پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مدیریت آبیاری قطره‌ای در دشت بردسیر

هادی کریمی[1]، نادر کوهی چله کران[2]، رضا پورواعظی روکرد[3]*

۱- * استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

۲- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

۳- کارشناس تحقیقات بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

Email: h_karimi@areeo.ac.ir

چکیده

کیفیت آب‌های زیرزمینی یکی از عوامل تعیین‌کننده در پایداری عملکرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای است، زیرا رسوب‌گذاری یا خورندگی آب می‌تواند موجب انسداد قطره‌چکان‌ها و کاهش یکنواختی توزیع آب گردد. هدف این پژوهش ارزیابی پتانسیل رسوب‌گذاری آب زیرزمینی با استفاده از شاخص اشباع لانژیلر (LSI) و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر برای مدیریت پیشگیرانه سامانه‌های آبیاری است. بدین منظور از ۳٤ حلقه چاه کشاورزی نمونه‌برداری و پارامترهای سدیم، پتاسیم، کلراید، بیکربنات، کربنات، سولفات، کلسیم، منیزیم، pH، هدایت الکتریکی (EC)، TDS ، TSS و SAR اندازه‌گیری شد. پس از محاسبه لانژیلر، نقشه توزیع مکانی آن با روش درون‌یابی فاصله وزنی معکوس تهیه گردید. نتایج نشان داد بخش قابل‌توجهی از منطقه دارای لانژیلر مثبت و مستعد رسوب کربنات کلسیم است که خطر گرفتگی قطره‌چکان‌ها را افزایش می‌دهد. بر اساس نقشه تولیدی، راهکارهای مدیریتی شامل انتخاب فیلتر مناسب، اسیدشویی دوره‌ای و اصلاح طراحی سامانه پیشنهاد شد. استفاده از این روش پیش از احداث سیستم آبیاری می‌تواند هزینه نگهداری را کاهش داده و طول عمر سامانه را افزایش دهد.

واژه های کلیدی: رسوب‌گذاری، شاخص لانژیلر، قطره‌چکان، رسوب کربنات کلسیم، درون‌یابی مکانی

بیان مسئله

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با توجه به افزایش تقاضا برای تولیدات کشاورزی و محدودیت منابع آبی، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی اهمیت بسزایی دارد. این آب‌ها به عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب، مصارف صنعتی و کشاورزی، نیازمند ارزیابی کیفی دقیق به منظور مدیریت بهینه منابع آبی می‌باشند (۱). نظر به اینکه رسوبات یا تغییرات شیمیایی می‌توانند سبب انسداد تدریجی مسیرهای کوچک سامانه‌های آبیاری قطره‌ای گردند (۲)، توسعه این سیستم‌ها به عنوان یک راهکار مؤثر در راستای ارتقای بهره‌وری آب، به طور قابل‌توجهی به کیفیت آب مورد استفاده در آبیاری وابسته است (۳). به طوری که در بسیاری از آب‌های زیرزمینی، حضور یون‌های کلسیم و بی‌کربنات می‌تواند در شرایط تغییر فشار و دما منجر به تشکیل رسوب کربنات کلسیم در لوله‌ها شود (٤). از سوی دیگر، آب‌های دارای خاصیت خورندگی موجب تخریب اتصالات فلزی و کاهش عمر تجهیزات می‌شوند (٥). بنابراین ارزیابی هم‌زمان رفتار رسوب‌گذاری و خورندگی پیش از اجرای سیستم آبیاری ضروری است.

