ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2025;40(4):319-327 10.58209/geores.40.4.319

Salinity Line Determination in Groundwater in Guilan Province

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Behzadi J.[1]* *PhD*

How to cite this article
Behzadi J. Salinity Line Determination in Groundwater in Guilan Province. Geographical Researches. 2025;40(4):319-327.

[1]Department of Water Engineering, Campus Lahijan (La.C.), Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Correspondence
Address: Department of Water Engineering, Islamic Azad University, Campus Lahijan, Shaghayegh Street, Lahijan, Iran. Postal Code: 39515-44169
Phone: -
drbehzadijalal@yahoo.com

Article History
Received: October 22, 2024
Accepted: December 11, 2025
ePublished: December 17, 2025

ABSTRACT

Aims The aim of this study was to determine the salinity line and delineate the boundary between the saline water of the Caspian Sea and the groundwater resources of Guilan Province by utilizing concentration-increasing elements and the empirical relationships of Herzberg and Warwich. Furthermore, the study sought to identify and zone the critical areas of saltwater intrusion in coastal aquifers, particularly in the eastern part of the province.

Methodology This applied research examined hydrogeochemical data from 127 piezometric wells distributed across four basins in Guilan Province. Parameters including Total Dissolved Solids (TDS), Total Hardness (TH), sodium (Na), chloride (Cl), and sulfate (SO_4) were analyzed over a 20-year period (2002–2022). Zonation maps were generated using interpolation and kriging methods within a GIS environment. A composite map of the influencing elements was then produced and compared with the electrical conductivity (EC) map. The empirical relationships of Herzberg and Warwich were applied to determine the depth and extent of saltwater intrusion.

Findings The largest critical area was associated with chloride, covering approximately 5,541.989 km^2. The highest concentrations of elements and groundwater salinity were observed in eastern Guilan, particularly in the Chamkhaleh–Chaf coastal zone. The composite elements map (with a critical area of approximately 2,035.44 km^2) demonstrated a complete correspondence between the salinity line and the triangular region in the eastern part of the province. Salinity decreased progressively from the coastline toward the mountainous areas.

Conclusion Saltwater intrusion is more severe in the coastal aquifers of eastern Guilan compared to other regions. The most significant factors influencing the advancement of salinity include Total Dissolved Solids (TDS), Total Hardness (TH), sodium, and sulfate.

Keywords Caspian Sea Water Density; Influencing Elements; Groundwater Salinity; Salinity Degree

CITATION LINKS

[Ahmadpour *et al.*, 2010] Investigation of groundwater salinity in Guilan province in terms of agricultural uses with respect to electrical conductivity (EC) and two ...; [Ansarifar *et al.*, 2019] The impact of climate change on the content and spatial distribution of the total ...; [Chui & Ang, 2017] High tolerance to temperature and salinity change should enable scleractinian coral Platygyra acuta from marginal ...; [Colombani *et al.*, 2016] Impact of climate ...; [Edet *et al.*, 2011] Groundwater chemistry ...; [El Assaoui *et al.*, 2021] Impacts of climate change on Moroccan's groundwater ...; [Halabian & Khneifer, 2016] Investigating the effect of precipitation fluctuations on the discharge of ...; [Isazadeh *et al.*, 2017] Support vector machines and feed-forward neural networks ...; [Jafarzadeh *et al.*, 2019] Impact assessment of climate change on groundwater table using of ...; [Jahanshahi *et al.*, 2007] Management of exploitation of the southeastern coastal aquifer of Maharloo Lake in order ...; [Jamei & Ghafouri, 2008] Modeling saltwater intrusion to evaluate ...; [Kamali-Muskan & Afzali, 2019] Effect of irrigation with different salinities on some soil characteristics and ...; [Karami Khaniki & Gharib Reza, 2005] Reclamation and restoration of deltaic lands using tidal ...; [Khayyat *et al.*, 2012] Prediction of groundwater level in Birjand plain using neural-fuzzy ...; [Le *et al.*, 2018] Predicting current and future background ion concentrations ...; [Mazandaranizadeh *et al.*, 2019] Optimization of drainage design parameters with the aim of ...; [Mengistu *et al.*, 2021] Climate change impacts on water resources in the ...; [Navari & Ataei Ashtiani, 2006] Studying the effect of rising sea levels on saltwater intrusion in coastal aquifers: A case study ...; [Nematollahi *et al.*, 2018] Preliminary assessment of groundwater hydrogeochemistry ...; [Piran Qarni Namin *et al.*, 2018] Effect of geological formation on the ...; [Rezaei *et al.*, 2010] Investigation the spatial variability of som ...; [Seif *et al.*, 2018] Studying the impact of climate change on the discharge of the Kashf Rud River Basin ...; [Sharma *et al.*, 2017] Evaluation of groundwater quality and suitability for irrigation and drinking purposes ...; [Suarez, 1989] Impact of agricultural ...; [Volodina & Sokolova, 2007] Changes in the salt status of meadow-chestnut soils under the impact ...; [Zeinali & Asghari-Saraskanroud, 2012] The investigation of coastline changes in Urmia Lake water level and its ...; [Zeydalinejad *et al.*, 2020] Simulation of karst aquifer water level under climate change ...; [Zou *et al.*, 2018] Divergent trends of open-surface water body area in the ...;

Copyright© 2025, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تعیین خط شوری در آب‌های زیرزمینی استان گیلان

جلال بهزادی* PhD
گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

چکیده

اهداف: هدف این مطالعه تعیین خط شوری و مرز بین آب شور دریای خزر و آب‌های زیرزمینی استان گیلان با استفاده از عناصر موثر بر افزایش غلظت و روابط تجربی هرزبرگ و ورویچ بود. همچنین تلاش شد محدوده‌های بحرانی نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی به‌ویژه در شرق استان شناسایی و پهنه‌بندی شوند.

روش‌شناسی: این پژوهش از نوع کاربردی بوده و داده‌های هیدروژئوشیمی ۱۲۷ حلقه چاه پیزومتری در چهار حوضه استان گیلان بررسی شد. عناصر شامل کل جامدات محلول، سختی کل، سدیم، کلر و سولفات در یک دوره ۲۰ساله (۱۴۰۱-۱۳۸۱) تحلیل شدند. نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از روش‌های درون‌یابی و کریجینگ در محیط GIS تهیه گردید. سپس نقشه تلفیقی عناصر تولید و با نقشه هدایت الکتریکی مقایسه شد. برای تعیین عمق و پیشروی آب شور از روابط تجربی هرزبرگ و ورویچ استفاده گردید.

یافته‌ها: بیشترین محدوده بحرانی مربوط به عنصر کلر با مساحت حدود ۹۸۹/۵۵۴۱ کیلومتر مربع بود. بیشترین تمرکز عناصر و شوری آب زیرزمینی در شرق گیلان و محدوده چمخاله تا چاف مشاهده شد. نقشه تلفیقی عناصر (با مساحت بحرانی حدود ۲۰۳۵/٤٤ کیلومتر مربع) انطباق کامل خط شوری با ناحیه مثلثی شرق استان را نشان داد. شوری از ساحل به سمت کوهستان کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: نفوذ آب شور در آبخوان‌های ساحلی شرق گیلان شدیدتر از سایر مناطق است. مهم‌ترین عوامل موثر بر پیشروی شوری شامل کل مواد جامد محلول، سختی کل، سدیم و سولفات هستند.

