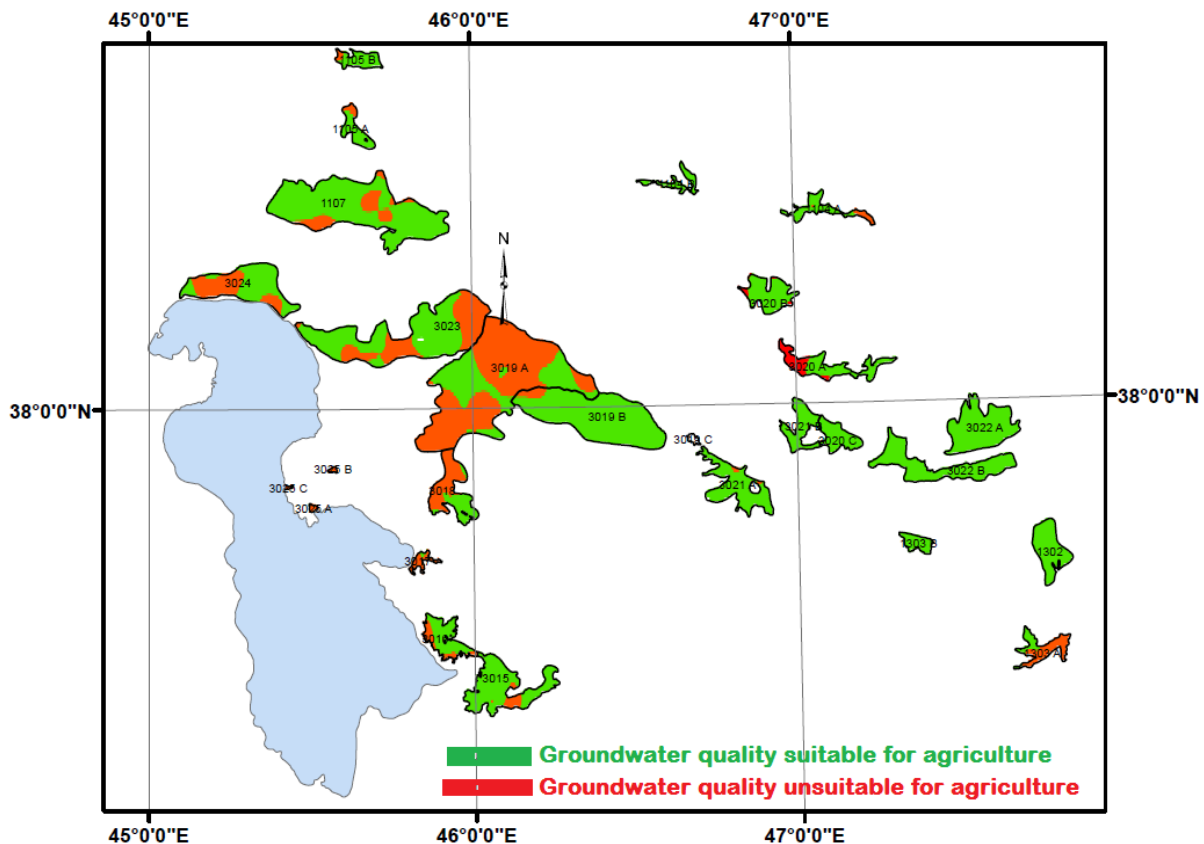


Fig. 6- Quality assessment of alluvial aquifers for agriculture based on USSSL classification criteria

شکل ۶- ارزیابی وضعیت کیفی آب آبخوان‌های آبرفتی جهت کشاورزی بر اساس معیار طبقه‌بندی USSSL