شاخص‌های متعددی به منظور ارزیابی کیفیت آب آبیاری، علاوه بر pH و EC، توسعه یافته‌اند. از جمله این شاخصها میتوان به شاخص کیفیت آب آبیاری ، نسبت جذب سدیم، نسبت کلی و سایر شاخصهای ترکیبی اشاره نمود که با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی، امکان نمایش توزیع مکانی کیفیت آب را فراهم می‌آورند (٦). مطالعات نوین حاکی از آن است که ادغام این شاخص‌ها با تکنیک‌های نقشه‌برداری مکانی نظیر درون‌یابی به روش عکس فاصله، ابزاری کارآمد در راستای پیش‌بینی پراکنش کیفیت آب زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای، به‌ویژه در زمینه مدیریت منابع آب و طراحی سیستم‌های آبیاری به شمار می‌رود (۷). شاخص اشباع لانژیلر (LSI)، با مبنا قرار دادن تعادل شیمیایی کربنات کلسیم، پتانسیل آب در ایجاد رسوب یا خوردگی را تعیین نموده و بدین ترتیب، ریسک انسداد یا آسیب ناشی از خوردگی در تجهیزات آبیاری را پیش‌بینی می‌نماید. LSI به طور خاص، نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف pH آب از pH اشباع آن با کربنات کلسیم است. مقدار LSI مثبت نشان می‌دهد که آب فوق اشباع است و تمایل به رسوب‌گذاری دارد، در حالی که مقدار LSI منفی حاکی از این است که آب غیر اشباع بوده و خاصیت خورندگی دارد. LSI صفر نشان‌دهنده‌ی تعادل است (۸).

نظر به تغییرات مکانی کیفیت آب و محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری دقیق، استفاده از روش‌های زمین‌آماری جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر، ابزاری مدیریتی اثربخش خواهد بود. پژوهش حاضر با هدف تهیه نقشه خطر مرتبط با عملکرد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای بر اساس شاخص LSI و ارائه راهکارهای مدیریتی بهینه برای طراحی و نگهداری این سیستم‌ها در دشت بردسیر به انجام رسیده است.

معرفی دستاورد

منطقه مورد مطالعه در اقلیم خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد که میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر و تبخیر-تعرق سالانه بالا (بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر) دارد. کشاورزی منطقه عمدتاً متکی بر منابع آب زیرزمینی بوده و بهره‌برداری مداوم از چاه‌ها موجب نگرانی درباره افت سطح آب و تغییر کیفیت شیمیایی آن شده است. از نظر زمین‌شناسی، آبخوان منطقه عمدتاً از رسوبات آبرفتی کواترنری تشکیل شده و ترکیب لیتولوژیکی آن شامل ماسه، سیلت و لایه‌های رسی است که بر کیفیت شیمیایی آب اثرگذار هستند. به منظور پوشش کامل محدوده آبخوان، نمونه‌برداری از ۳٤ حلقه چاه کشاورزی (شکل ۱) صورت گرفت. موقعیت جغرافیایی چاه‌ها با استفاده از دستگاه پرتابل GPS ثبت گردید.

شکل ۱- پراکنش مکانی چاه‌های نمونه‌برداری شده

نمونه‌ها در بطری‌های پلی‌اتیلنی یک لیتری جمع‌آوری شدند. سازمان حفاظت از آب‌وهوا آمریکا تأکید می‌کند که نمونه‌برداری باید پس از رسیدن پارامترهای فیزیکی-شیمیایی آب به پایداری انجام شود. پمپاژ به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه (یا بیشتر بسته به دبی و مشخصات چاه) یکی از روش‌های رایج برای رسیدن به این پایداری است (۹). در این پژوهش به منظور حصول اطمینان از بازنمایی مناسب نمونه‌ها از آبخوان، پیش از نمونه‌برداری، چاه آب به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه پمپاژ گردید (شکل ۲). نمونه‌ها در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد نگهداری و ظرف مدت ۲٤ ساعت به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، پارامترهای سدیم، پتاسیم،کلراید، بیکربنات، کربنات، سولفات، کلسیم، منیزیم، PH، هدایت الکتریکی (EC)،TDS، TSS و SAR اندازه‌گیری و