کلیدواژگان: چگالی آب دریای خزر، عناصر تاثیرگذار، شوری آب زیرزمینی، درجه شوری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰

*نویسنده مسئول: drbehzadijalal@yahoo.com

مقدمه

نفوذ آب دریا (Sewater intrusion) یک مساله جهانی است؛ با افزایش تقاضا برای آب شیرین در مناطق ساحلی خصوصاً آب‌های زیرزمینی باعث تهدید جدی آلودگی و مداوم شوری می‌شود. مساله‌ای که اکثر مناطق جهان را در آینده نه‌چندان دور وارد ابعاد تازه‌ای از چالش می‌کند کاهش منابع آب با توجه به مساله تغییر اقلیم جهانی است [Halabian & Khneifer, 2016]. *کرمی خانیکی* و *غریب رضا* به مطالعه بازیافت و احیای اراضی دلتایی با استفاده از سدهای جزر و مدی پرداخته‌اند. این مطالعه نشان داده است که در شبیه‌سازی عددی هجوم آب شور در آبخوان‌های ساحلی، با احداث سد زیرزمینی تا حد زیادی می‌توان از نفوذ و هجوم آب دریا جلوگیری نمود [Karami Khaniki & Gharib Reza, 2005]. *نواری* و *عطایی آشتیانی* به بررسی اثر افزایش آب دریا در پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی (آبخوان تالار بابل هراز) پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که ضرورت مطالعات در زمینه ضریب هدایت هیدرولیکی در آبخوان‌های ساحلی بسیار ضروری به نظر می‌رسد[Navari & Ataei Ashtiani, 2006] . *جهانشاهی* و همکاران نشان داده‌اند که آب شور کف آبخوان در اثر کاهش فشار تمایل دارد به سمت عمق‌های بالاتر سفره حرکت کند ولذا در کاهش کیفیت آب زیرزمینی سهیم است [Jahanshahi *et al.*, 2007]. *جامعی* و *غفوری* به مدل‌سازی تهاجم آب‌های شور به منظور ارزیابی روش‌های مدیریت منابع آب در آبخوان‌های ساحلی پرداخته‌اند و وضعیت خطوط هم غلظت شوری در فضایی دوبُعدی و نزدیک به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد، را ارایه نموده‌اند تا بتوان با پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان و اعمال مدیریت صحیح، از زایل‌شدن آب شیرین جلوگیری به عمل آورد [Jamei & Ghafouri, 2008]. در مقاله *احمدپور* و همکاران آب‌های زیرزمینی استان گیلان از نظر مصارف کشاورزی و به منظور آبیاری با توجه به هدایت الکتریکی (EC) و دو پارامتر شوری موثر و شوری بالقوه تعیین وضعیت شده‌اند؛ در مناطق مرکزی متمایل به شرق، شامل شهرهای رشت، آستانه و لاهیجان از نظر ریسک شوری (شوری موثر و شوری بالقوه) در محدوده متوسط، یعنی ۳ تا ۱۵ میلی‌مول بر لیتر قرار دارند که هشداری برای منابع آب زیرزمینی است. آنها به این نتیجه رسیده‌اند میزان هدایت الکتریکی در شرق و برخی قسمت‌های دیگر استان گیلان موجب کاهش عملکرد برخی محصولات زراعی نظیر برنج می‌شود [Ahmadpour *et al.*, 2010]. *رضایی* و همکاران در بررسی تغییرات مکانی، شاخص برخی کیفیت‌های آب‌های زیرزمینی استان گیلان را با استفاده از زمین‌آمار نشان داده‌اند SAR از نظر شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی استان در مجموع مناسب است ولی از نظر هدایت الکتریکی، کیفیت آب‌های زیرزمینی استان خصوصاً در مناطق مرکزی و متمایل به شرق هم‌جوار با دریا پایین بوده و می‌تواند پایداری تولید برنج را به خطر اندازد [Rezaei *et al.*, 2010]. *سیف* و همکاران، در پژوهش خود به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی حوضه رودخانه کشف رود و تامین آب شرب مشهد پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش اتفاقات محتمل پیش رو در ارتباط با منابع تامین شرب مشهد را برای آینده روشن نموده و می‌تواند در برنامه‌ریزی صحیح در ارتباط با تامین و نیاز آینده شهر نقش بسیار موثری را از خود ارایه دهد [Seif *et al.*, 2018]. *مازندرانی‌زاده* و همکاران [Mazandaranizadeh *et al.*, 2019] در مطالعه خود برای کاهش خسارت محیط زیستی ناشی از اجرای طرح‌های زهکشی، به این نتیجه رسیده‌اند که زهکش‌ها ادوات و تجهیزات می‌بایست در حداقل عمق مجاز قرار داده شوند. *کمالی مسکونی* و *افضلی* تاثیر آبیاری با شوری مختلف بر برخی خصوصیات خاک عامل تجمع نمک (شهرستان خنج) مشخص نموده‌اند که شوری خاک عمدتاً تحت تاثیر کیفیت آب‌های آبیاری است و همچنین آبیاری با آب نامطلوب بر تغییر خصوصیات فیزیکی خاک تاثیرگذار است [Kamali-Muskan & Afzali, 2019]. *پیران قزنی نمین* و همکاران، در بررسی تاثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل نشان داده‌اند که خصوصیات شیمیایی

سازندهای زمین‌شناسی تاثیرگذارترین عامل بر کیفیت منابع آب زیرزمینی در منطقه هستند [Piran Qarni Namin *et al.*, 2018]. *خیاط* و همکاران پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت بیرجند را با استفاده از شبکه عصبی-فازی تحت تاثیر تغییر اقلیم بررسی کرده و نتایج حاکی از سیر نزولی و اُفت قریب به ۳/۵ متر در سطح آب زیرزمینی دشت بیرجند طی سال‌های آینده تا سال ۲۰۳۷ است [Khayyat *et al.*, 2012]. *زیدعلی‌نژاد* و همکاران شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان کارستی گستره لالی، استان خوزستان را بررسی و پیش‌بینی کرده‌اند سطح آب زیرزمینی بر اثر تغییر اقلیم در دوره آتی نسبت به دوره پایه کاهش یابد [Zeydalinejad *et al.*, 2020]. *جعفرزاده* و همکاران در مطالعاتشان اثرات تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل مفهومی بیلان را بررسی کردند و نشان دادند که سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند در بازه مطالعه‌شده با روندی نزولی مواجه خواهد گردید [Jafarzadeh *et al.*, 2019]. *انصاری‌فر* و همکاران در برآورد تاثیر تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی بر تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی بندرگز نشان داده‌اند سناریو بدبینانه موید آن است که در آینده نزدیک (سال ۲۰۴۰) بخش نسبتاً محدودی از آبخوان دچار کاهش تراز سطح آب زیرزمینی می‌شود. اما در آینده میانی (سال ۲۰۷۰) بخش گسترده‌ای از آبخوان با این مشکل مواجه خواهد بود و اُفت ۳ تا ۷ متر را تجربه خواهد کرد. همچنین در آینده دور (۲۱۰۰) کاهش تراز سطح آب در بخش‌های میانی آبخوان در محدوده ۱۰ تا ۱۳ متر خواهد بود [Ansarifar *et al.*, 2019]. *زینالی* و *اصغری سراسکانرود* در سال ۱۳۹۱ تغییرات خط ساحلی تراز آب دریاچه ارومیه و تاثیر آن بر شهرهای واقع در حوضه را بررسی و دریاچه ارومیه مشکلات عدیده‌ای را مخصوصاً برای شهرهایی که در اطراف دریاچه تا فاصله ۴۰کیلومتری آن قرار دارند، همچنین شهرهایی که دارای جهت باد غربی و جنوب غربی و در شرق دریاچه قرار دارند، به وجود آورده است [Zeinali & Asghari-Saraskanroud, 2012]. *عیسی‌زاده* و همکاران با مدل‌سازی تغییرات فضایی سه پارامتر کیفی آب زیرزمینی در استان گیلان نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی و SVM پیش‌بینی دقیق‌تری از سه پارامتر کیفی دیگر را تولید می‌کنند و SVM از عدم اطمینان کمتری نسبت به شبکه‌های عصبی برخوردار هستند [Isazadeh *et al.*, 2017]. در مطالعه خصوصیات کیفی آب‌های زیرزمینی نیجریه، مشخص شد که با توجه به اهداف کشاورزی و آبیاری، آب‌های زیرزمینی سفره‌های ساحلی علی‌رغم برخی از موارد شوری مشاهده‌شده بسیار عالی هستند [Edet *et al.*, 2011].