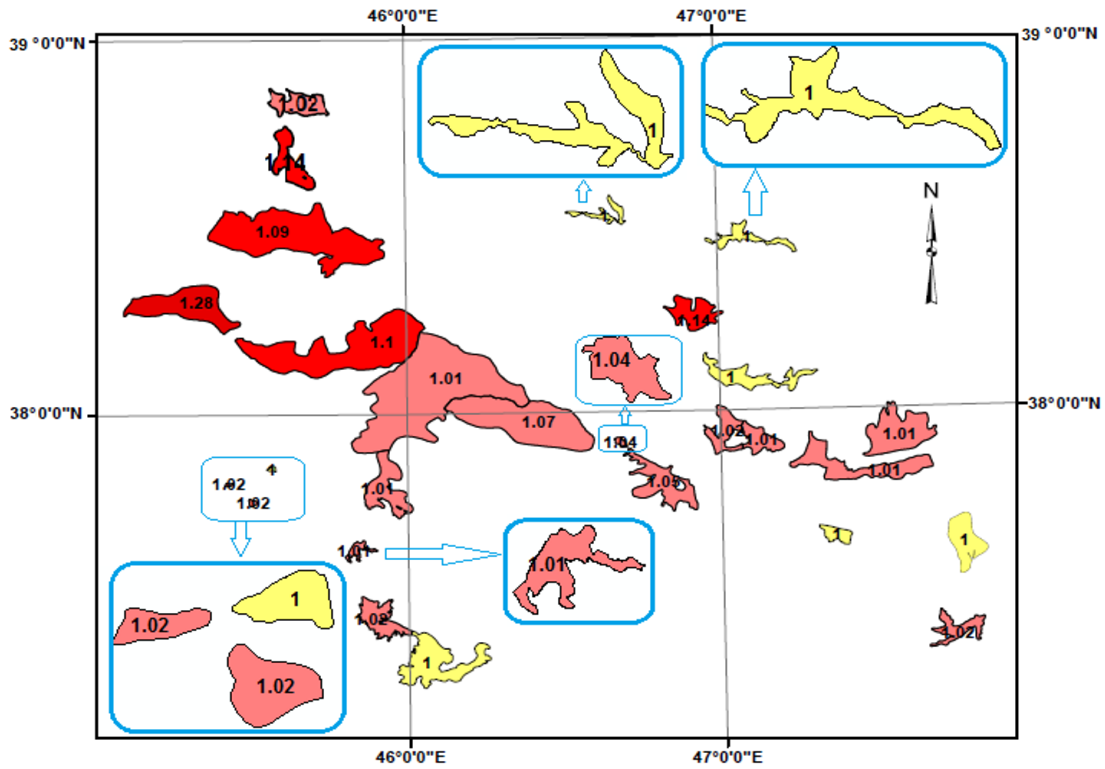


Fig. 7- Quantitative stress values of GF/A alluvial aquifers of East Azarbaijan Province
 شکل ۷- مقادیر تنش کمی GF/A آبخوان‌های آبرفتی استان آذربایجان شرقی