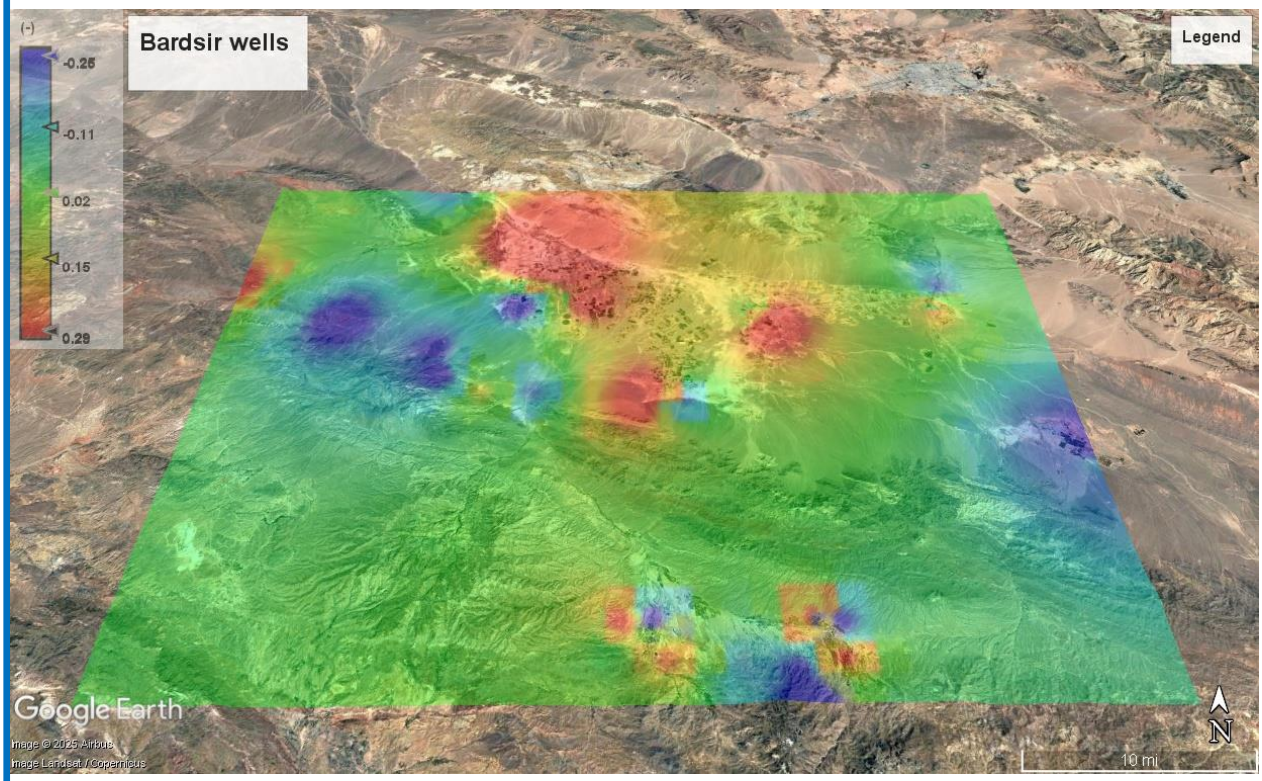
شاخص لانژیلر (LSI) بر اساس اختلاف pH اندازه‌گیری‌شده و pH تعادلی محاسبه شد. به‌منظور تعیین pH تعادلی، از معادلات موجود در استاندارد ASTM D3739 استفاده شد.