منگیستو و همکاران [Mengistu *et al.*, 2021] با پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم نشان‌داده‌اند افزایش میانگین دمای سالانه و کاهش بارندگی در اکثر نقاط حوضه اتفاق افتاده است. انتظار می‌رود چنین تغییراتی بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه تاثیر بگذارد. بیش از افزایش نفوذ آب دریا، افزایش سطح دریا می‌تواند تاثیرگذار باشد [Colombani *et al.*, 2016]. در پژوهش *له* و همکاران [Le *et al.*, 2018] از مدل RF برای پیش‌بینی تغییرات EC که احتمالاً برای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ در پاسخ به تغییرات آب و هوایی رخ می‌داد، استفاده شده است. *زو* و همکاران [Zou *et al.*, 2016] روندهای متفاوت حوض‌های آب سطحی در ایالات متحده از سال ۱۹۸٤ تا ۲۰۱٦ را مطالعه و مشخص نموده‌اند که تغییر سطح توده آب نشان از خشکسالی طولانی سال ۲۰۱۲، LWS در کالیفرنیا و دشت‌های بزرگ جنوبی و احتمالاً ناشی از برداشت‌های عظیم آب‌های زیرزمینی بوده است. *شارما* و همکاران [Sharma *et al.*, 2017] در بررسی‌ای که بر آب‌های زیرزمینی جنوب غربی پنجاب، هند با استفاده از روش هیدروشیمیایی انجام شد، نشان داده‌اند که در افق Al، Ca و Mg به عنوان ترکیبات کاملاً هیدراته‌شده با تبلور ضعیف جمع می‌شوند. *ولدینا* و *سوکولوا* [Volodina & Sokolova, 2007] تغییرات وضعیت نمک در خاک‌های علفزار-شاه بلوط تحت تاثیر آب‌های زیرزمینی شور با استفاده از مدل جریان مداوم رو به بالا و حرکت مویینگی صعودی آب‌های زیرزمینی را بررسی نموده‌اند. *سوارز* [Suarez, 1989] به بررسی شیمیایی و کیفیت آب زیرزمینی نیجریه پرداخت. اهداف کشاورزی و آبیاری و آب حاصل از آب‌های زیرزمینی شور از حوضه بنو و سفره‌های ساحلی و تاثیر روش‌های کشاورزی و زمین‌شناسی، شیمی زیرزمینی در شوری بسیار مهم است. *چوی* و *آنگ* معتقدند که تحمل زیاد مرجان‌ها در برابر تغییر دما و تغییر شوری باعث می‌شود تا مرجان اسکلراکتین در تغییر شرایط آب و هوایی آینده پایدار باشد [Chui & Ang, 2017]. *العساوی* و همکاران [El Assaoui *et al.*, 2021]، در پژوهشی دیگر به اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی بر رودخانه‌های مراکش پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که تغییرات اقلیم تاثیرات منفی بر منابع آب زیرزمینی مراکش را تشدید کرده است. در پژوهش *کلمبانی* و همکاران [Colombani *et al.*, 2016] بررسی تاثیر تغییرات آب و هوا بر شوری منابع آب ساحلی نشان می‌دهد که دلتای پو تا سال ۲۰۵۰ شوری قابل توجهی را تجربه خواهد کرد و علت اصلی آن شورشدن از طریق تصفیه آب‌های زیرزمینی شور است.

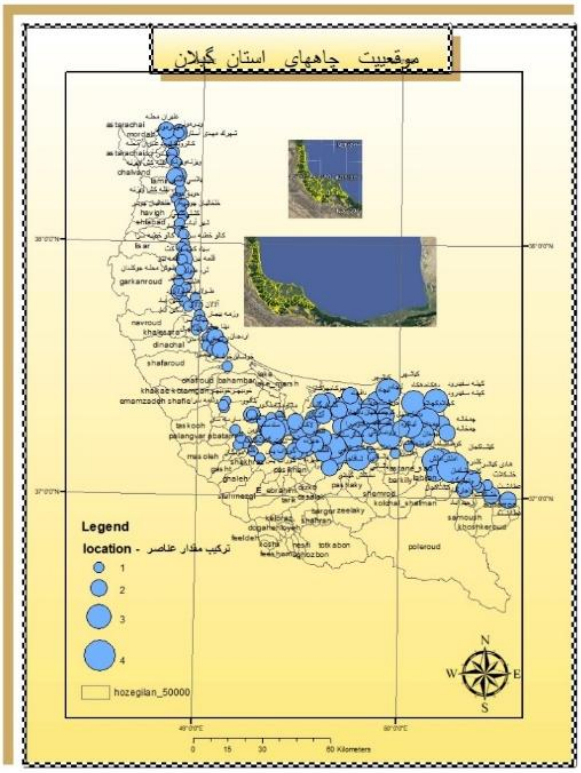
از آنجا که چگالی آب‌های زیرزمینی و آب شور دریا در برخی از نواحی ساحلی یکسان است، برای مشخص‌نمودن وضعیت آب زیرزمینی نسبت به آب دریا، حساسیت خاصی به وجود آمده است که در برخی نواحی به‌سختی می‌توان این مرز را جدا کرد. لذا سعی گردید با توجه به عناصر و عوامل بتوان این مرز را مشخص نمود. هدف از این پژوهش مشخص‌نمودن، وضعیت آب زیرزمینی نسبت به آب دریا است.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده که در سال ۱٤۰٤ در چهار حوضه استان گیلان شامل حوزه‌های شرقی، غربی، مرکزی و ارتفاعات جنوبی (لوشان منجیل) انجام شد. نمونه آب‌های زیرزمینی از ۱۲۷

حلقه چاه ایزومتریک به صورت سرشماری برای بررسی هیدروژئوشیمی جمع‌آوری شد.