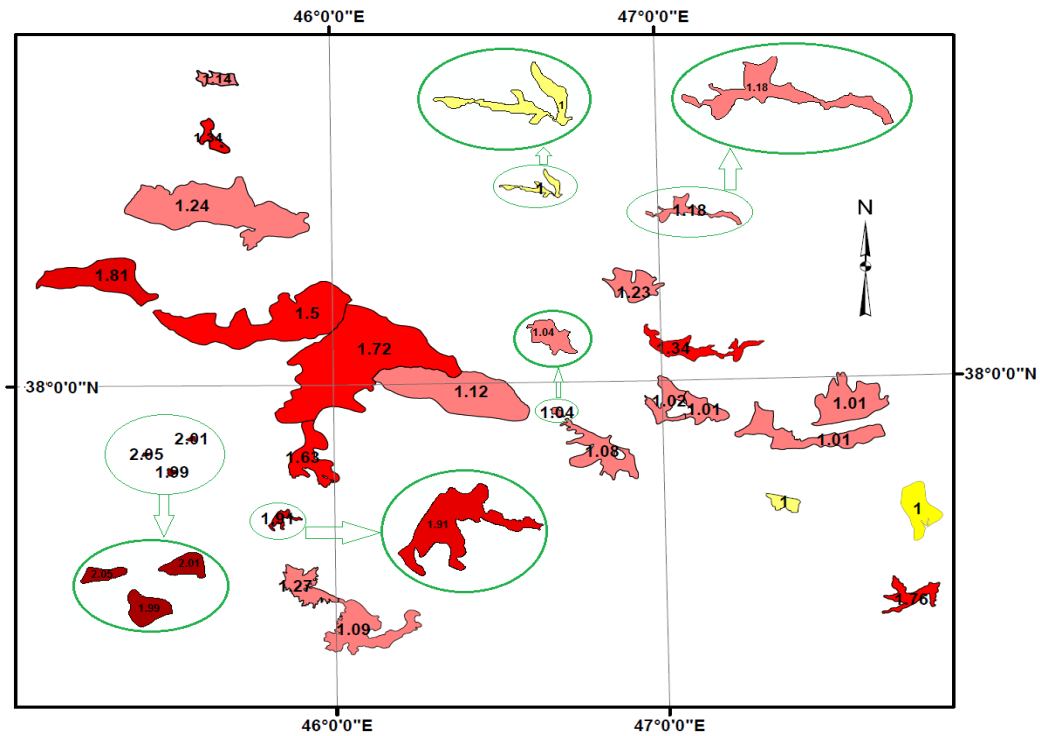


Fig. 8- Qualitative stress values of iGF/A in terms of the composite parameter of SAR and EC based on the USSLS diagram
 شکل ۸- مقادیر تنش کیفی iGF/A بر حسب پارامتر ترکیبی نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی بر اساس نمودار USSLS

Table 5- Results of the scenario of 10% reduction in agricultural consumption on GF and iGF indicators

جدول ۵- نتایج اجرای سناریو ۱۰ درصد کاهش مصرف کشاورزی بر شاخص‌های GF و iGF

| Aquifer | 3021A | 3021B | 3022A | 3022B | 3016 | 3017 | 3024 | 3023 | 3018 | 3020A | 3020C | 3020B | 3019C | 3019A |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| GF/A with 10% reduction in agricultural consumption | 0.95 | 0.92 | 0.91 | 0.91 | 0.92 | 0.91 | 1.15 | 0.99 | 0.91 | 0.90 | 0.91 | 1.03 | 0.94 | 0.91 |
| iGF/A with 10% reduction in agricultural consumption | 0.97 | 0.92 | 0.91 | 0.91 | 1.15 | 1.72 | 1.63 | 1.35 | 1.47 | 1.21 | 0.91 | 1.10 | 0.94 | 1.55 |
| Aquifer | 3019B | 1107 | 3025A | 3025C | 3025B | 1104A | 1104B | 3015 | 1303B | 1303C | 1303A | 1105A | 1105B | |
| GF/A with 10% reduction in agricultural consumption | 0.96 | 0.98 | 0.92 | 0.91 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.91 | 0.90 | 0.90 | 1.02 | 0.92 | |
| iGF/A with 10% reduction in agricultural consumption | 1.01 | 1.11 | 1.79 | 1.84 | 1.81 | 1.06 | 0.90 | 0.98 | 1.58 | 0.90 | 0.90 | 1.21 | 1.03 | |

High Plains aquifer systems, US. Water Resources Research 50(6):4953-4973

FAO (2009) Groundwater management in Iran. Draft Synthesis Report

FAO AQUASTAT Database (2017) <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data>

Gleeson T, Wada Y, Bierkens MFP, van Beek LPH (2012) Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature 488:197-200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>

Gleeson T, Wada Y (2013) Assessing regional groundwater stress for nations using multiple data sources with the groundwater footprint. Environmental Research Letters 8(4):044010

Hiscock KM, Rivett MO, Davison RM (2002) Sustainable groundwater development. Geological Society London Special Publications 193(1):1-14

Hoekstra AY, Chapagain AK (2007) Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resource Management 21(1):35-48

Hoekstra AY (2009) Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis. Ecological economics 68:1963-1974

Howard CD (2002) Sustainable development- Risk and uncertainty. Journal of Water Resources Planning and Management 128(5): 309-311

Howard KW (2015) Sustainable cities and the groundwater governance challenge. Environmental Earth Sciences 73(6):2543-2554

Kourgialas NN, Karatzas GP (2015) Groundwater contamination risk assessment in Crete, Greece,

با توجه به اینکه مجموع ردپای یکپارچه آب زیرزمینی (iGF) برابر ۵۴۲۱/۱ کیلومتر مربع و ۱/۳۶ برابر مساحت آبخوان‌های محدوده مورد مطالعه است بیانگر این است که ۳۶ درصد از مساحت کل آبخوان‌های استان جهت کشاورزی نامناسب شده است. لذا کاشت محصولات مقاوم به شوری و کم‌مصرف آب و افزایش عملکرد محصولات و کسب سودآوری بیشتر با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه می‌تواند مفید باشد. با اجرای سناریو ۱۰ درصدی کاهش مصرف کشاورزی ۱۴ آبخوان به لحاظ پایداری کمی به حالت پایدار تغییر وضعیت می‌دهد این سناریو به بهبود شاخص iGF هم کمک کرده و ۱۰ آبخوان به حالت پایدار تغییر وضعیت می‌دهد.

۷- مراجع

American Society of Civil Engineers Task Committee on Sustainability Criteria (1998) Sustainability criteria for water resource systems. ASCE Water Resources Planning and Management Division and Working Group, UNESCO/IHP EV Project M-4.3

Brundtland GH (1987) Our common future-Call for action. Environmental Conservation 14(4):291-294

Custodio E (2002) Aquifer overexploitation: what does it mean?. Hydrogeology Journal 10(2):254-277

East Azarbaijan Regional Water Organization (2006) Quantitative simulation model report of provincial plains. Yekom Consulting Engineers (In Persian)

East Azarbaijan Regional Water Organization (2019) Provincial water resources status report. (In Persian)

Esnault L, Gleeson T, Wada Y, Heinke J, Gerten D, Flanary E ... & van Beek LP (2014) Linking groundwater use and stress to specific crops using the groundwater footprint in the Central Valley and

- Pérez AJ, Hurtado-Patiño J, Herrera HM, Carvajal AF, Pérez ML, Gonzalez-Rojas E, Pérez-García, J (2019) Assessing sub-regional water scarcity using the groundwater footprint. *Ecological Indicators* 96:32-39
- Richter BD, Davis MM, Apse C, Konrad C (2012) A presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications* 28(8):1312-1321
- Smakhtin V, Revenga C, Döll P (2004) A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International* 29(3):307-317
- US Salinity Laboratory Staff (1954) Diagnosis and improvement of soils and alkali soils. US Department of Agricultural Hand Book, 60, p. 160
- Voudouris K, Alexopoulos A, Antonakos A, Kallergis G (2007) Water resources in the wider area of the Aposelemis basin, Crete island, Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 40(2):616-628
- Wada Y, Van Beek LPH, Bierkens MF (2012) Non sustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research* 48(6)
- Zagharmi M, Ku K, Ying L, Shaba S, Islam M (2015) Urmia Lake: Policy analysis for effective water governance. IGA-436 Policy Analysis Group Paper, DOI: 10.13140/RG.2.1.2247.5683
- using numerical tools within a GIS framework. *Hydrological Sciences Journal* 60(1):111-132
- Kourgialas NN, Karatzas GP, Dokou Z, Kokorogiannis A (2018) Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands-The case of Crete, Greece. *Science of the Total Environment* 615:381-389
- Llamas MR, Martinez-Santos P, De la Hera A (2006) The manifold dimensions of groundwater sustainability: An overview. In *International Symposium of Groundwater Sustainability* (pp. 23-27)
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):513-530
- Loucks DP, Stakhiv EZ, Martin LR (2000) Sustainable water resources management. *Journal of Water Resource Research* 27(2):43-47
- Mays LW (2007) *Water resources sustainability*. McGraw-Hill, New York
- McMahon PB, Plummer LN, Böhlke JK, Shapiro SD, Hinkle SR (2011) A comparison of recharge rates in aquifers of the United States based on groundwater-age data. *Hydrogeology Journal* 19(4):779