نتایج نشان داد که میانگین شاخص لانژیلر در این ۳٤ حلقه چاه برابر با ۰/۰۲ است. این بدان معناست که به طور متوسط، آب این چاه‌ها تمایل کمی به رسوب‌گذاری دارد. با این حال، دامنه تغییرات شاخص لانژیلر در بین چاه‌ها قابل توجه است. حداکثر مقدار LSI مشاهده شده در این بررسی برابر با ۱/۰۵ بود که نشان‌دهنده پتانسیل رسوب‌گذاری نسبتاً بالای آب در برخی از چاه‌ها است. در مقابل، حداقل مقدار LSI برابر با ۰/٤٤- بود که نشان می‌دهد آب در برخی از چاه‌ها ممکن است خاصیت خورندگی داشته باشد. انحراف معیار شاخص لانژیلر در این ۳٤ حلقه چاه برابر با ۰/۳۹ محاسبه شد. این مقدار انحراف معیار نشان‌دهنده پراکندگی نسبتاً زیاد مقادیر LSI در بین چاه‌ها است. به طور کلی، داده‌های حاصل از این بررسی نشان می‌دهند که آب این چاه‌ها دارای پتانسیل بالایی برای رسوب‌گذاری بوده و این موضوع می‌تواند خطر انسداد قطره‌چکان‌ها در سیستم‌های آبیاری را افزایش دهد. بر اساس طبقه‌بندی کیفیت آب و با توجه به مقادیر شاخص لانژیلر، مشخص شد که ۵۰ درصد از چاه‌های مورد بررسی در محدوده خطر گرفتگی ناشی از رسوب‌گذاری قرار دارند. این بدان معناست که نیمی از چاه‌ها دارای آبی هستند که احتمال ایجاد رسوب و گرفتگی در قطره‌چکان‌های سیستم آبیاری را دارد.

شکل ۲- نمونه‌برداری از چاه‌های آب

برای تعمیم مکانی داده‌ها از روش درون‌یابی فاصله وزنی معکوس استفاده شد و نقشه پهنه‌بندی خطر تهیه گردید. نتایج نشان داد بیشتر بخش‌های منطقه دارای LSI مثبت هستند که نشان‌دهنده تمایل آب به رسوب‌گذاری کربنات کلسیم است. این

وضعیت مهم‌ترین عامل گرفتگی قطره‌چکان‌ها محسوب می‌شود (۲). بخش‌های محدودی نیز LSI منفی داشتند که خطر خوردگی تجهیزات در آن‌ها وجود دارد. تحلیل مکانی، نقشه پهنه‌بندی نشان داد که آب‌های بخش شمالی و مرکزی مستعد رسوب‌گذاری شدید و متوسط هستند. در شرق و شمال غرب منطقه: آب تقریباً پایدار همراه با لکه‌های محدود خورنده است که این الگو با سازندهای آهکی منطقه همخوانی دارد؛ افزایش کلسیم و قلیائیت عامل اصلی LSI مثبت بوده است.



شکل ۳- پهنه‌های لانژیلر با بهره‌گیری از روش درون‌یابی فاصله وزنی معکوس

می‌توان نتیجه گرفت اگر کیفیت آب قبل از اجرا بررسی نشود، حدود ۵۰ درصد سامانه‌های آبیاری منطقه طی ۲ تا ٤ سال دچار افت یکنواختی خواهند شد. اما با مدیریت مبتنی بر نقشه کیفیت آب، طول عمر سیستم حداقل دو برابر افزایش می‌یابد بر اساس نقشه تهیه‌شده سه پهنه مدیریتی می‌تواند تعریف شود. استفاده از این نقشه قبل از طراحی سامانه می‌تواند هزینه‌های نگهداری را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

جدول ۱- سه پهنه مدیریتی تعریف شده برای دشت بردسیر

پهنه	وضعیت	توصیه مدیریتی
پرخطر	رسوب‌گذاری شدید	اسیدشویی منظم + فیلتر قوی
متوسط	احتمال گرفتگی	شست‌وشوی دوره‌ای
کم‌خطر	مناسب	نگهداری معمول

جدول ۲- دستورالعمل مدیریتی پیشنهادی تعریف شده برای دشت بردسیر

کلاس پهنه	محدوده LSI	نوع فیلتر	برنامه نگهداری	طراحی پیشنهادی
خورنده	LSI < ۰	توری ساده	پایش اتصالات	حذف فلز
پایدار	۰≥ LSI ≥ -۰/۱	دیسکی	شست‌وشوی معمول	عادی
رسوب‌گذار متوسط	۰/۵≥ LSI > ۰	دیسکی + شستشو	اسید هر ۲ ماه	قطره‌چکان دبی بالا
رسوب‌گذار شدید	LSI >۰/۵	شنی + دیسکی	اسید ماهانه	پیش‌تصفیه ضروری