استان گیلان در شمال کشور با طول جغرافیایی ۵۰/۳۵ تا ۴۸/۳۲ و عرض ۳۸/۲۷ تا ۳۶/۳۳ در شمال با دریای خزر، از شرق با استان مازندران، از جنوب با قزوین و در غرب با آذربایجان و اردبیل همسایه است. دارای مساحت ۱۳۷۹۰/۵ متر مربع است و از ۳ ناحیه جغرافیایی جلگه‌ای و کوهپایه‌ای و کوهستانی تشکیل شده است. ۲۹٪ اراضی زراعی، ۴۱٪ جنگلی و ۱۶٪ مرتعی هست. ایستگاه‌های جلگه‌ای براساس روش‌های طبقه‌بندی از نوع جنگل‌های پرباران و خیلی مرطوب و منابع آب خوب و منجیل از نوع نیمه‌خشک و استپی هست. وضعیت کوه البرز و دریای خزر و تیپ حرکت سیستم‌های غربی و ورود موج‌های مدیترانه‌ای و وجود هر سه تیپ بارشی در طول سال باعث اقلیم مرطوب و معتدل به خصوص در قسمت جلگه‌ای از نوع اقلیم مرطوب یا بسیار مرطوب شده است. عوامل اقلیمی و شرایط توپوگرافی (پستی و بلندی) منطقه، همچنین شکل هندسی دشت و عرض کم آن و در نتیجه فاصله کوتاه ارتفاعات با دریا و از طرفی بارندگی زیاد موجب جاری‌شدن رودخانه‌های فراوان و مسیرهای متعدد در این ناحیه شده است (شکل ۱).



شکل ۱) موقعیت چاه‌های استان گیلان

عناصر تاثیرگذار

برای مشخص‌نمودن شوری و درجات آن از روش شولر و عناصر تاثیرگذار بر آن در یک دوره ۲۰ساله از سال ۱۳۸۱ تا سال ۱۴۰۱ استفاده گردید که بیانگر کل جامدات محلول (Total Dissolved Solid: TDS) و سختی کل مجموع غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم موجود در آب (Total Hardness: TH) است. هرکدام از عناصر درون‌یابی و در چهار طبقه رده‌بندی و ارزش‌گذاری شد و از ترکیب تمام نقشه‌ها نقشه کل یا تلفیقی به‌دست آمد. EC در آبیاری آب‌هایی مناسب‌اند که هدایت الکتریکی آنها از ۰/۷۵ میلی‌موس یا ۷۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر کمتر باشد. در این خصوص هم، درون‌یابی و تولید نقشه انجام و نقشه عناصر و تلفیقی با نقشه EC مقایسه شد. اهمیت کار در این است محدوده بحرانی استان گیلان مشخص و عملیات انجام شده و استفاده از فرمول‌ها در این محدوده نتایج بهتر و مناسب‌تری دارد.

قوانین تجربی

رابطه هرزبرگ

پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی یک فرآیند طبیعی است که به دلیل تفاوت در چگالی آب شور و آب شیرین اتفاق می‌افتد. این پیشروی از سمت آب دریا که حاوی آب شور است به سمت آبخوان‌های ساحلی که دارای آب شیرین است انجام می‌شود و یک پنجه پیشروی را ایجاد می‌نماید. بر اساس رابطه هرزبرگ اگر چگالی آب شور برابر ۱/۰۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و چگالی آب شیرین برابر یک گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد با برداشت یک متر از چاه‌ها ۴۰ متر به سمت ساحل نفوذ می‌کند (رابطه ۱).

رابطه ۱)

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

ورویچ

ورویچ نشان داد که در سفره آب‌های زیرزمینی همگن، سطح سفره آب و حد فاصل آب شور و شیرین به صورت زیر حالت سهمی دارند.

$$h_f = \sqrt{\frac{2\beta q x}{k(1+\beta)}}$$

$$h_s = -\sqrt{\frac{2qx}{\beta k(1+\beta)}} + \frac{1-\beta}{1+\beta}\frac{q^2}{\beta^2 k^2}$$

که در آن x فاصله نقطه مورد نظر تا ساحل دریا است و در جهت خشکی مثبت است. h_s عمق مرز مشترک آب شور و شیرین تا سطح دریا که به طرف بالا مثبت است. h_f ارتفاع سطح سفره آب زیرزمینی نسبت به سطح دریا، q مقدار جریان آب شیرین که در واحد طول به سمت دریا جریان دارد، β عبارت است از $\beta \frac{\rho_s-\rho_f}{\rho_f}$ =۰/۰۲۵ و K ضریب نفوذپذیری سفره است.

درون‌یابی از طریق GIS

مقادیر عناصر از خوب تا غیرقابل شرب رتبه‌بندی شدند و در محیط GIS در آیکون کریجینگ و idw، رتبه‌ها درون‌یابی و نقشه تولید گردید.

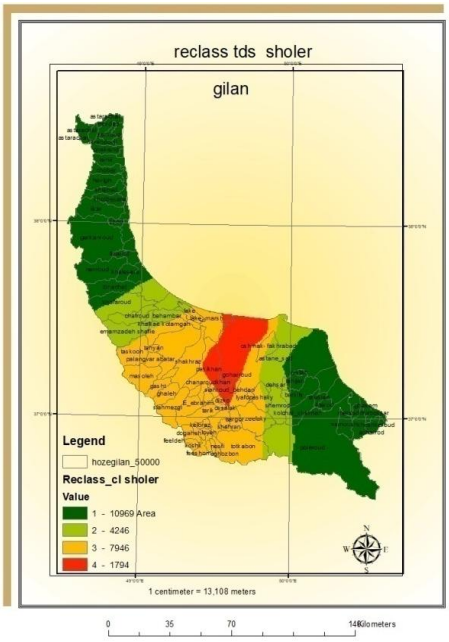
یافته‌ها

پراکندگی عناصر موجود در آب‌های زیرزمینی استان گیلان

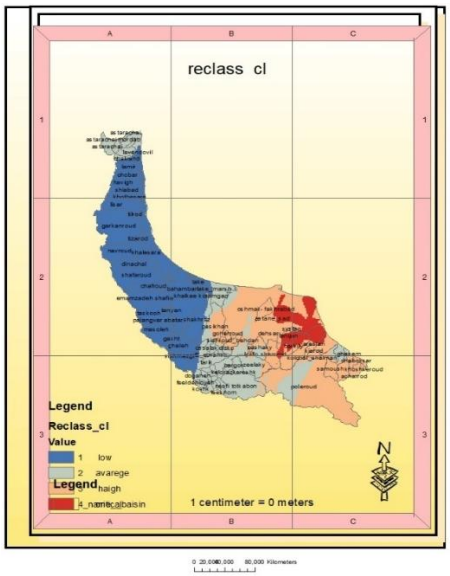
براساس رتبه‌بندی و درون‌یابی داده‌های عناصر تاثیرگذار، چهار طبقه برای رتبه‌های کم، متوسط و زیاد و بحرانی مشخص گردید. وسعت هرکدام از عناصر تاثیرگذار به لحاظ بحرانی روی نقشه برآورد گردید (شکل ۲). Cl با وسعت ۹۸۹/۵۵ km^2 بیشترین وسعت را در سواحل مرکز استان به سمت شرق گیلان در محدوده سفیدرود در بر داشت (جدول ۱).