توصیه ترویجی

۱- رسوب کربنات کلسیم، ناشی از خروج آب از حالت تعادل، در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای به دلیل عواملی نظیر افت فشار، افزایش دما و تبخیر در خروجی قطره‌چکان‌ها، تشدید می‌گردد. بر این اساس، حتی آب‌های با شاخص LSI اندکی مثبت نیز می‌توانند منجر به گرفتگی شدید شوند. یافته‌ها نشان می‌دهند که تنها ۲۳٪ از منطقه، بدون نیاز به مدیریت خاص، قابل استفاده است؛ بنابراین، طراحی یکسان سیستم آبیاری در کل منطقه، اقدامی غیر اصولی و مغایر با اصول مدیریت صحیح منابع آب خواهد بود. در غیر این صورت، احتمال بروز مشکلات جدی در سیستم‌های آبیاری افزایش می‌یابد.

۲- در مناطق با شاخص LSI بالا، استفاده از روش‌های اسیدشویی به صورت دوره‌ای و منظم، ضروری به نظر می‌رسد. این روش، با حل کردن رسوبات کربنات کلسیم، از گرفتگی قطره‌چکان‌ها جلوگیری کرده و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد.

۳- همچنین، انتخاب قطره‌چکان‌های مقاوم به رسوب و دارای قابلیت خود شستشویی می‌تواند در کاهش مشکلات ناشی از رسوب‌گذاری مؤثر باشد.

٤- استفاده از فیلتراسیون مناسب، با حذف ذرات معلق و مواد آلی موجود در آب، از تشکیل رسوبات و گرفتگی جلوگیری می‌کند. جدول ۲ دستورالعمل مدیریتی پیشنهادی برای دشت بردسیر را ارائه می‌دهد.

۵- در نهایت، پایش مداوم کیفیت آب و شاخص LSI ، به منظور شناسایی تغییرات و اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب، امری ضروری است. با توجه به تنوع کیفیت آب در منطقه، انجام آزمایش‌های دوره‌ای آب و تجزیه و تحلیل نتایج، می‌تواند به انتخاب مناسب‌ترین روش‌های مدیریتی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های آبیاری کمک کند. در نظر گرفتن این نکات، علاوه بر افزایش طول عمر سیستم‌های آبیاری، به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و همچنین بهبود بهره‌وری آب منجر خواهد شد.

فهرست منابع

l- Aizari, H.S., et al., *Assessment of groundwater quality for irrigation purpose using irrigation water quality index (IWQI).* Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2024. **32**(1): p. 1–11–1–11.

2- Bucks, D.A., F. Nakayama, and R. Gilbert, *Trickle irrigation water quality and preventive maintenance.* Agricultural water management, 1979. **2**(2): p. 149–162.

3- Keller, J. and R.D. Bliesner, *Sprinkle and trickle irrigation*. 1990.

4-Ayers, R.S. and D.W. Westcot, *Water quality for agriculture*. Vol. 29. 1985: Food and agriculture organization of the United Nations Rome.

5-Edzwald, J.K., *Water quality & treatment: a handbook on drinking water.* 2011.

6-Boukich, O., et al., *Assessment of groundwater quality for irrigation using a new customized irrigation water quality index.* Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025. **59**: p. 102346.

7-Messaid, N., et al., *Assessment of Groundwater Quality for Irrigation in the Semi-Arid Region of Oum El Bouaghi (Northeastern Algeria) Using Groundwater Quality and Pollution Indices and GIS Techniques.* Water, 2025. **17**(22): p. 3266.

8-Nkpoidet, M.M., N.I. Udosen, and J.E. Thomas, *Hydrochemical assessment of groundwater quality using water quality index, irrigation indices, and corrosivity models in a hydrocarbon-impacted coastal aquifer.* Discover Geoscience, 2025. **3**(1): p. 111.

9-Agency, U.S.E.P., *Groundwater sampling*. 2017.