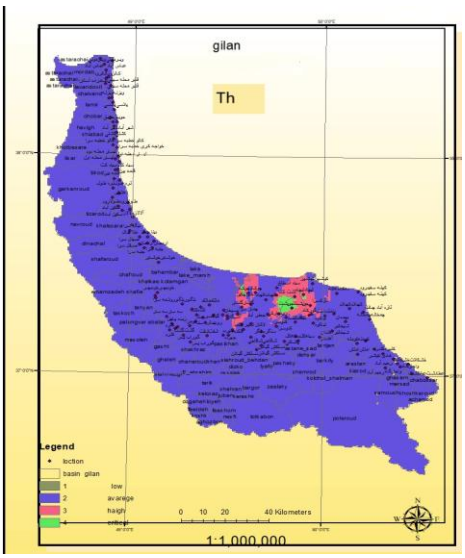
جدول ۱) مساحت محدوده بحرانی در نقشه عناصر و شرب آب‌های زیرزمینی استان گیلان

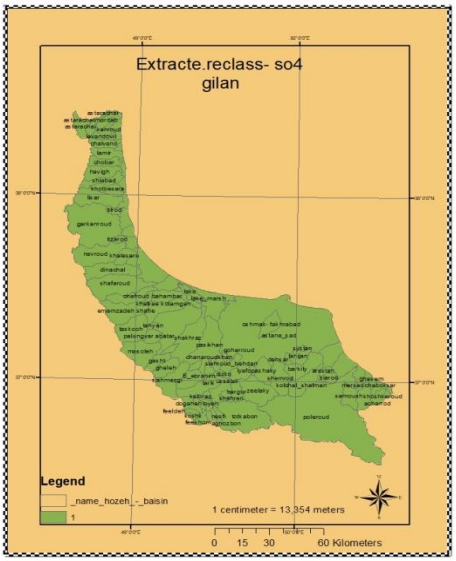
ردیف	عنصر	مساحت (km^2)
۱	total (Elements)	۲۰۳۵/۴۴
۲	Tds	۸۶۸/۱۲
۳	Th	۴۰۷/۳۶
۴	Na	۲۷۱/۸۴
۵	Cl	۹۸۹/۵۵
۶	So4	۳۱/۰۰

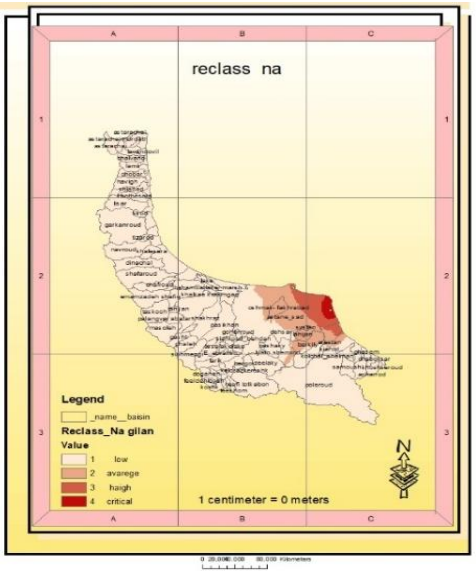


شکل ۲) عناصر تاثیرگذار



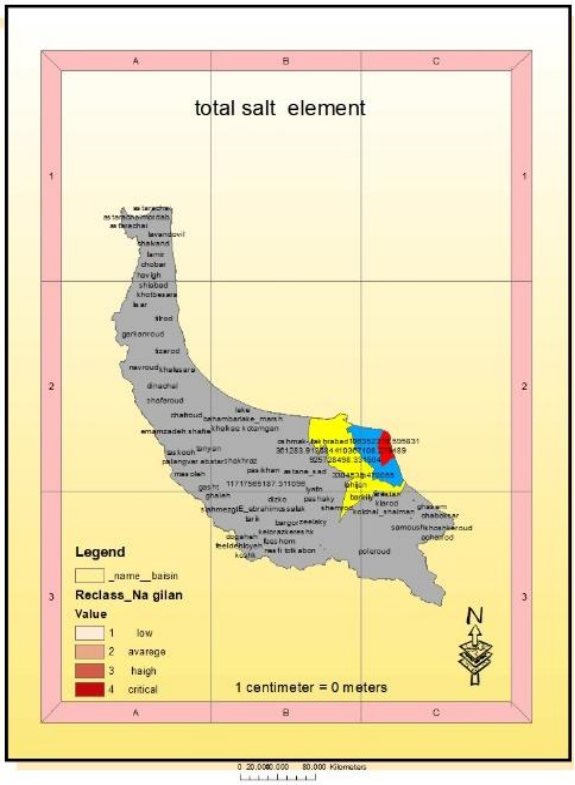




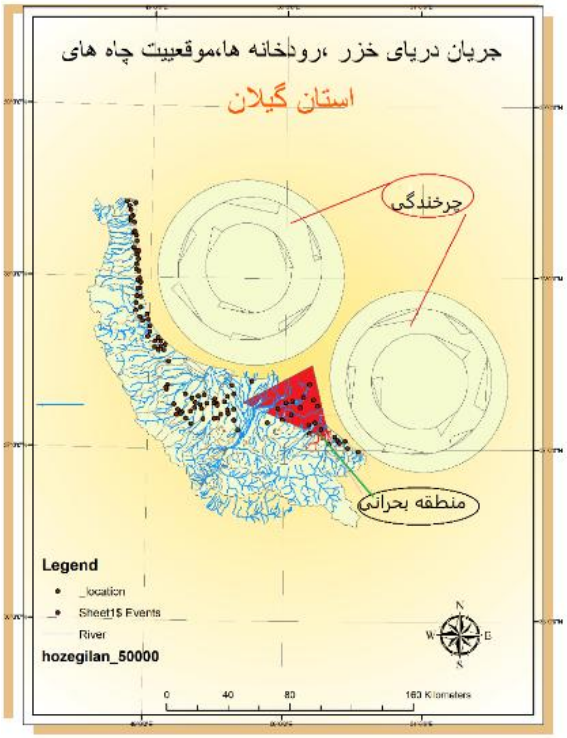


شکل ۳) نقشه تلفیقی عناصر تاثیرگذار

از ترکیب و تلفیق تمام نقشه‌ها، مقدار مساحت منطقه بحرانی ۲۰۳۵/٤٤ km^2 به‌دست آمد. خط شوری به صورت لکه‌هایی به رنگ آبی روشن مشخص گردیدند، گستره مناطق بحرانی تا کاملاً بحرانی بیشتر در سواحل شرق گیلان تمرکز دارد (شکل ۳).



شکل ۴) نقشه شرب استان گیلان



شکل ۵) نقشه جریانات آب دریای خزر و ایجاد مثلث

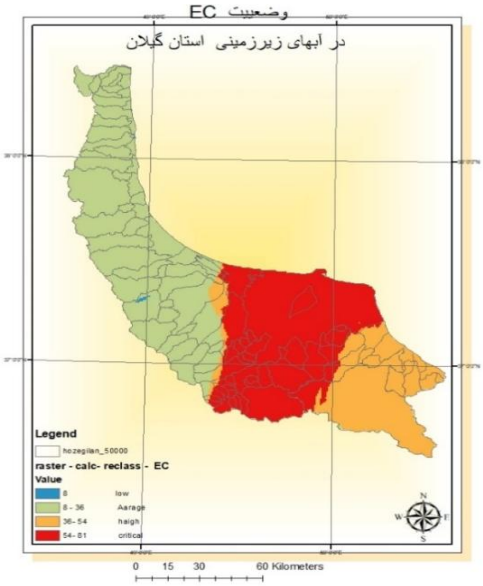
برای بالابردن دقت، خط شوری با نقشه Ec مقایسه گردید و مشخص شد که خطوط شوری با پراکنش بحرانی نقشه Ec مطابقت دارد. در بررسی‌های انجام‌شده بیشترین رابطه tds با Ec و کمترین رابطه را Na داشت و شدت رابطه از tds به Na کاهش یافت (Na، So4، Cl، Th، TDS). در رده‌بندی متوسط، زیاد و بحرانی، نقشه تلفیقی عناصر و محدوده مثلثی و قرمز رنگ (بحرانی Ec) بر هم منطبق بودند (شکل‌های ۴ و ۵).

بیشترین مساحت مربوط به عنصر Cl و کمترین مساحت مربوط به عنصر So4 است که تقریباً در مثلثی حایل بین دو جریان دریای خزر قرار دارد و با محدوده بحرانی عناصر انطباق دارد (شکل ۶).

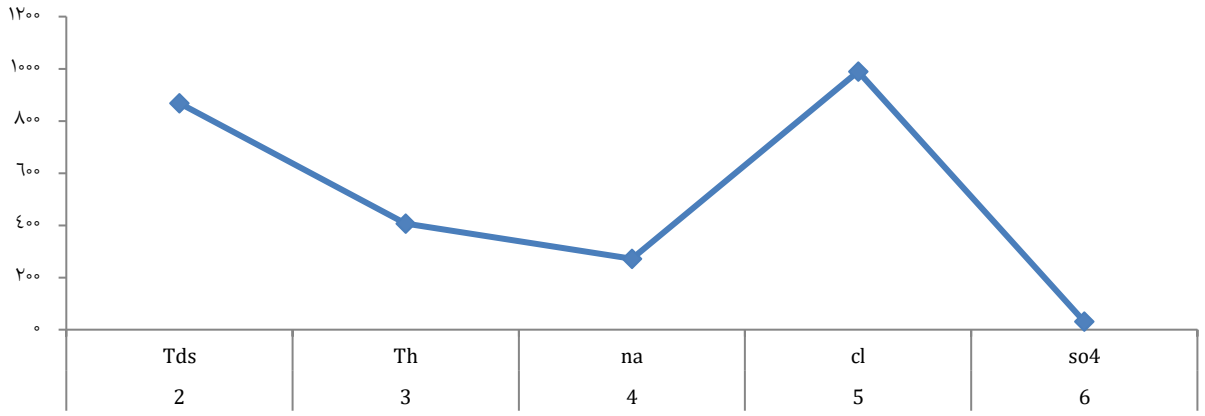
مساحت بحرانی برای آب شرب ۲۰۳۵ کیلومتر مربع از ساحل آستانه تا ساحل چابکسر بود و در داخل جلگه تقریباً شهرستان‌های لاهیجان، آستانه، لنگرود، رودسر، کلاچای و چابکسر را دربر می‌گرفت. برداشت آب زیرزمینی، خصوصاً در سواحل چاف و چمخاله برای شرب و کشاورزی مساله‌ساز بود و لکه آبی روشن در ساحل در محدوده مثلثی بسیار بحرانی ارزیابی شد.

هرزبرگ

مطابق با رابطه هرزبرگ، این پیشروی از سمت آب دریا که حاوی آب شور است به سمت آبخوان‌های ساحلی که دارای آب شیرین است انجام می‌شود و یک پنجه پیشروی را ایجاد می‌کند (شکل ۷). شیرین شدن آب دریای خزر توسط آب باران و رودخانه موجب کاهش چگالی آب دریا می‌شود، با آب‌های زیرزمینی بسیار نزدیک و مرز آب شور و شیرین به عمق سواحل کشیده می‌شود. در سواحل شرق گیلان خصوصاً محدوده مثلثی چگالی آب دریا در نزدیک ساحل این مقدار به ۱/۰۱۵ تا ۱/۰۱۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش می‌یابد. از امتزاج آب دریا و آب زیرزمینی در ساحل به دلیل کاهش غلظت آب دریا و بالارفتن غلظت در آب زیرزمینی خط شوری متفرق و پراکنده بود. با برداشت یک متر، نفوذ آب‌های شور به سفره‌های آب شیرین ساحلی تا ۱۰۰ متر ممکن خواهد بود.



شکل ۶) پراکنش EC در آب‌های زیرزمینی گیلان



شکل ۷) مساحت محدوده بحرانی در نقشه عناصر تاثیرگذار و نقشه شرب استان گیلان

تعیین سطح تماس آب شور و شیرین با استفاده از رابطه ورویچ

محدوده مطالعاتی جلگه ساحلی گیلان بود. نواحی مقاوم مربوط به مخروط‌افکنه‌های سفیدرود، لنگرود خان، پل‌رود، شلمان‌رود و خشک‌رود بود. بخش‌های میانی این مخروط‌افکنه‌ها دارای مقاومت ویژه ظاهری بیش از ۱۰۰ اهم‌متر بود که نشانگر رسوبات دانه‌درشت و حاوی آب شیرین است. محدوده چاف و چمخاله به لحاظ نهشته‌بودن از رسوبات دانه‌ریز و رسی حاوی آب شور را نشان می‌دهد، تنها حوالی چمخاله تحت تاثیر رودخانه لنگرود خان دارای مقاومت ویژه ۱۵۰ اهم‌متر بود، در بقیه پهنه جلگه مقاومت ویژه کمتر مشاهده گردید.

بحث

باتوجه به یکنواخت‌بودن چگالی آب دریا و آب زیرزمینی در برخی نواحی به‌سختی می‌توان مرز را تعیین نمود لذا سعی شد با توجه به عناصر و عوامل بتوان این مرز را مشخص کرد.

کمالی مسکونی و *افضلی* [Kamali-Muskan & Afzali, 2019] مشخص نموده‌اند که شوری خاک عمدتاً تحت تاثیر کیفیت آب‌های آبیاری است. در این مطالعه مشخص شد که با طبقه‌بندی شوری آب‌های زیرزمینی نقاطی با شوری زیاد، آبیاری مشکل‌آفرین و برداشت آب ممنوع است. *پیران قرنی نمین* و همکاران [Piran Qarni Namin *et al.*, 2018]، نشان داده‌اند که خصوصیات شیمیایی سازندهای زمین‌شناسی تاثیرگذارترین عامل بر کیفیت آب زیرزمینی است. در این پژوهش مشخص شد علی‌رغم وضعیت اقلیمی، سهل‌انگاری انسانی هم در مشکلات و بحران شوری آب زیرزمینی و شیرین‌ترشدن آب دریا موثر است. *زینالی* و *اصغری سراسکانرود* [Zeinali & Asghari-Saraskanroud, 2012] عنوان کرده‌اند دریاچه ارومیه مشکلات عدیده‌ای را مخصوصاً برای شهرهایی که در اطراف دریاچه تا فاصله ۴۰کیلومتری آن قرار دارند و همچنین برای شهرهایی که دارای جهت باد غربی و جنوبی هستند فراهم آورده است. در این مطالعه مشخص شد افزایش عناصر و هجوم آب دریا نقاط بیشتری از اطراف را دچار بحران خواهد نمود. *کرمی خانیکی* و *غریب رضا* [Karami Khaniki & Gharib Reza, 2005] با شبیه‌سازی عددی هجوم آب شور در آبخوان‌های ساحلی،نقش احداث سد زیرزمینی در جلوگیری از آن را نشان داده‌اند. در این مطالعه محدوده حداکثر شوری در آب زیرزمین مشخص شد. با وجود نوسان در خط شوری، می‌توان با الگوهایی مانند سد از شدت نفوذ جلوگیری نمود. *نواری* و *عطایی آشتیانی* [Navari & Ataei Ashtiani, 2006] به بررسی اثر افزایش آب دریا در پیشروی آب شور در آبخوان‌های ساحلی آبخوان تالار بابل هراز پرداختند. در اینجا سعی شد مرز بین آب دریا و آب زیرزمینی توسط خط شوری مشخص و در برخی نقاط به دلیل چگالی یکنواخت آب دریا و آب زیرزمینی این مرز و خط به‌هم‌ریخته بود که منجر به تخریب جبهه آب دریا با سفره آب زیرزمینی شد. *جامعی* و *غفوری* [Jamei & Ghafouri, 2008] عنوان کرده‌اند که با پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان و اعمال مدیریت صحیح، می‌توان از زایل‌شدن آب شیرین جلوگیری به عمل آورد و در این مبحث با مشخص‌شدن کیفیت آب زیرزمینی و شوری، محدوده طبقات از سمت کوه کم خطر (شیرین) به سمت مناطق ساحلی پر خطر (شور) را نشان می‌دهد. *عیسی‌زاده* و همکاران نشان داده‌اند که شبکه‌های عصبی و SVM پیش‌بینی دقیق‌تری از سه پارامتر کیفی دیگر را تولید می‌کنند و SVM از عدم اطمینان کمتری نسبت به شبکه‌های عصبی برخوردار هستند، با استفاده از نرم‌افزار GIS عناصر تاثیرگذار روی آب زیرزمینی رده‌بندی شده و نقشه تلفیقی نشان‌دهنده وضعیت عمومی آب‌های زیرزمینی است. بر همین اساس می‌توان وضعیت آینده را پیش‌بینی نمود [Isazadeh *et al.*, 2017]. *ادت* و همکاران با جمع‌آوری ترکیب و تجزیه و تحلیل داده‌های هیدروشیمیایی برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، به بررسی کیفیت و تعیین منابع یون‌ها پرداخته‌اند [Edet *et al.*, 2011]. در این مطالعه عناصر تاثیرگذار درون‌یابی شد و در چهار گروه ارزش‌گذاری شد و توان شوری آب زیرزمینی در نقاط مختلف استان گیلان نشان داده شد. در مقاله *احمدپور* و همکاران [Ahmadpour *et al.*, 2010] وضعیت آب با توجه به هدایت الکتریکی (EC) و دو پارامتر شوری موثر و شوری بالقوه به منظور آبیاری تعیین بررسی شد و در این تحقیق سعی شد نقشه EC با نقشه عناصر و نقشه کل عناصر مقایسه شود. نقشه هرکدام از عناصر و کل عناصر در خصوص شوری و

حداکثر شوری با نقشه EC همخوانی داشت.*رضایی* و همکاران با استفاده از زمین‌آمار نشان می‌دهند وضعیت استان از نظر شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی در مجموع مناسب است ولی از نظر هدایت الکتریکی، کیفیت آب‌های زیرزمینی استان هم‌جوار با دریا پایین بوده و می‌تواند پایداری تولید برنج را به خطر اندازد [Rezaei *et al.*, 2010]. در اینجا هدایت الکتریکی با عناصر مقایسه و مقدار شوری صحت‌سنجی شد و مناطقی که برای استفاده از آب زیرزمینی پرخطر هستند از انطباق نقشه‌ها مشخص گردید. *کمالی مسکونی* و *افضلی* [Kamali-Muskan & Afzali, 2019] مشخص نموده‌اند که شوری خاک عمدتاً تحت تاثیر کیفیت آب‌های آبیاری است. در این پژوهش با تعیین مقدار شوری به لحاظ مکانی، می‌توان تاثیرات آن بر خاک و کشاورزی و محیط زیست را بررسی نمود. *سوارز* [Suarez, 1989] معتقد است که روش‌های کشاورزی و زمین‌شناسی، شیمی آب بر روی آب حاصل از آب‌های زیرزمینی شور از حوضه بنو و سفره‌های ساحلی بسیار موثر و مهم است. در این مطالعه مشخص شد در نتیجه هجوم آب دریا به سمت سواحل و افزایش عناصر تاثیرگذار بر شوری و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی اراضی کشاورزی خصوصاً در مناطق ساحلی در خطر هستند. *کلمبانی* و همکاران [Colombani *et al.*, 2016] تاثیر تغییرات آب و هوا بر شوری منابع آب ساحلی را نشان می‌دهند که دلتای پو تا سال ۲۰۵۰ شوری قابل توجهی را تجربه خواهد کرد و علت اصلی آن شورشدن از طریق تصفیه آب‌های زیرزمینی شور است. در این پژوهش مشخص شد از یک طرف با پایین‌آمدن چگالی آب دریا به واسطه بارش و رودخانه‌ها و از طرف دیگر با افزایش عناصر و بالارفتن چگالی آب زیرزمینی از طریق فاضلاب‌ها خط شوری در عمق سواحل نفوذ کرده و تهدیدی جدی برای اقتصاد کشاورزی محسوب می‌شود. به نظر می‌رسد افزایش سطح دریا بیش از افزایش نفوذ آب دریا می‌تواند تاثیرگذار باشد. در این مطالعه مشخص شد عناصر تاثیرگذار به همراه هجوم دریا در تعیین خط شوری نقش دارند. *زو* و همکاران [Zou *et al.*, 2016] مشخص نموده‌اند که تغییر سطح آب نشان از خشکسالی طولانی‌مدت کالیفرنیا و دشت‌های بزرگ جنوبی داشته و احتمالاً ناشی از برداشت‌های عظیم آب‌های زیرزمینی هم می‌تواند باشد. در این مطالعه مشخص شد با استعدادی که سواحل شرق استان دارند اگر با خشکسالی همراه باشد، با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی خط شوری به‌مراتب نفوذ بیشتری در سواحل خواهد داشت. *نعمت‌اللهی* و همکاران [Nematollahi *et al.*, 2018] قبل از استفاده از آب زیرزمینی، نظارت بیشتر بر شیوه‌های مدیریت را توصیه نموده‌اند. در این مطالعه عدم رعایت مدیریت و مهندسی آب‌های زیرزمینی و سطحی منجر به بحران و نفوذ خط شوری در عمق سواحل شد. در پژوهش *العساوی* و همکاران [El Assaoui *et al.*, 2021]، تغییرات اقلیم تاثیرات منفی بر منابع آب زیرزمینی مراکش را تشدید کرده است. به طور مشابهی مشخص شد که با پیامدهای اقلیمی مانند خشکسالی شرایط بحرانی‌تر خواهد شد.

پیشنهاد می‌شود آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش جلگه‌ایی کنترل و به نحو مطلوب استفاده شود تا به سمت دریا هرز نرود و باعث کاهش چگالی آب دریا وکاهش شوری نشود. از طرف دیگر باید از افزایش آلودگی و افزایش غلظت آب زیرزمینی جلوگیری نمود تا چگالی آب دریا با سفره‌های زیرزمینی یکنواخت نگردد، تا مرز حفظ و بحران در جلگه و دریا افزایش نیابد. ولی به دلیل نبود برنامه مدیریتی و مهندسی جامع و یکپارچه، این بحران رو به افزایش است.

نتیجه‌گیری

پیشروی آب شور در آبخوان‌ها در برخی مقاطع بیشتر از سایر مقاطع است و مهمترین عوامل تاثیرگذار بر شوری آبخوان‌ها شامل کل مواد جامد محلول در آب، سختی کل آب و عناصر کلسیم، سدیم و یون سولفات است. براساس رده‌بندی عناصر، بحرانی‌ترین محدوده‌ها در شرق گیلان و سواحل شرقی استان قرار دارد.

تشکر و قدردانی: از دکتر پاپلی استاد گرامی نهایت تشکر وسپاس را دارم که این جانب را راهنمایی و هدایت نمودند.

تاییدیه اخلاقی: موردی وجود ندارد.

تعارض منافع: موردی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: جلال بهزادی تمام امور مقاله را انجام داده است (۱۰۰٪)

منابع مالی: این پژوهش با هزینه شخصی نویسنده انجام شده و هیچ حمایت مالی دریافت نکرده است.

منابع

- Ahmadpour H, Khaledian MR, Ashrafzadeh A, Rezaei M (2010). Investigation of groundwater salinity in Guilan province in terms of agricultural uses with respect to electrical conductivity (EC) and two parameters effective salinity (ES) and potential salinity. Water and Soil Journal. 5(24):932-941. [Persian]
- Ansarifar MM, Salarijazi M, Ghorbani K, Kaboli AR (2019). The impact of climate change on the content and spatial distribution of the total dissolved solids in Bandar-e-Gaz coastal aquifer. Geography and Environmental Sustainability. 9(31):83-95. [Persian]
- Chui APY, Ang P Jr (2017). High tolerance to temperature and salinity change should enable scleractinian coral Platygyra acuta from marginal environments to persist under future climate change. PLoS One. 12(6):e0179423.
- Colombani N, Osti A, Volta G, Mastrocicco M (2016). Impact of climate change on salinization of coastal water resources. Water Resources Management. 30(7):2483-2496.
- Edet A, Nganje TN, Ukpong AJ, Ekwere AS (2011). Groundwater chemistry and quality of Nigeria: A status review. African Journal of Environmental Science and Technology. 5(13):1152-1169.
- El Assaoui N, Sadok A, Merimi I (2021). Impacts of climate change on Moroccan's groundwater resources: State of art and development prospects. Materialstoday. 45(8):7690-7696.
- Halabian AH, Khneifer Z (2016). Investigating the effect of precipitation fluctuations on the discharge of the Plasjan

Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. Journal of Hydrology. 592:125614.
- Navari M, Ataei Ashtiani B (2006). Studying the effect of rising sea levels on saltwater intrusion in coastal aquifers: A case study of the Babol Hall aquifer in Haraz. Proceedings of the 7th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures. Tehran: CIVILICA. [Persian]
- Nematollahi MJ, Clark MJR, Ebrahimi P, Ebrahimi M (2018). Preliminary assessment of groundwater hydrogeochemistry within Gilan, a northern province of Iran. Environmental Monitoring and Assessment. 190(4):242.
- Piran Qarni Namin S, Javid AH, Ghodousi J (2018). Effect of geological formation on the quality of groundwater (Case study: Ardebil Plain). Journal of Environmental Science and Technology. 20(3):1-10. [Persian]
- Rezaei M, Davatgar N, Tajdari K, Abolpour B (2010). Investigation the spatial variability of som important groundwater quality factors in Guilan, Iran. Water an Soil Journal. 24(5): 465-487.
- Seif A, Moridi A, Khazaiepool A (2018). Studying the impact of climate change on the discharge of the Kashf Rud River Basin and the supply of drinking water in Mashhad. Proceedings of the 1st Conference on the Use of Soil and Water Management Tools (SWAT) in the Management of the Country's Water Resources. Isfahan: CIVILICA. [Persian]
- Sharma DA, Rishi MS, Keesari T (2017). Evaluation of groundwater quality and suitability for irrigation and drinking purposes in southwest Punjab, India using hydrochemical approach. Applied Water Science. 7(6):3137-3150.
- Suarez DL (1989). Impact of agricultural practices on groundwater salinity. Agriculture, Ecosystems & Environment. 26(3-4):215-227.
- Volodina IV, Sokolova TA (2007). Changes in the salt status of meadow-chestnut soils under the impact of saline groundwater in a model experiment. Eurasian Soil Science. 40(8):839-849.
- Zeinali B, Asghari-Saraskanroud S (2012). The investigation of coastline changes in Urmia Lake water level and its impact on the urban of its basin. Urban Ecology Researches. 3(6):103-116. [Persian]
- Zeydalinejad N, Nassery HR, Shakiba AR, Alijani F (2020). Simulation of karst aquifer water level under climate change in Lali region, Khouzestan province, SW Iran. Nivar. 44(108-109):102-114. [Persian]
- Zou Z, Xiao X, Dong J, Qin Y, Doughty RB, Menarguez MA, et al (2018). Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. Proceedings of the National Academy of Sciences. 115(15):3810-3815.
River (case study: Eskandari Station). Proceedings of the 2nd National Conference on Geography and Planning, Architecture and Modern Urbanism. Qom: CIVILICA. [Persian]
- Isazadeh M, Biazar SM, Ashrafzadeh A (2017). Support vector machines and feed-forward neural networks for spatial modeling of groundwater qualitative parameters. Environmental Earth Sciences. 76(17):610.
- Jafarzadeh A, Khashaei-Siouki A, Shahidi A (2019). Impact assessment of climate change on groundwater table using of balance conceptual model (Case study: Birjand Plain). Water Resources Engineering. 12(41):1-16. [Persian]
- Jahanshahi R, Zare M, Raisi E (2007). Management of exploitation of the southeastern coastal aquifer of Maharloo Lake in order to prevent salinization of pumping wells (groundwater). Proceedings of the 5th Iranian Conference of Engineering Geology and the Environment. Tehran: CIVILICA. [Persian]
- Jamei M, Ghafouri HR (2008). Modeling saltwater intrusion to evaluate water resources management methods in coastal aquifers. Proceedings of the 3rd Iran Water Resources Management Conference. Tabriz: CIVILICA. [Persian]
- Kamali-Muskan E, Afzali SF (2019). Effect of irrigation with different salinities on some soil characteristics and salt concentration factor (Case study: Bighard, Khonj). Journal of Environmental Science and Technology. 21(4):141-152. [Persian]
- Karami Khaniki A, Gharib Reza MR (2005). Reclamation and restoration of deltaic lands using tidal dams (case study of Zohreh River Delta). Proceedings of the 3rd Erosion and Sediment National Conference. Tehran: CIVILICA. [Persian]
- Khayyat A, Amirabadizadeh M, Pourreza Bailandi M, Khozeimenejad H (2012). Prediction of groundwater level in Birjand plain using neural-fuzzy network under the influence of climate change. Journal of Aquifer and Qanat. 2(1):38-51. [Persian]
- Le TDH, Kattwinkel M, Schützenmeister K, Olson JR, Hawkins CP, Schäfer RB (2018). Predicting current and future background ion concentrations in German surface water under climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B. 374(1764):20180004.
- Mazandaranizadeh H, Zavash Pargo R, Daneshkar-Arasateh P (2019). Optimization of drainage design parameters with the aim of reducing environmental damage in steady-state conditions. Journal of Environmental Science and Technology. 21(6):155-165. [Persian]
- Mengistu D, Bewket W, Dosio A, Panitz HJ (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper