

افت شدید سطح آب زیرزمینی و اندرکنش رودخانه - آبخوان (مطالعه موردی: آبخوان نجف‌آباد در حوضه زاینده‌رود)

مسعود میرمحمد صادقی^۱، بابک ابراهیمی^{۲*} و مهرداد پسندی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۲۴)

چکیده

افت شدید سطح آب زیرزمینی و کاهش ذخیره آبخوان منجر به اثرات زیست‌محیطی زیان‌بار متعددی از جمله کاهش آبدهی چاه‌ها، فرونشست زمین، کاهش کیفیت آب زیرزمینی و همچنین کاهش ذخیره منابع آب سطحی دارای ارتباط هیدرولیکی با آبخوان میشود. در این تحقیق، افت شدید سطح آب زیرزمینی آبخوان محدوده مطالعاتی نجف‌آباد واقع در استان اصفهان بررسی شده است. این مطالعات نشان دهنده افت شدید سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آب آبخوان، در طی سال‌های اخیر است. ارتباط هیدرولیکی رودخانه زاینده‌رود با آبخوان در محدوده مطالعاتی که در سال‌های قبل، غالباً به صورت تخلیه‌کننده آبخوان بوده، به حالت تغذیه‌کننده تغییر کرده است. بررسی‌ها نشان داده که افت شدید سطح آب زیرزمینی، مستقل از میزان بارش منطقه بوده و ناشی از پمپاژ بی‌رویه چاه‌ها و کاهش آب سطحی ورودی به منطقه مطالعاتی است. با توجه به سنگ شیلی کف آبخوان، افت شدید ایجاد شده، نمی‌تواند در اثر نشست از سنگ کف باشد، همچنین متناسب با افت شدید سطح آب زیرزمینی آبخوان، کیفیت آب زیرزمینی در کل آبخوان و به‌ویژه در محل مخروط‌های افت منطقه‌ای کاهش یافته است. براساس نتایج این تحقیق پیش‌بینی می‌شود که روند افزایشی میزان نشست آب رودخانه به سمت آبخوان مداوم بوده و ضروری است تا روند برداشت آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کاهش یافته و متوسط ورودی آب سطحی به محدوده آبخوان به شرایط دهه هفتاد بازگردد.

واژه‌های کلیدی: اندرکنش، افت آب زیرزمینی، آبخوان، نجف‌آباد

۱. گروه آب و محیط زیست، بخش مهندسی عمران، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان، وزارت نیرو

۲. دفتر برنامه‌ریزی آب، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان

۳. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mbeb50@yahoo.com

مقدمه

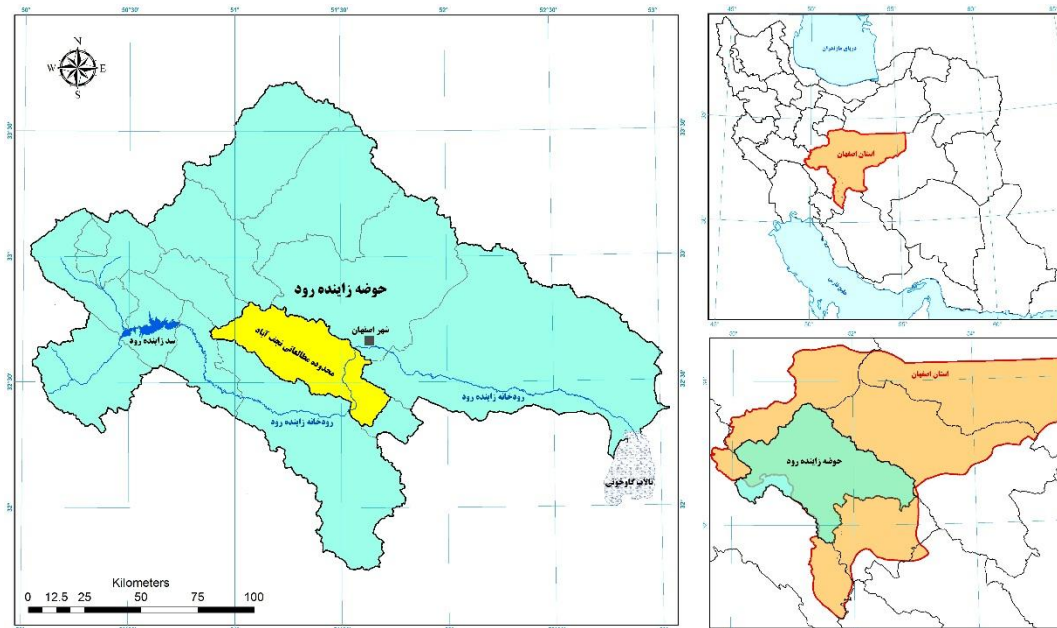
آب زیرزمینی یک منبع تأمین آب با ارزش در سرتاسر جهان محسوب می‌شود. استخراج آب زیرزمینی منجر به تغییر ذخیره محیط متخلخل گردیده (۲۵ و ۲۶) و در صورت برداشت بی‌رویه از ذخیره آب زیرزمینی، افت شدید آب زیرزمینی را به دنبال خواهد داشت. کاهش شدید ذخیره آب زیرزمینی به عنوان یک مشکل جهانی جدی و فزاینده شناخته شده که اکوسیستم های حساس و تأمین پایدار آب را مورد تهدید قرار داده است (۱۱، ۱۲، ۱۹ و ۲۱). جبران آثار ناشی از پمپاژ بی‌رویه (مانند افت شدید سطح آب زیرزمینی) در چرخه آب و در مقایسه با آب سطحی به کندی صورت می‌پذیرد و در مناطق خشک و نیمه خشک که مردم برای نیازهای خانگی و کشاورزی با کمبود آب کافی مواجه هستند، استخراج آب زیرزمینی به آسانی می‌تواند از تغذیه طبیعی آبخوان تجاوز کرده و عواقب جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد.

کاهش ذخیره آب زیرزمینی می‌تواند اثرات زیانبار فراوانی شامل کاهش آبدهی چاه‌ها، افزایش هزینه پمپاژ، ضرورت حفر چاه‌های عمیق‌تر، فرونشست غیر قابل برگشت زمین و لذا تخریب سازه‌های سطحی و زیرسطحی، کاهش جریان پایه چشمه‌ها، رودخانه‌ها و دیگر منابع آب سطحی، تخریب اکوسیستم‌های آبی، و نابودی تالاب‌ها را به دنبال داشته باشد (۴، ۱۳ و ۱۹). کاهش قابل توجه ذخیره آب زیرزمینی منجر به نشت آب‌های شور از لایه‌های محصورکننده با نفوذپذیری کم و هجوم آب شور دریا و در نهایت کاهش کیفیت آب زیرزمینی و از دسترس خارج شدن منابع آب زیرزمینی منطقه می‌شود (۸). درحالی‌که کاهش دراز مدت ذخیره آب زیرزمینی، عمدتاً توسط بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبخوان ایجاد می‌شود، روندهای کوتاه‌مدت محلی و ناحیه‌ای در کاهش ذخیره ممکن است در اثر تغییرات طبیعی بارش و در نتیجه تغذیه رخ دهد. بنابراین تشخیص نقش انسان در افت شدید آب زیرزمینی و یا اثر مؤلفه‌های کوتاه‌مدت اقلیمی، نیاز به بررسی سری زمانی داده‌های آماری (مانند بررسی روند تغییرات سطح آب مشاهده

شده در چاه‌های مشاهده‌ای، آبدهی رودخانه‌ها، بارندگی و ...) دارد. مطالعه روند سری زمانی می‌تواند اساس تصمیم‌گیری درخصوص چگونگی مدیریت مورد نیاز و راهکار عملی بهینه با توجه به هزینه‌ها باشد.

در گذشته و در بسیاری موارد، آب سطحی و آب زیرزمینی به صورت منابع مجزا مدیریت می‌شدند (۷) اما امروزه تبادل آب بین رودخانه و آبخوان به دلیل تأثیر قابل توجه بر وضعیت هیدرولوژیک رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و آب‌های زیرزمینی (۱۲، ۱۵، ۲۶ و ۲۷) به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. اندرکنش آب زیرزمینی و سطحی بر خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی رودخانه و محیط پیرامون آن نیز تأثیرگذار است (۲۱، ۹، ۲۶). اندرکنش آب زیرزمینی و سطحی در بسیاری موارد کاملاً پیچیده بوده و به عوامل متعددی نظیر توپوگرافی، شکل بستر آبراهه (پهنا، شیب و پیچیدگی مسیر آبراهه)، خصوصیات هیدرولیکی زیرسطحی، تغییرات زمانی بارش، الگوی جریان آب زیرزمینی و تراز آب رودخانه وابسته است (۱۴ و ۱۵). در نواحی خشک که تغذیه توسط بارش ناچیز است، فرایند غالب جریان رودخانه-آبخوان به صورت نشت از رودخانه به آبخوان است (۵). اما نشت آب از رودخانه به سمت آبخوان می‌تواند به علت پمپاژ آب زیرزمینی در مجاورت رودخانه نیز رخ دهد (۵، ۱۷). پمپاژ آب زیرزمینی با افزایش نرخ حرکت آب از منبع آب سطحی به درون آبخوان، می‌تواند باعث تغییر در چگونگی تبادل آب آبخوان و رودخانه، دریاچه یا تالاب (از طریق قطع جریان طبیعی زیرزمینی تخلیه شده به آب سطحی) شود. بر این اساس، درک فرایند تبادل آب زیرزمینی و سطحی یک ضرورت برای مدیریت صحیح منابع آب در مقیاس حوضه بوده و این مسئله بررسی میدانی گسترده و پایش تغییرات مکانی و زمانی تبادل آب را ضروری می‌سازد.

در بسیاری از نواحی ایران، حجم ذخیره آب زیرزمینی در اثر پمپاژ بی‌رویه در حال کاهش بوده و خشک شدن چاه‌ها، کاهش آب رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، کاهش کیفیت آب، افزایش هزینه‌های پمپاژ و فرونشست زمین، برخی اثرات منفی کاهش



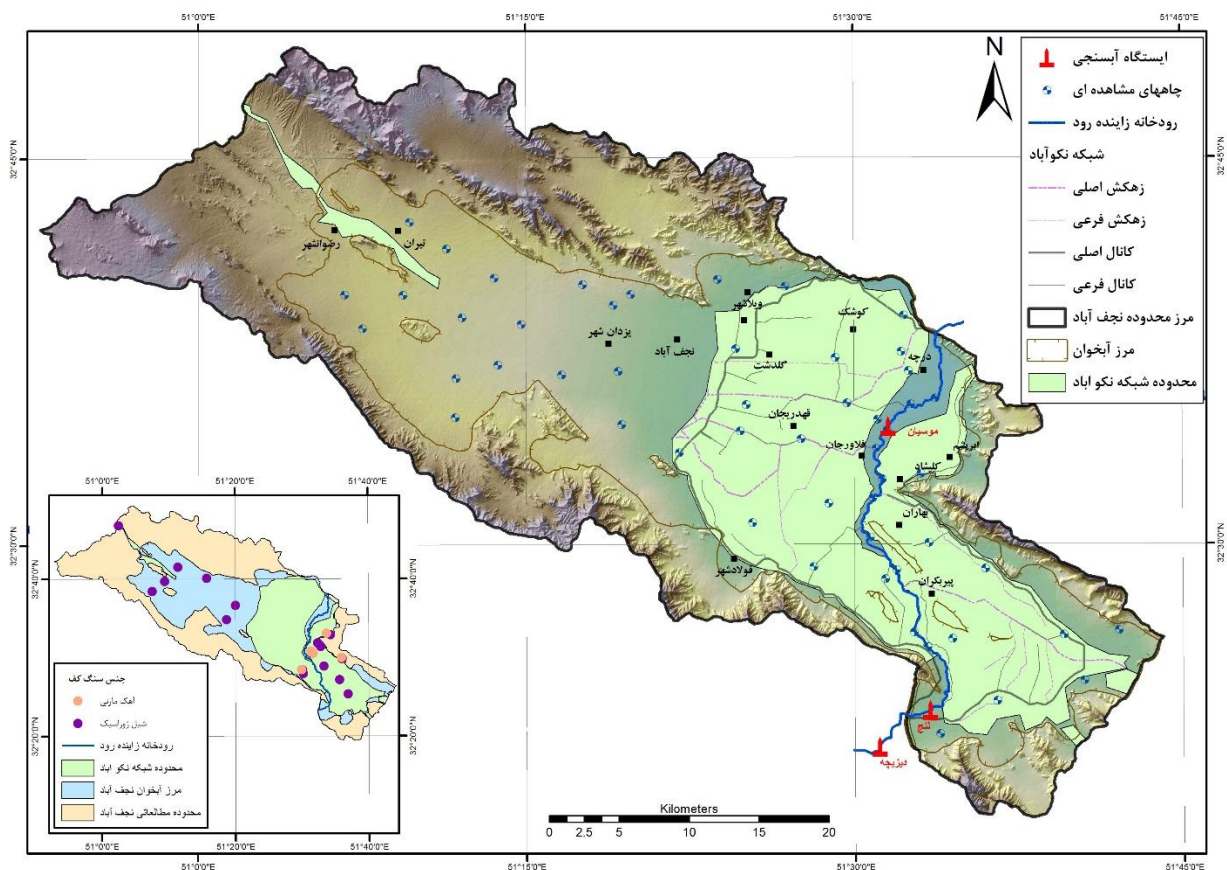
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی آبخوان نجف‌آباد در حوضه آبریز گاوخونی و استان اصفهان (ترسیم: نویسندگان)

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز گاوخونی مشتمل بر ۲۱ محدوده مطالعاتی است و محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در ناحیه میانی این حوضه و در استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). وسعت کل این محدوده ۱۷۵۴/۹ کیلومتر مربع است که ۶۷۹/۲ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و ۱۰۷۵/۷ کیلومتر مربع را دشت تشکیل می‌دهد. آبخوان آبرفتی در مساحتی بالغ بر ۹۴۱ کیلومتر مربع (۹۵ درصد سطح دشت) گسترده شده است. مرتفع‌ترین نقطه با ارتفاع ۲۹۵۳ متر در شمال غرب محدوده و حداقل ارتفاع به‌میزان ۲۰۶۹ متر از سطح دریا در ناحیه شمال غربی در مجاورت رودخانه زاینده‌رود واقع است. رودخانه زاینده‌رود از بخش جنوبی این محدوده وارد شده و از بخش شمال شرقی خارج می‌شود. شبکه آبیاری مدرن نکوآباد، مهم‌ترین سازه آبی این محدوده است که از محل سد نکوآباد (خارج از محدوده) آب‌گیری کرده و در قالب دو شبکه نکوآباد چپ و راست در سطح مزارع کشاورزی، محدوده آب را توزیع می‌کند (شکل ۲). ساختمان زمین‌شناسی دشت در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد

ذخیره آب زیرزمینی است. آبخوان واقع در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در حوضه آبی زاینده‌رود که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است نیز، افت شدیدی را متحمل شده و همان‌طور که در این تحقیق، براساس داده‌های سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای منطقه، مشخص شده است، این میزان افت در برخی نواحی به بیش از ۷۰ متر در طول دوره آماری ۱۵ ساله رسیده است. از طرفی دیگر میزان نشت آب رودخانه به آبخوان در سال‌های آماری یاد شده، روند افزایشی قابل توجهی داشته است. در این تحقیق با هدف بررسی ارتباط تغییرات آبدهی رودخانه زاینده‌رود با افت شدید سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد، فرضیات زیر مورد بررسی قرار گرفته است: (۱) افت سطح آب زیرزمینی آبخوان ناشی از بهره‌برداری بیش از ظرفیت واقعی آبخوان بوده و ارتباط مشخصی با عوامل زمین‌ساختاری و یا کاهش بارندگی منطقه ندارد، (۲) ارتباط هیدرولیکی مؤثر رودخانه و آبخوان و افزایش میزان افت سطح آب در آبخوان منجر به افزایش نشت رودخانه به‌سمت آبخوان است، (۳) روند افت کیفی آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد در سالیان اخیر، همسو با روند افت سطح آب زیرزمینی آبخوان است.



شکل ۲. موقعیت محدوده مطالعاتی نجف‌آباد، آبخوان نجف‌آباد، محدوده شبکه مدرن نکوآباد، موقعیت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای به‌همراه نقشه جنس سنگ کف آبخوان براساس اطلاعات گمانه‌های اکتشافی (ترسیم: نویسندگان) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

است. در این سنگ‌ها حفرات شکل گرفته در سطوح گسلی توسط برش گسلی دانه ریز که تراوایی کمی دارد، پر شده و در عمل امکان انتقال آب از طریق این صفحات بسیار ناچیز خواهد بود. بنابراین امکان انتقال آب با توجه به شرایط زمین‌شناسی سنگ کف آبخوان نجف‌آباد، حتی با وجود گسل فراهم نبوده و از نظر تئوریک حتی گسله‌هایی با سازوکار کششی نیز توانایی ایجاد معابر با آبگذری بالا را ندارند (۱۵ و ۲۳).

براساس مطالعات بیلان آبخوان نجف‌آباد، از میزان ۱۶۵/۳۰ میلیون مترمکعب حجم آب حاصل از بارش در دشت حدود ۸۴ درصد صرف تبخیر شده و ۱۶ درصد آن بارندگی مفید است. بیلان هیدروکلیماتولوژی محدوده مطالعاتی نشان داده است که نزولات جوی تنها پتانسیل تأمین ۲۷ میلیون مترمکعب آب سالیانه دشت نجف‌آباد و ۴۳/۴ میلیون مترمکعب آب

به‌صورت یک ناودیس با امتداد محوری شمال غربی - جنوب شرقی است که به تدریج توسط واریزه‌ها و رسوبات آبرفتی پر شده و آبخوان آبرفتی به وسعت ۹۴۰/۹ کیلومتر مربع (۹۵ درصد وسعت کل دشت) در آن ایجاد شده است. به‌طورکلی، ضخامت نهشته‌های ناپیوسته از حواشی به سمت مرکز دشت، افزایش یافته و براساس اطلاعات موجود حاصل از چاه‌های حفر شده در منطقه سبترای آن به حدود ۲۰۰ متر می‌رسد (۲). بررسی چاه‌نگار چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری که به سنگ کف رسیده‌اند، نشان داده است که در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد، جنس سنگ کف عموماً از شیست و شیل دوران دوم زمین‌شناسی است که در گروه سنگ‌های شکل‌پذیر قرار می‌گیرد (شکل ۲). سنگ‌های شکل‌پذیر مذکور در صورتی که تحت تأثیر گسلش نیز قرار گیرد، عموماً فاقد آبگذری لازم

جدول ۱. بیلان سالیانه آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی نجف‌آباد (وسعت ناحیه بیلان ۹۴۱ کیلومتر مربع - واحد Mm^3) (۲)

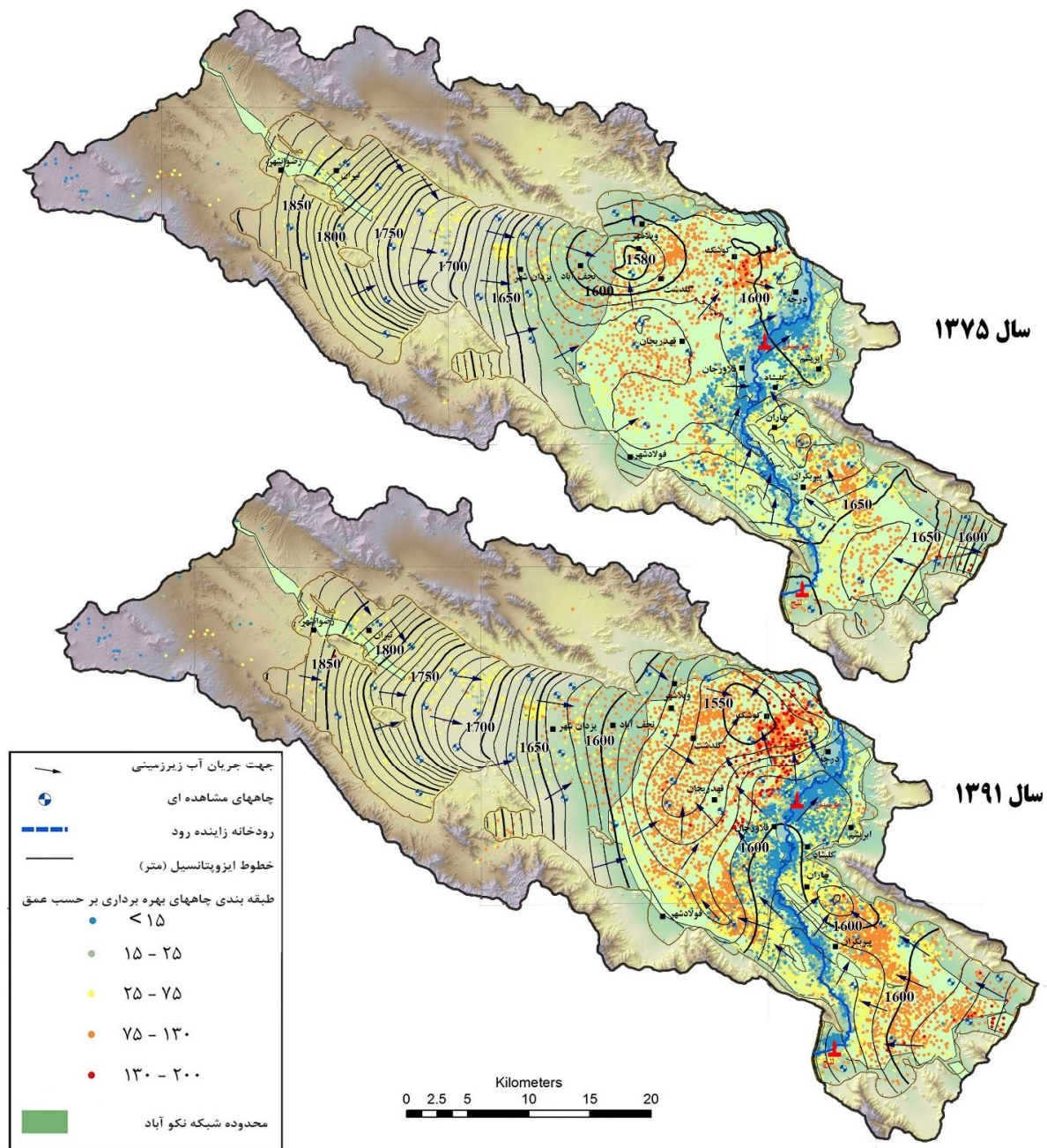
مؤلفه‌های تغذیه آبخوان	آب زیرزمینی ورودی	نفوذ بارش مستقیم	نفوذ آب‌های سطحی	نفوذ آب مصرفی کشاورزی	نفوذ آب شرب و صنعت	جمع تغذیه
Mm^3	۴۹/۴۰	۲۶/۰۰	۱۸۹/۲۰	۴۲۴/۸۰	۵۸/۹۰	۷۴۸/۳۰
تخلیه آبخوان	آب زیرزمینی خروجی	تبخیر آب زیرزمینی	زهکشی آبخوان	تخلیه توسط چاه - چشمه و قنات		جمع تخلیه
Mm^3	۰/۰۰	۰/۹۰	۰/۰۰	۸۸۵/۷۰	آبرفتی	۸۸۶/۶
ΔV_{GW} (Mm^3) تغییرات حجم ذخیره سالیانه						
-۱۳۸/۳۰						

زیرزمینی ارتفاعات را دارا است (۲ و ۳). مطالعات بیلان آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد (۲ و ۳) نشان داده است که نرخ متوسط کاهش حجم ذخیره ثابت آبخوان آبرفتی معادل $۱۳۸/۳۰$ میلیون مترمکعب در سال است و رودخانه زاینده‌رود در سالیان اخیر در تمامی مسیر محدوده مطالعاتی تغذیه کننده آبخوان بوده و میزان نشت آب رودخانه به آبخوان حدود $۱۸۹/۲$ میلیون مترمکعب است (جدول ۱ به نقل از مرجع ۲).

روش مطالعه

در این پژوهش، تغییرات آبدهی رودخانه در مقاطع مختلف براساس آمار ثبت شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی (ایستگاه لنج و موسیان) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مقادیر آب تحویلی به شبکه‌های آبیاری منطقه (شبکه سمت راست و چپ نکوآباد)، براساس آمار آب توزیع شده در سد نکوآباد مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی رفتار و نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان، براساس داده‌های ثبت شده در ۵۳ حلقه چاه مشاهده‌ای صورت پذیرفته است. براساس این داده‌ها، نقشه‌های ایزوپتانسیل آبخوان، نقشه‌های هم‌عمق آب زیرزمینی، نقشه افت تجمعی سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد، و همین‌طور هیدروگراف معرف آبخوان دشت نجف‌آباد تهیه شده است. براساس نقشه‌های یاد شده، موقعیت مخروط‌های افت منطقه‌ای مهم آبخوان شناسایی شده است. براساس اطلاعات ثبت شده در چاه بهره‌برداری منطقه مطالعاتی، چاه‌ها برحسب عمق رده‌بندی

شده و موقعیت آنها با موقعیت مخروط‌های افت منطقه‌ای آبخوان مقایسه شده است. هندسه آبخوان و بررسی جنس سنگ کف، براساس بررسی چاه‌نگار چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری محدوده مطالعاتی تهیه شده است. به‌منظور بررسی تغییرات سطح زیر کشت کشاورزی در منطقه از تصاویر سنجنده لندست، استفاده شده است. به این منظور تصاویر رنگی کاذب (ترکیب باندهای دو، سه و چهار) ساخته شده براساس داده‌های سنجنده LMS (تابستان ۱۳۶۳) و همین‌طور سنجنده LC8 (تابستان ۱۳۹۴) با دقت تفکیک مکانی ۳۰ متر به شماره سین ۱۶۴۰۳۷ مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق شوری آب زیرزمینی براساس اطلاعات ثبت شده مربوط به نمونه‌برداری کیفی از ۱۶ منبع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور نمودارهای تغییرات هدایت الکتریکی آب در منابع آب انتخابی و همین‌طور نمودار متوسط تغییرات هدایت الکتریکی آبخوان تهیه و با هیدروگراف واحد آبخوان مورد مقایسه قرار گرفته است. آمار و اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان دریافت شده است. در این پژوهش جهت بررسی معنادار بودن روندها در سری‌های زمانی مورد بررسی از آزمون ناپارامتری من - کندال (۱۸ و ۲۰) که یکی از بهترین آزمون‌ها در این زمینه است (۲۸) استفاده شده است. در این تحقیق همچنین از همبستگی متقابل (۶) به‌منظور بررسی همبستگی میان تغییرات سطح آب زیرزمینی با مقادیر بارش، آبدهی رودخانه، آب توزیع شده در

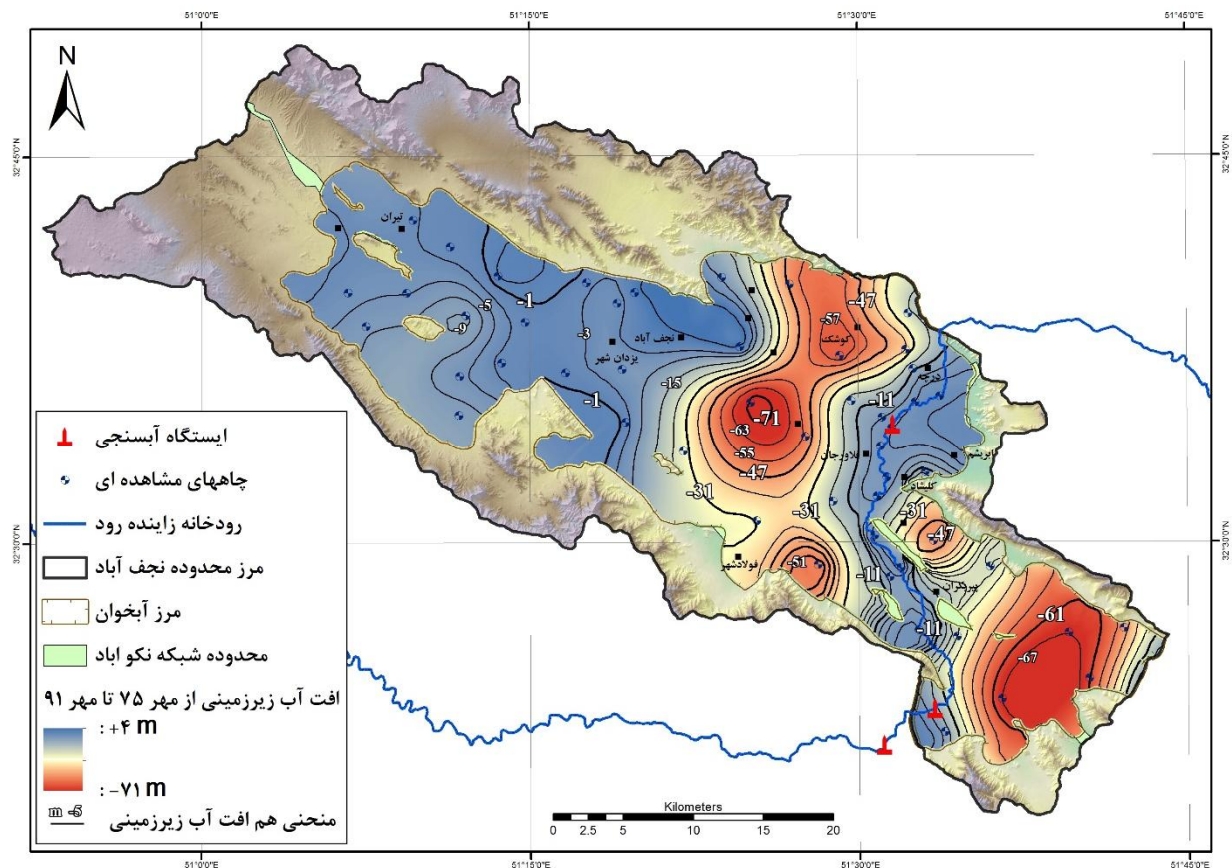


شکل ۳. نقشه هم پتانسیل آبخوان محدوده مطالعاتی نجف آباد در سالهای ۱۳۷۵ و ۱۳۹۱ به همراه خطوط جریان آب زیرزمینی، موقعیت چاههای مشاهده ای و چاههای بهره برداری طبقه بندی شده بر حسب عمق (ترسیم: نویسندگان) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نتایج و بحث

شکل (۳)، نقشه خطوط هم پتانسیل آبخوان، براساس داده های سطح آب زیرزمینی مهرماه سالهای ۱۳۷۵ و ۱۳۹۱ را نشان می دهد. در این شکل، موقعیت چاههای بهره برداری که براساس عمق طبقه بندی شده اند نیز مشخص شده اند. نقشه سال

شبکه و همین طور ارتباط میان شوری آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. تحلیل های صورت گرفته در محیط GIS و همین طور تحلیل های آماری در نرم افزارهای ArcGIS، Minitab و XLSTAT صورت گرفته است.

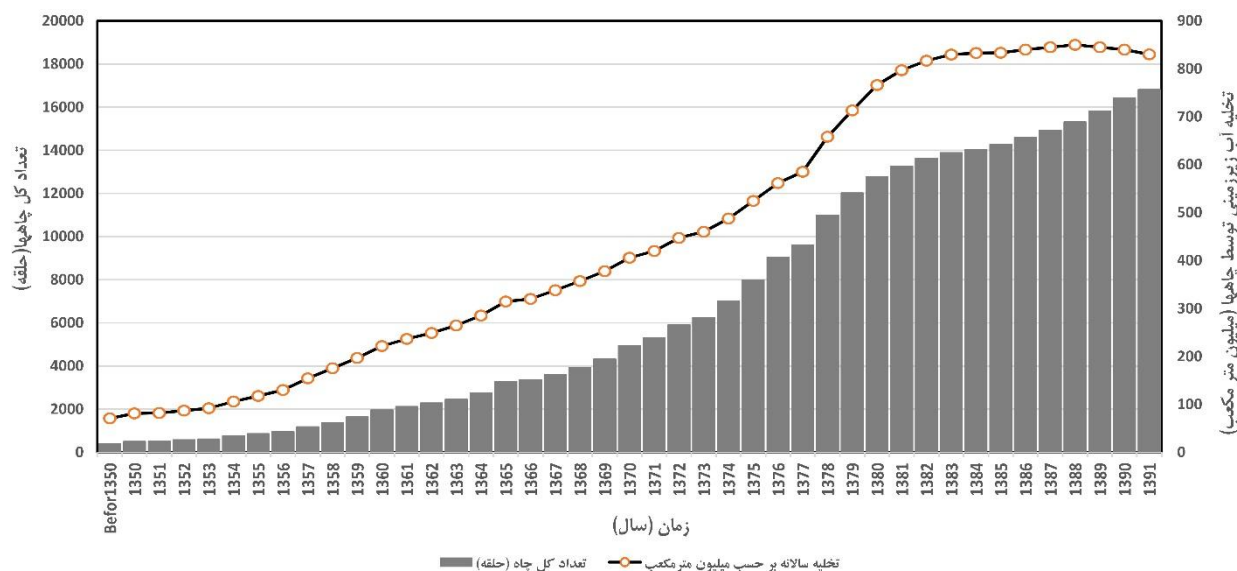


شکل ۴. نقشه افت تجمعی سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف آباد طی سالهای ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۱ (ترسیم: نویسندگان). (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در تغذیه آبخوان در تمامی مسیر جریان، در محدوده مطالعاتی نجف آباد داشته است. نقشه هم پتانسیل سال ۱۳۹۱ شکل گیری حداقل چهار مخروط افت منطقه ای را در اطراف شهرهای کوشک، قهدریجان، شمال شرق فولاد شهر و جنوب شرق بهاران نشان داده است. همان طور که در این نقشه ملاحظه می شود، عمده چاه های عمیق منطقه در محدوده شهرهای کوشک، قهدریجان، شمال فولاد شهر، جنوب شرق و شرق شهر پیربکران واقع شده و همچنین تمام چاه های کم عمق، در حاشیه و حریم رودخانه حفر شده اند. تمرکز چاه های عمیق در محل افت های شدید آبخوان و همین طور تمرکز حداکثری چاه های کم عمق (حریمی) در نزدیکی رودخانه کاملاً مشهود است.

شکل (۴) نقشه افت تجمعی در فاصله سال های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۱ را نشان می دهد. براساس این نقشه، افت سطح آب زیرزمینی آبخوان در منطقه قابل توجه بوده و در برخی نقاط به

۱۳۷۵ نشان می دهد که جهت عمومی جریان آب زیرزمینی آبخوان از شمال غرب و جنوب به سمت میانه دشت و از سمت آبخوان به سمت رودخانه بوده و لذا آبخوان به عنوان یک عامل مؤثر در تغذیه رودخانه محسوب می شده است (لازم به ذکر است در این دوره آبخوان از طریق سیستم های زهکشی محلی که به سمت رودخانه جریان داشته اند، نیز تخلیه شده و رودخانه را تغذیه می کرده است)، همچنین ملاحظه می شود که تعداد چاه های بهره برداری سال ۱۳۷۵ بسیار کمتر از سال ۱۳۹۱ بوده و تنها یک مخروط افت کوچک در شرق شهر نجف آباد مشاهده می شده است (در این دوره حدود ۹۰۰۰ حلقه چاه در منطقه حفر شده است). بررسی نقشه سال ۱۳۹۱ نشان می دهد که جهت عمومی جریان آب زیرزمینی آبخوان نسبت به سال ۱۳۷۵ تغییر محسوس داشته و از رودخانه به سمت آبخوان تغییر جهت داده است. در این وضعیت، رودخانه نقش مؤثری



شکل ۵. تعداد و تخلیه چاه‌های محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به تفکیک سال‌های مختلف از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰

است. ۸۸۵/۷ میلیون مترمکعب از مجموع مصارف آب منطقه از طریق پمپاژ آب زیرزمینی از چاه‌های بهره‌برداری و تخلیه چشمه‌ها و قنات‌های منطقه تأمین و باقی‌مانده نیاز آبی برابر با ۳۳۱/۵ میلیون مترمکعب از جریان‌های سطحی شامل رودخانه و کانال نکوآباد تأمین می‌شود (۲).

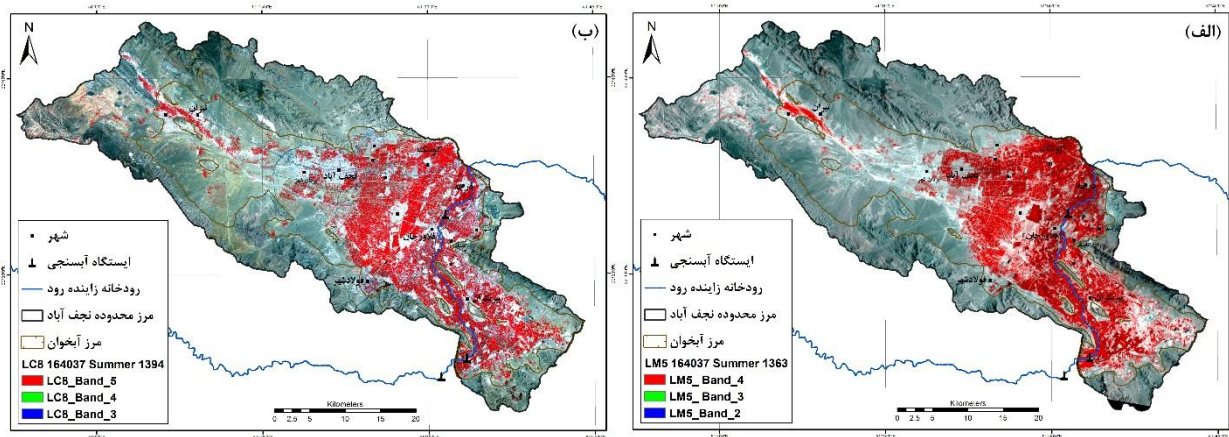
شکل (۶) تصاویر رنگی کاذب ساخته شده براساس داده‌های سنجنده LMS5 (تابستان ۱۳۶۳) و سنجنده LC8 (تابستان ۱۳۹۴) را نشان می‌دهد. مقایسه این تصاویر نشان می‌دهد که سطح اراضی کشاورزی در محدوده آبخوان نجف‌آباد در دوره مذکور افزایشی نداشته است و بنابراین افت شدید سطح آب زیرزمینی آبخوان را نمی‌توان به توسعه فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه مرتبط دانست.

شکل (۷)، هیدروگراف معرف ماهانه آبخوان نجف‌آباد از سال ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۳ را به همراه مقدار بارش متناظر در ایستگاه باران‌سنجی معرف محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد. به‌کارگیری آزمون من-کندال نشان داده است که فرض صفر (H_0 : عدم وجود روند در داده‌ها) درخصوص متوسط سطح آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد در طول دوره آماری (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۳) در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود ($P\text{-value} < 0.0001$). این فرض برای دوره آماری ده ساله منتهی به سال ۱۳۹۳ نیز رد

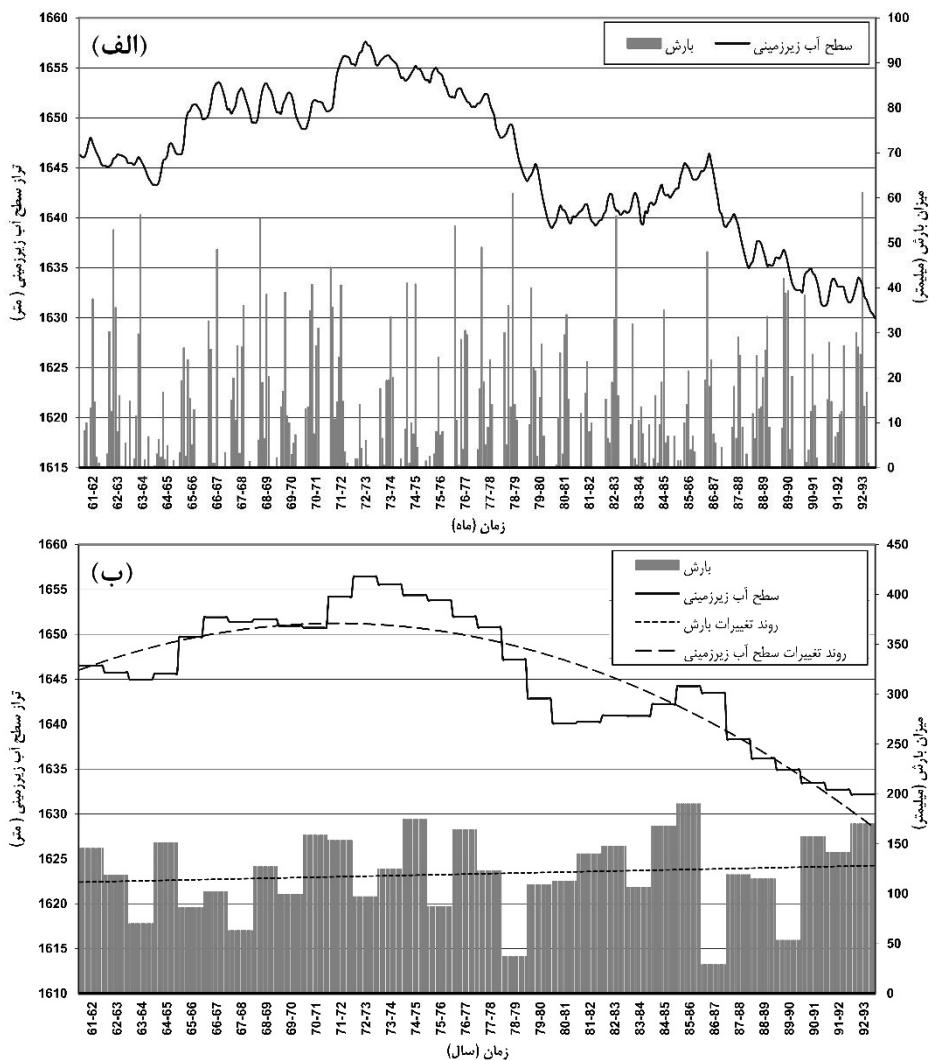
بیش از ۷۰ متر می‌رسد. مقایسه این نقشه با شکل ۳، تطابق خوب پنج مخروط افت منطقه‌ای ایجاد شده در آبخوان را با موقعیت چاه‌های عمیق منطقه نشان می‌دهد.

بررسی روند حفر چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی منطقه نشان داده است که از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰، تعداد چاه‌های بهره‌برداری روندی افزایشی داشته است (شکل ۵). براساس آمار موجود، آبخوان نجف‌آباد توسط حدود ۸۰۰۰ حلقه چاه آب در سال ۱۳۷۵، ۱۴۵۵۴ حلقه چاه (با میزان تخلیه سالانه ۸۵۱/۳۹ میلیون مترمکعب) در سال ۱۳۸۵ و ۱۶۱۸۱ حلقه چاه (با میزان تخلیه سالانه ۸۴۵ میلیون مترمکعب) در سال ۱۳۹۵ تخلیه شده است (شکل ۵). لازم به‌ذکر است، تخمین حجم تخلیه در آماربرداری‌های صورت گرفته از منابع آبی در طول سه دوره یاد شده، براساس آبدهی اندازه‌گیری شده، طول دوره کشت محصولات غالب منطقه و لحاظ کلیه چاه‌ها (اعم از چاه‌های دارای پروانه و چاه‌های فاقد پروانه) صورت گرفته است.

لازم به‌ذکر است مصارف آب در این محدوده شامل مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به‌میزان ۱۲۱۷/۲ میلیون مترمکعب است که سهم مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به‌ترتیب برابر ۱۱۳۶/۸، ۵۸/۶ و ۲۰/۲ میلیون مترمکعب در سال



شکل ۶. ترکیب رنگی کاذب داده های سنجنده لندست ۵ و ۸ بیانگر وضعیت اراضی کشاورزی محدوده مطالعاتی نجف آباد (به رنگ قرمز: در: الف) سال ۱۳۶۳ و (ب) سال ۱۳۹۴ (ترسیم: نویسندگان) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. هیدروگراف معرف ماهانه آبخوان نجف آباد از سال ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۳ به همراه مقدار بارش متناظر در ایستگاه باران سنجی معرف محدوده مطالعاتی به تفکیک داده های: الف) ماهیانه و ب) سالیانه

۱۳۸۷، آبخوان با افت تجمعی برابر با ۲۰ متر (یا ۱/۴ متر در سال) و کاهش ذخیره ثابتی برابر با ۳۷۹ میلیون مترمکعب (یا ۲۷ میلیون مترمکعب در سال) مواجهه بوده است (۲ و ۲۴).

در شکل (۸)، سری زمانی حجم آب سالیانه تحویلی به کانال‌های چپ و راست شبکه نکوآباد در مقایسه با هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد (متوسط ماهیانه) ارائه شده است (شکل ۸-الف). به‌کارگیری آزمون من-کندال نشان داده است که فرض صفر (H_0 : عدم وجود روند در داده‌ها) در خصوص آب توزیعی در شبکه نکوآباد در طول دوره آماری (۱۳۷۷ تا ۱۳۹۳) در آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود ($P\text{-value} < 0/027$). این فرض برای دوره آماری ده ساله منتهی به سال ۱۳۹۳ نیز رد شده است ($P\text{-value} < 0/045$). به‌عبارت دقیق‌تر، براساس این شاخص، آب توزیعی در شبکه نکوآباد، از نظر آماری دارای روند بوده که با توجه به شکل ۸ این روند، روندی کاهشی بوده است. مقایسه هیدروگراف معرف آبخوان و میزان متوسط سالیانه آب تحویلی به شبکه نکوآباد نیز به‌خوبی نمایانگر تطبیق روند تغییرات سطح آب زیرزمینی با میزان آب توزیع شده در شبکه نکوآباد است (شکل ۸-الف). به‌منظور محاسبه میزان همبستگی بین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان و میزان آب توزیع شده در شبکه نکوآباد، میزان همبستگی متقابل سری‌های زمانی این دو متغیر با تأخیرهای زمانی ۴- تا ۴+ سال محاسبه شده است (جدول ۲). نتایج این روش نشان داده است که میزان بیشترین ضریب همبستگی آب توزیع شده در شبکه و نوسانات سطح آب زیرزمینی در تأخیر زمانی یک سال برابر با ۰/۶۶+ است که به‌خوبی تأثیرات مثبت آب توزیعی در شبکه نکو آباد بر وضعیت آبخوان نجف‌آباد را نشان می‌دهد (جدول ۲).

در شکل (۸)، سری زمانی دبی در ایستگاه لنج و همین‌طور اختلاف دبی رودخانه زاینده‌رود در ایستگاه‌های لنج و موسیان طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۲ ارائه شده است (شکل ۸-ب و ۸-ج). فرض صفر (H_0 : عدم وجود روند در داده‌ها) در خصوص آمار آبدهی رودخانه در ایستگاه لنج در طول دوره آماری (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۳) در آزمون من-کندال در سطح اطمینان

می‌شود ($P\text{-value} < 0/001$). به‌عبارت دقیق‌تر، براساس این شاخص سطح آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد چه در دوره بلندمدت و چه در دوره ده ساله اخیر دارای روند (براساس شکل ۷ یک روند کاهشی) است. فرض صفر (H_0 : عدم وجود روند در داده‌ها) در خصوص میزان بارندگی در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در طول دوره آماری (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۳) در آزمون من-کندال نیز مورد آزمون قرار گرفته است. براساس نتایج این آزمون فرض صفر در سطح اطمینان ۹۵ درصد پذیرفته می‌شود ($P\text{-value} < 0/199$). این فرض برای دوره آماری ده ساله منتهی به سال ۱۳۹۳ نیز پذیرفته می‌شود ($P\text{-value} < 0/601$). به‌عبارت دقیق‌تر براساس این شاخص، میزان بارش در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد فاقد روند مشخصی است که منطبق بر نتایج تحقیق کلاهدوزان و همکاران است (۱).

بررسی هیدروگراف معرف آبخوان دشت نجف‌آباد (شکل ۷-الف) نشان می‌دهد که طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۱، سطح آب زیرزمینی آبخوان، به‌طور متوسط ۲۲/۵ متر افت تجمعی داشته است (۱/۵ متر در سال). مقایسه مقادیر بارش محدوده مطالعاتی با روند تغییرات سطح آب آبخوان از سال ۱۳۷۲ به بعد نشان داده است که علیرغم عدم وجود روند مشخص در میزان بارش، سطح آبخوان روندی کاهشی را تجربه کرده است (شکل ۷-ب). به‌منظور محاسبه میزان همبستگی بین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان و میزان بارندگی، میزان همبستگی متقابل سری‌های زمانی این دو متغیر با تأخیرهای زمانی ۴- تا ۴+ سال محاسبه شده است (جدول ۲). نتایج این روش نشان داده است که میزان حداکثر ضریب همبستگی بارش و نوسانات سطح آب زیرزمینی در تأخیر زمانی یک سال برابر با ۰/۱۴- است که به‌خوبی عدم وجود هر گونه ارتباطی میان این دو سری زمانی را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، در این محدوده مطالعاتی، روند افت سطح آب زیرزمینی آبخوان مستقل از بارش بوده است. تحقیقات مشابه در زمینه شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد نیز نشان داده است که طی سال‌های ۱۳۷۳ تا

جدول ۲. ضرایب همبستگی متقابل بین متوسط سطح آب زیرزمینی با آبدهی رودخانه، آب توزیعی در شبکه، بارش، تخلیه آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد با تاخیر زمانی ۴- تا ۴+ سال

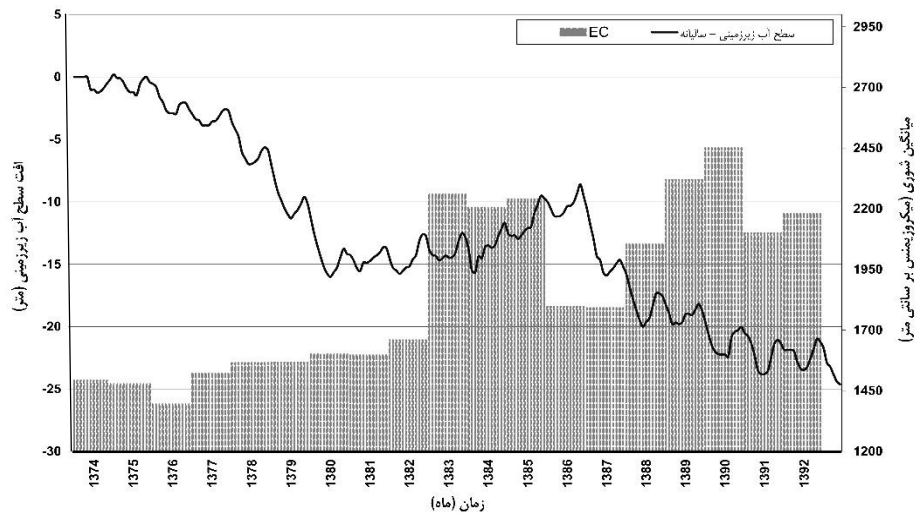
ضریب همبستگی متقابل										
تأخیر زمانی (سال)										
متغیر مستقل	متغیر وابسته	-۴	-۳	-۲	-۱	۰	+۱	+۲	+۳	+۴
تخلیه آبخوان توسط چاه‌ها		-۰/۷۴	-۰/۷۹	-۰/۷۷	-۰/۷۳	-۰/۶۹	-۰/۵۶	-۰/۴۲	-۰/۲۹	-۰/۲۰
بارش		-۰/۰۸	-۰/۱۱	-۰/۱۰	-۰/۱۴	-۰/۰۹	+۰/۱۲	+۰/۱۳	+۰/۱۲	-۰/۰۲
آب توزیعی در شبکه	شوری آب	+۰/۰۸	+۰/۲۵	+۰/۴۹	+۰/۶۶	+۰/۶۳	+۰/۱۷	+۰/۰۶	+۰/۱۶	+۰/۱۳
آبدهی رودخانه در ایستگاه لنج	زیرزمینی	+۰/۲۶	+۰/۳۲	+۰/۵۱	+۰/۵۸	+۰/۵۲	+۰/۲۹	+۰/۱۵	+۰/۱۰	+۰/۰۸
سطح آب زیرزمینی		-۰/۲۸	-۰/۴۲	-۰/۵۷	-۰/۷۲	-۰/۸۰	-۰/۶۱	-۰/۴۲	-۰/۲۲	-۰/۰۸

سطح آب زیرزمینی آبخوان و میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی آبخوان، میزان همبستگی متقابل سری‌های زمانی این دو متغیر با تأخیرهای زمانی ۴- تا ۴+ سال محاسبه شده است. نتایج این روش نشان داده است که میزان ضریب همبستگی سری زمانی برداشت از منابع آب زیرزمینی و سری زمانی سطح آب زیرزمینی با تأخیر زمانی صفر سال، برابر با -۰/۶۹- و با تأخیر زمانی سه سال، برابر ۰/۷۹- است که بیانگر همبستگی قوی این دو سری زمانی و همین‌طور تأثیرات مخرب روند افزایشی برداشت از منابع آب زیرزمینی بر روی آبخوان نجف‌آباد است (جدول ۲).

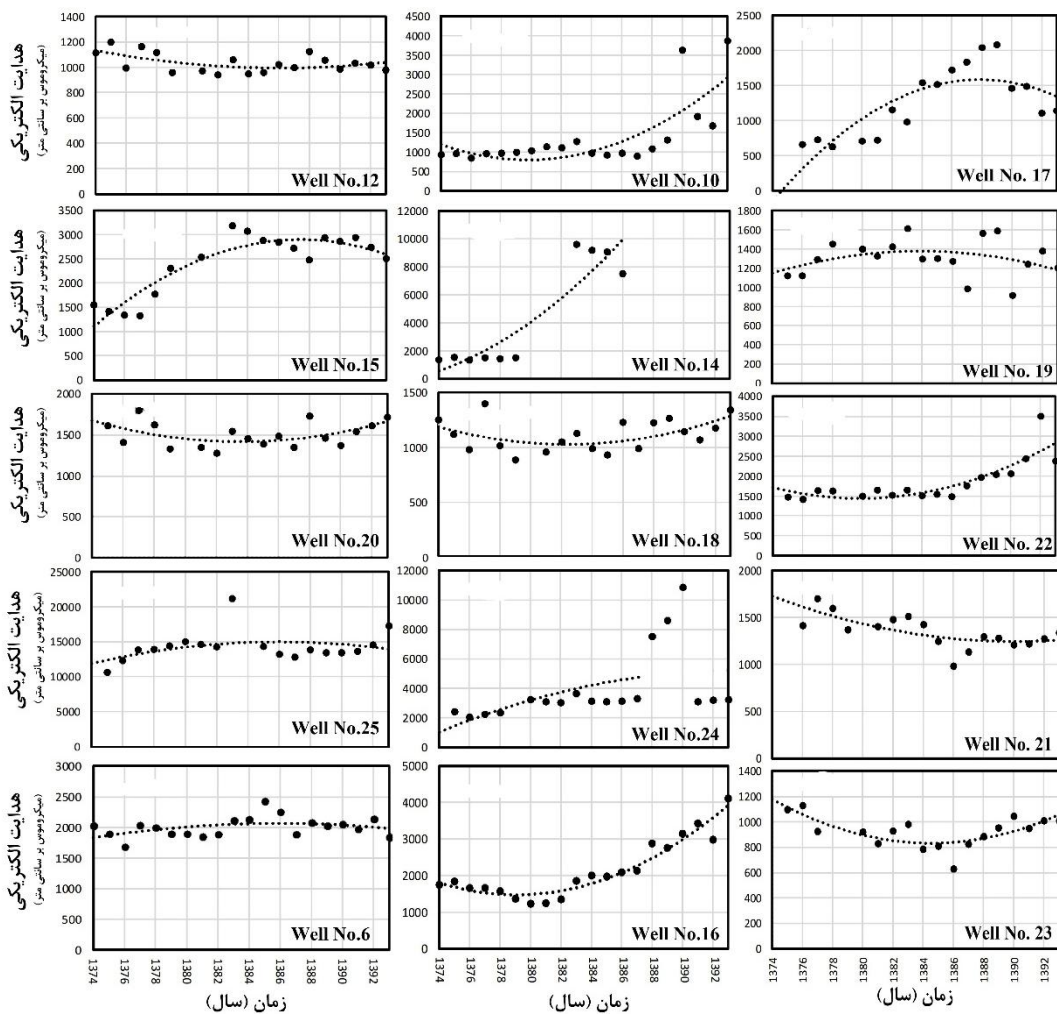
جهت بررسی کیفیت شیمیایی آب، از اطلاعات کیفی ۱۶ حلقه چاه استفاده شد و بر این اساس، نمودار متوسط هدایت الکتریکی آب (EC) به‌همراه تغییرات سطح آب زیرزمینی (شکل ۹) و نمودار تغییرات هدایت الکتریکی در هر یک از منابع آب انتخابی (شکل ۱۰) رسم شده است. نتایج به‌کارگیری آزمون من-کندال نشان داده است که فرض صفر (H_0 : عدم وجود روند در داده‌ها) در خصوص متوسط شوری آب در آبخوان نجف‌آباد در طول دوره آماری (۱۳۷۴ تا ۱۳۹۳) در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌گردد ($P\text{-value} < ۰/۰۰۰۱$). به‌عبارت دقیق‌تر، براساس این شاخص، متوسط شوری آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد در طول دوره آماری مورد مطالعه دارای روند

۹۵ درصد پذیرفته می‌شود ($P\text{-value} < ۰/۱۴۵$). اگرچه فرض صفر برای کل دوره آماری پذیرفته می‌شود، اما این فرض برای دوره آماری ده ساله منتهی به سال ۱۳۹۳ رد می‌شود ($P\text{-value} < ۰/۰۴۷$). به‌عبارت دقیق‌تر، براساس این شاخص، در دوره ده ساله اخیر، روند کاهشی آبدهی رودخانه در ایستگاه لنج مورد تأیید است. به‌منظور محاسبه میزان همبستگی بین روند تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان و میزان آبدهی رودخانه در مقطع ورود رودخانه به آبخوان نجف‌آباد (ایستگاه لنج)، میزان همبستگی متقابل سری‌های زمانی این دو متغیر با تأخیرهای زمانی ۴- تا ۴+ سال محاسبه شده است. نتایج این روش نشان داده است که میزان حداکثر ضریب همبستگی سری زمانی آبدهی رودخانه و سری زمانی سطح آب زیرزمینی با تأخیر زمانی یک سال برابر با ۰/۵۸+ است که تأثیرات مثبت میزان آبدهی رودخانه بر وضعیت آبخوان نجف‌آباد را نشان می‌دهد (جدول ۲). همچنین اختلاف دبی رودخانه در دو ایستگاه لنج (در ابتدای ورود رودخانه به محدوده مطالعاتی) و موسیان (در خروجی رودخانه از محدوده مطالعاتی) (شکل ۲) از سال ۱۳۷۴ یک روند افزایشی مشخصی را نشان داده است (شکل ۸- ب) که نمایانگر روند افزایشی نشت آب رودخانه به آبخوان است.

در این تحقیق به‌منظور بررسی میزان همبستگی سری زمانی



شکل ۹. نمودار متوسط هدایت الکتریکی در مقابل افت متوسط سطح آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد از سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۲



شکل ۱۰. سری زمانی تغییرات هدایت الکتریکی در منابع آب انتخابی آبخوان نجف‌آباد

دارند، پذیرفته شده است که به این معنی است که تغییر در میزان شوری آب زیرزمینی این مناطق، از روند خاصی تبعیت نمی‌کند (جدول ۳). لازم به ذکر است، روند شوری تأیید شده در منبع آبی شماره ۲۱ که خارج از موقعیت مخروط‌افت‌های منطقه‌ای است، یک روند کاهشی است. همچنین فرض صفر (در آزمون آزمون من-کندال) در خصوص همه نمونه‌های واقع در حاشیه مخروط‌های افت منطقه‌ای (به جز منبع شماره ۲۵) رد شده و بیانگر این مطلب است که تغییرات میزان شوری آب زیرزمینی این مناطق دارای یک روند (افزایشی) است. میزان هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در چاه عمیق شماره ۲۵ به دلیل واقع شدن در قسمت خروجی آبخوان (جنوب شرق محدوده مطالعاتی) دارای مقدار بسیار بالایی است (متوسط ۱۴۲۷۹ میکروموس بر سانتی‌متر)، ولی تغییرات اندکی در سری زمانی هدایت الکتریکی این چاه مشاهده می‌شود. نتایج به‌کارگیری آزمون من-کندال در خصوص منابع آبی که در محدوده مخروط‌های افت منطقه‌ای هستند، نشان داده است که فرض صفر در سطح اطمینان ۹۵ درصد رد می‌شود. همچنین این فرض در خصوص منابع آبی شماره ۱۳ و ۱۸ که در محدوده مخروط‌افت واقع شده‌اند، در سطح اطمینان بیش از ۹۰ درصد رد می‌شود (جدول ۳). در خصوص منبع شماره ۱۴ که در محدوده مخروط‌افت منطقه‌ای واقع است، اما فرض صفر رد نشده است، می‌توان به کیفیت بد آمار (کمبود آمار سال‌های میانی) اشاره کرد. اگرچه با ملاحظه شکل ۱۰، روند افزایشی شوری آب در این محل از متوسط ۱۸۰۰ تا ۸۲۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر کاملاً مشهود بوده و بنابراین به نتیجه آزمون نمی‌توان اعتماد کرد. نتایج حاصل از این آزمون، به‌خوبی بیانگر وجود روند (افزایشی) در میزان شوری آب زیرزمینی در مناطق واقع بر مخروط‌های افت شدید آبخوان نجف‌آباد است.

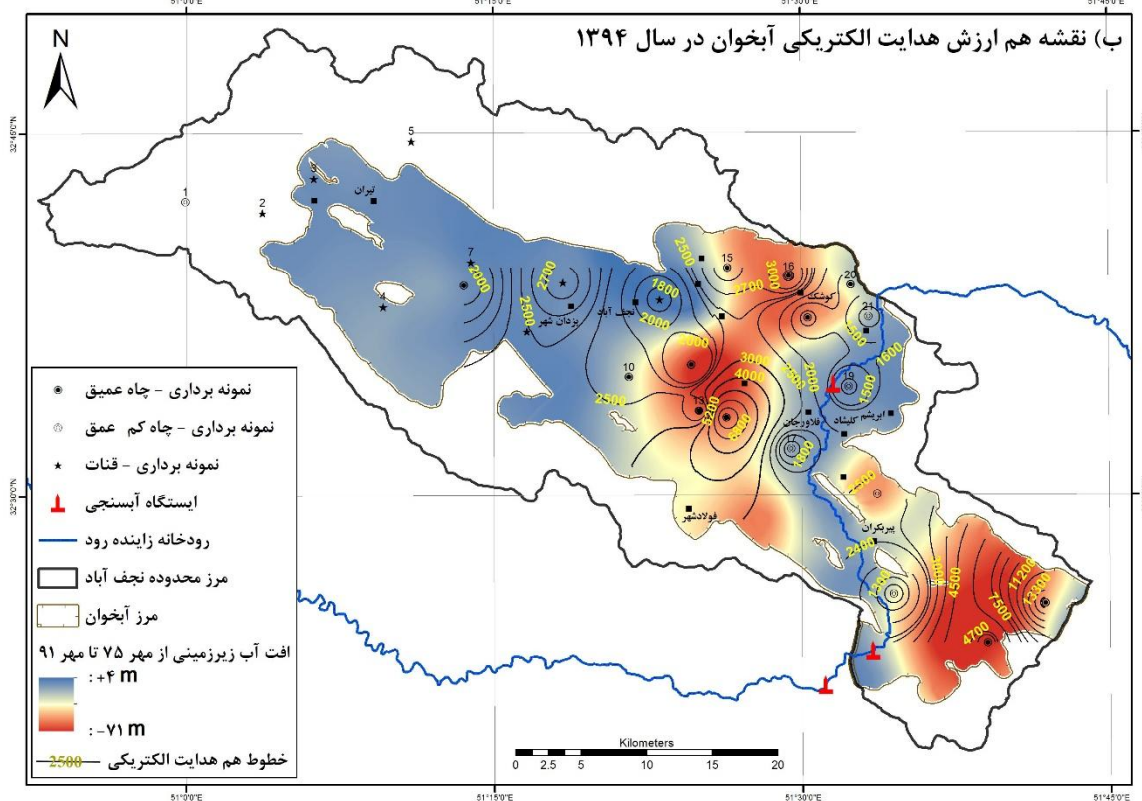
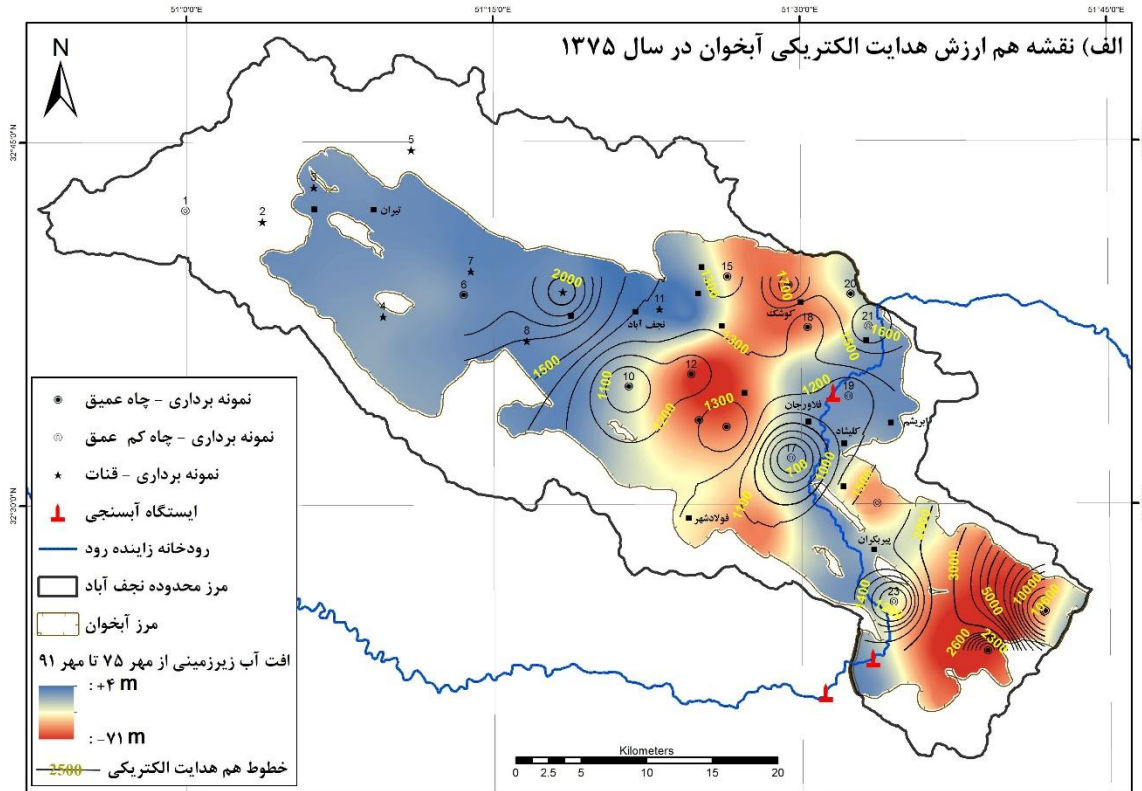
نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روند تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد، طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۱ از طریق رسم کردن

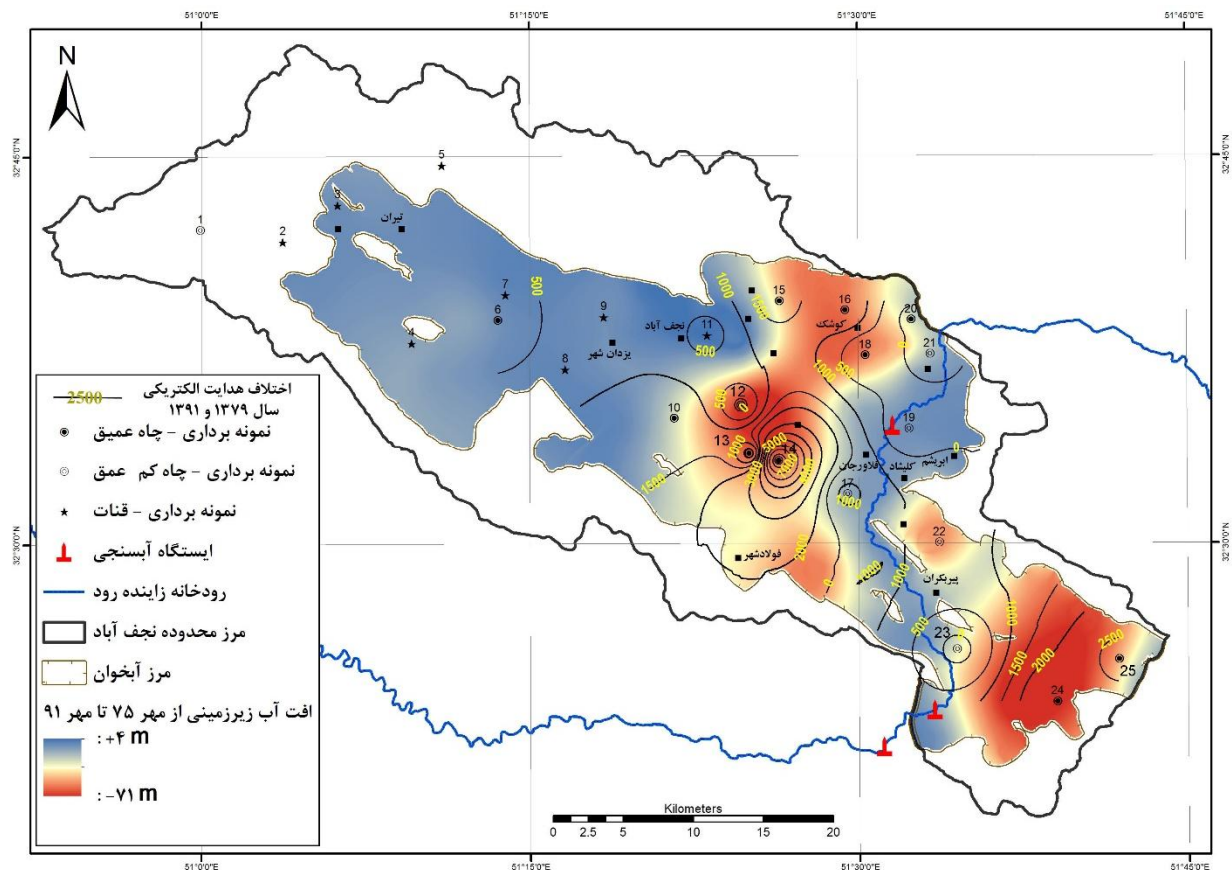
(افزایشی) است. نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که افزایش متوسط شوری متناسب با افت متوسط سطح آب زیرزمینی در آبخوان نجف‌آباد است. به‌منظور بررسی کیفیت این همبستگی، مقدار ضریب همبستگی متقابل سری زمانی سطح آب زیرزمینی آبخوان با سری زمانی متوسط شوری آبخوان محاسبه شده است. نتایج نشان داده است که میزان ضریب همبستگی متقابل دو سری زمانی یاد شده با تأخیر زمانی صفر سال برابر با $0/8-$ است که بیانگر همبستگی قوی این دو سری زمانی و همین‌طور تأثیرات منفی روند افت سطح آب زیرزمینی بر میزان شوری آب در آبخوان نجف‌آباد است (جدول ۲).

نقشه افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در طی مهر ۱۳۷۵ تا مهر ۱۳۹۱ توأم با نقشه میزان هدایت الکتریکی در سال‌های ۱۳۷۵ و سال ۱۳۹۱ در شکل (۱۱) ارائه شده است. به یک نگاه کلی، ملاحظه می‌شود، هم‌سو با جهت جریان آب زیرزمینی، میزان هدایت الکتریکی از سمت غرب و شمال غرب به سمت جنوب غرب افزایش می‌یابد. در محدوده اطراف رودخانه زاینده‌رود، به دلیل نشت آب سطحی هدایت الکتریکی کاهش نشان می‌دهد. همان‌طوری که نقشه‌ها (و همین‌طور نمودارهای شکل ۹ و ۱۰) نشان می‌دهند، میزان هدایت الکتریکی در کل آبخوان، در طی ۱۶ سال مورد بررسی روند افزایشی داشته و به‌ویژه در محل مخروط‌های افت افزایش بیشتری داشته است. نقشه اختلاف هدایت الکتریکی سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۹۱ (شکل ۱۲) نشانگر وجود بیشترین اختلاف هدایت الکتریکی در حوالی رودخانه به‌علت نشت به آبخوان و همچنین در محل مخروط‌های افت در اثر افت شدید در سطح آب زیرزمینی است.

سری زمانی تغییرات هدایت الکتریکی در منابع آبی عمیق (چاه‌های شماره ۶، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۴ و ۲۵) و کم‌عمق (چاه‌های شماره ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۲ و ۲۳) جهت بررسی دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌کارگیری آزمون من-کندال نشان داده است که فرض صفر در مورد همه نمونه‌هایی که خارج از موقعیت مخروط‌های افت منطقه‌ای قرار



شکل ۱۱. افت آب زیرزمینی طی مهر ۱۳۷۵ تا مهر ۱۳۹۱ همراه با خطوط تراز هدایت الکتریکی سال‌های الف) ۱۳۷۵ و ب) ۱۳۹۱ (ترسیم: نویسندگان) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۲. افت آب زیرزمینی از مهر ۱۳۷۵ تا مهر ۱۳۹۱ همراه با خطوط اختلاف هدایت الکتریکی سال‌های ۱۳۷۵ و ۱۳۹۱ (ترسیم: نویسندگان) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نقشه‌های هم‌پتانسیل، اختلاف سطح آب طی سال‌های یاد شده، تهیه هیدروگراف واحد آبخوان و همین‌طور وجود یا عدم وجود روند در سری زمانی سطح آب زیرزمینی از طریق آزمون من-کندال مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه تراز آب زیرزمینی آبخوان در مهرماه ۱۳۷۵ و مهرماه ۱۳۹۱، نشان از شکل‌گیری چندین مخروط افت منطقه‌ای در سطح آب زیرزمینی در خلال سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۱ دارد. نقشه مذکور نشان از افت بیش از ۷۰ متری سطح آب زیرزمینی در بخش‌های میانی آبخوان دارد. بررسی هیدروگراف واحد آبخوان نشان داده است که سطح آب زیرزمینی در کل آبخوان به‌طور متوسط سالانه ۱/۵ متر افت را تجربه کرده است. بررسی نقشه هم‌پتانسیل آبخوان در سال ۱۳۷۵ و ۱۳۹۱ نشان داده که آبخوان در گذشته نقش مهمی در آبدهی رودخانه داشته است اما در سالیان اخیر تغییر جهت

جریان آب زیرزمینی از سمت رودخانه به سمت آبخوان و به سمت مخروط‌های افت منطقه‌ای، باعث نشت آب رودخانه به سمت آبخوان شده است. آزمون من-کندال نشان از معنی‌دار بودن روند کاهشی سطح آب زیرزمینی آبخوان در دوره مورد مطالعه داشته است. تحلیل آماری سری‌های زمانی آبدهی رودخانه، برداشت از منابع آب زیرزمینی، آب توزیع شده در شبکه آبیاری نکوآباد و سری زمانی بارش، نشان داده است که روند معنی‌دار کاهشی در مقادیر آب توزیع یافته در شبکه نکوآباد و همین‌طور آبدهی رودخانه در مقطع ایستگاه لنج وجود داشته است. همچنین این بررسی‌ها، نشان از عدم وجود روند معنی‌دار در سری زمانی بارش داشته است. بررسی روند تخلیه آب‌های زیرزمینی نیز روند کاملاً مشخص افزایشی را نشان داده است. بررسی‌های

جدول ۳. نتیجه آزمون من-کندال در خصوص مقادیر هدایت الکتریکی آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد در محل‌های انتخابی

محل نمونه‌برداری	نوع منبع	نتیجه فرض صفر (عدم وجود روند)	P_Value	توضیحات
منبع آبی شماره ۶	چاه عمیق	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۴۱۷	شمال غرب آبخوان - خارج از مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۰	چاه عمیق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۰۱	در حاشیه مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۱	قنات	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۲۶۰	شرق نجف‌آباد - خارج از مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۳	چاه عمیق	رد (سطح اطمینان ۹۰٪)	۰/۰۰۹	در محدوده مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۴	چاه عمیق	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۲۰۸	در محدوده مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۵	چاه عمیق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۴۸	در حاشیه مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۶	چاه عمیق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۰۰۱	شمال کوشک - در محدوده مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۷	چاه کم‌عمق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۰۸	جنوب فلاورجان - در حاشیه مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۸	چاه عمیق	رد (سطح اطمینان ۹۰٪)	۰/۰۸۶	جنوب کوشک - در محدوده مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۱۹	چاه کم‌عمق	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۸۵۰	در حاشیه رودخانه - خارج از مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۲۰	چاه عمیق	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۵۹۵	در حاشیه رودخانه - خارج از مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۲۱	چاه کم‌عمق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۱۳	در حاشیه رودخانه - خارج از مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۲۲	چاه کم‌عمق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۰۰۱	شمال پیربکران - در محدوده مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۲۳	چاه کم‌عمق	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۸۳۹	در حاشیه رودخانه - خارج از مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۲۴	چاه عمیق	رد (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۰۰۲	در محدوده مخروط‌افته‌های منطقه‌ای
منبع آبی شماره ۲۵	چاه عمیق	قبول (سطح اطمینان ۹۵٪)	۰/۳۶۹	در حاشیه مخروط‌افته‌های منطقه‌ای

۱: طول دوره آمار نامطلوب است، ۲: طول دوره آماری نامطلوب است اما با توجه به نمودار، روند افزایشی کاملاً قابل مشاهده است و ۳: روند شوری این منبع آبی برخلاف دیگر منابع مورد بررسی، روندی کاهشی است

آب زیرزمینی در نقاط انتخابی آبخوان نشان داده است که مقدار افزایش شوری آب زیرزمینی در نواحی منطبق با موقعیت مخروط‌افته‌های منطقه‌ای کاملاً معنی‌دار بوده، درحالی‌که در مناطق خارج از موقعیت مخروط‌افته‌های منطقه‌ای معنی‌داری ملاحظه نشده است، همچنین تغییر اندک میزان هدایت الکتریکی در چاه‌های کم‌عمق اطراف رودخانه در سال‌های اخیر و حتی کاهش هدایت الکتریکی در حوالی رودخانه نسبت به بقیه قسمت‌های آبخوان، نشانگر نقش مؤثر رودخانه در تغذیه آبخوان است. بررسی نقشه‌های هم‌هدایت الکتریکی در سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۱ نشان داده است که میزان شوری آب در نواحی منطبق بر موقعیت مخروط‌افته‌های منطقه‌ای بین ۱۵۰۰ تا ۷۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، افزایش داشته است.

آمار، همبستگی متقابل قوی بین سری زمانی سطح آب زیرزمینی با سری‌های زمانی تخلیه از منابع آب زیرزمینی، آب توزیع شده در شبکه نکوآباد و آبدهی رودخانه را نشان داده است. این بررسی‌ها نشان دهنده عدم وابستگی افت سطح آب زیرزمینی آبخوان با مقدار بارش محدوده مطالعاتی بوده است که با نتایج تحقیقات به عمل آمده توسط کلاهدوزان (۱) و گندمکار (۱۰) هم‌خوانی دارد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده است که متناسب با شکل‌گیری و گسترش مخروط‌افته‌های منطقه‌ای در آبخوان، شوری آب زیرزمینی در کل آبخوان و به‌ویژه در محل مخروط‌افته‌های منطقه‌ای روند افزایشی داشته است. نتایج حاصل از بررسی آماری سری‌های زمانی تغییرات میزان هدایت الکتریکی

(۲۴).

با توجه به اینکه در دو دهه اخیر، روند افزایشی در سطوح زیر کشت منطقه مشاهده نشده است، لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که کمبود آب سطحی در سالیان اخیر (عمدتاً به دلیل مصارف بالادست حوضه) باعث توجه بیشتر زارعان منطقه به منابع محدود آب زیرزمینی شده و لذا افت شدید سطح آب زیرزمینی آبخوان را باعث شده است، البته در این بخش پیشنهاد می‌شود تا تغییرات احتمالی الگوی کشت در دو دهه اخیر در تحقیقی جداگانه مورد بررسی قرار گیرد.

بررسی لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد نشان داده است که جنس سنگ کف عموماً از شیست و شیل دوران دوم زمین‌شناسی است که در گروه سنگ‌های شکل‌پذیر قرار می‌گیرند. جهت اطمینان از این موضوع، پیشنهاد می‌شود تا بررسی‌های دقیق‌تر زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی جهت شناسایی دقیق‌تر سنگ کف به عمل آید، اما براساس اطلاعات موجود می‌توان چنین عنوان کرد که با توجه به شکل‌پذیری سنگ‌های مذکور، در صورتی که تحت تأثیر گسلش نیز قرار گرفته باشند، عموماً فاقد آنگذری لازم جهت انتقال آب بوده و لذا فرض وجود ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل جهت توجیه فرار آب از طریق سنگ کف و ایجاد مخروط‌های افت شدید در آبخوان، قابل تأیید نیست، از طرفی در سالیان گذشته که آبخوان تحت تأثیر تنش ناشی از اضافه برداشت چاه‌ها قرار نداشته، سطح آب زیرزمینی بالا بوده و آبخوان توسط رودخانه زهکشی می‌شده است (مثل سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۷۵) و در این دوره آثاری که بتواند ناشی از عملکرد گسل در انتقال آب از محدوده باشد، مشاهده نشده است.

سپاسگزاری

انجام این تحقیق بدون حمایت معنوی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان میسر نبوده و لذا مؤلفین بر خود وظیفه می‌دانند تا از مدیران و مسئولین این شرکت به‌ویژه معاون محترم برنامه‌ریزی و مدیریت مطالعات پایه شرکت، کمال قدردانی را داشته باشند.

بررسی نمودار متوسط شوری آب زیرزمینی آبخوان نیز نشان داده که هدایت الکتریکی متوسط آبخوان در طی دوره آماری یاد شده بیش از ۷۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر افزایش داشته است. بررسی‌های آماری، همبستگی متقابل قوی بین سری زمانی سطح آب زیرزمینی با سری زمانی متوسط هدایت الکتریکی آبخوان را نشان داده است. به عبارت دیگر، روند افزایش شوری متوسط آبخوان منطبق بر روند افت سطح آب زیرزمینی آبخوان بوده است.

نتایج این تحقیق نشان داده است که افت سطح آب زیرزمینی به دلیل بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبخوان حادث شده است و شواهدی مانند وضعیت بیلان آبخوان (۲ و ۳)، روند افزایشی حفر چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی، روند افزایشی اختلاف آبدی رودخانه در دو ایستگاه موسیان و لنج و همچنین همبستگی قوی بین افت سطح آب زیرزمینی با روند کاهش آبدی رودخانه و آب توزیعی در شبکه نکوآباد، آن را تأیید می‌کند. بررسی موقعیت چاه‌های عمیق منطقه و مخروط‌های افت، تطابق خوبی را نشان داده است. بیلان آبخوان در سطح محدوده مطالعاتی نجف‌آباد، بیانگر این موضوع است که پتانسیل تولید آب در داخل حوضه، توانایی تأمین آب مصارف مختلف محدوده را نداشته و آبخوان به شدت به منابع آبی خارج از حوضه که از طریق رودخانه و کانال‌های آبی تأمین می‌شود، وابسته است. بررسی بیلان آبخوان توسط مهندسین مشاور زاینده‌آب (۲) نشان داده است که آب برگشتی کشاورزی و همین‌طور تغذیه آبخوان از طریق رودخانه زاینده‌رود، نقش مهمی در بیلان آبی آبخوان نجف‌آباد دارد. براساس مطالعات بیلان آبخوان، در حدود ۱۹۰ میلیون مترمکعب از تغذیه آبخوان از طریق آب‌های سطحی منطقه تأمین می‌شود. تحقیقات مشابه براساس پیاده‌سازی مدل آب زیرزمینی در آبخوان نیز مؤید این موضوع بوده و نشان داده است که نرخ نشت آب در این منطقه، حدوداً پنج برابر سایر نقاط است که می‌تواند ناشی از برداشت‌های زیاد آب در حریم رودخانه و شکل‌گیری مخروط‌افت منطقه‌ای در آبخوان باشد.

منابع مورد استفاده

۱. کلاهدوزان، ع.، ی. دین پژوه، ر. میرعباسی نجف‌آبادی، ا. اسدی و ص. دربندی. ۱۳۹۴. تأثیر خشک شدن زاینده‌رود بر تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت نجف‌آباد در دو دهه اخیر. *تحقیقات آب و خاک ایران* ۴۶(۱): ۸۱-۹۳.
۲. مهندسین مشاور زاینده‌آب. ۱۳۹۴. بهنگام‌سازی بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی منتهی به سال آبی ۹۰-۱۳۸۹، جلد پنجم: ارزیابی منابع آب، ضمیمه شماره ۶: گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی نجف‌آباد (کد ۴۲۰۶).
۳. مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار. ۱۳۸۹. مطالعات بهنگام‌سازی اطلس منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی، جلد سوم: تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات و بیلان آب، بخش پنجم: تلفیق مطالعات و بیلان آب، پیوست شماره ۶: بیلان آب محدوده مطالعاتی نجف‌آباد.
4. Alley, W. M., T. E. Reilly and O. L. Franke. 1999. Sustainability of Groundwater Resources. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1186.
5. Bouwer, H. and T. Maddock. 1997. Making sense of the interaction between groundwater and streamflow: lessons for water masters and adjudicators. *Rivers* 6(1): 19-31.
6. Box, G. E. P., G. Jenkins and G. Reinsel. 1994. Time Series Analysis: Forecasting and Control; Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA.
7. Braaten, R. and G. Gates. 2003. Groundwater-surface water interactions in inland New South Wales: a scoping study. *Water Science and Technology* 48(7):215-224
8. Custodio, E. 2005. Intensive use of ground water and sustainability. *Ground Water* 43(3): 291.
9. Fiebig, D. M., M. A. Lock and C. Neal. 1990. Soil water in the riparian zone as a source of carbon for a headwater stream, *Journal of Hydrology* 116: 217-237.
10. Gandomkar, A. 2011. Investigating the precipitation and temperature change procedure in Zayanderood watershed, *World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)* 5: 43-47.
11. Gleeson, T., J. VanderSteen, M. A. Sophocleus, M. Taniguchi, W. M. Alley, D. Allen and Y. Zhou. 2010. Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience* 3: 378-379.
12. Gleeson, T., Y. Wada, M. F. P. Bierkens and L. P. H. Van Beek. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature* 488: 197-200.
13. Hancock, P. J., A. J. Boulton and W. F. Humphreys. 2005. Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater. *Hydrogeol Journal* 13: 98-111
14. Hewlett, J. D. and A. R. Hibbert. 1963. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage, *Journal of Geophysical Research* 68: 1081-1087.
15. Holder, J. J. E. Olsen and Z. Philip. 2001. Experimental determination of subcritical crack growth parameters in sedimentary rock: *Geophysical Research Letters* 28/4: 599-602.
16. Humphreys, W. F. 2009. Hydrogeology and groundwater ecology: Does each inform the other? *Hydrogeol Journal* 17: 5-21.
17. Hunt, B. 1999. Unsteady stream depletion from ground water pumping. *Ground Water* 37: 98-102.
18. Kendall, M. G. 1975. Rank Correlation Measures. Charles Griffin, London.
19. Konikow, L. F. and E. Kendy. 2005. Groundwater depletion—A global problem. *Hydrogeology Journal* 13(1): 317-320.
20. Mann, H. B. 1945. Non-parametric test against trend. *Econometrica* 13: 245-259.
21. Pionke, H. B., J. R. Hoover, R. R. Schnabel, W. J. Gburek, J. B. Urban and A. S. Rogowski. 1988. Chemical-hydrologic interactions in the near-stream zone. *Water Resource Research* 24: 1101-1110.
22. Schwartz, F. W. and M. Ibaraki. 2011. Groundwater—A resource in decline. *Elements* 7: 175-179.
23. Singhal, B. B. S. and R. P. Gupta. 2010. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer Publication. United States.
24. Sklorz, S., M. Kaltofen and B. Monninkhoff. 2015. Groundwater Model for the Zayandeh Rud Catchment. Integrated Water Resource Management in Isfahan, Iran, BMBF Project, DHI-WASY.
25. Theis, C. V. 1940. The source of water derived from wells—Essential factors controlling the response of an aquifer to development. *Civil Engineering* 10: 277-280.
26. Triska, F. J., J. H. Duff and R. J. Avanzino. 1993. The role of water exchange between a stream channel and its hyporheic zone in nitrogen cycling at the terrestrial-aquatic interface. *Hydrobiologia* 251: 167-184.
27. Woessner, W. W. 2000. Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38: 423-429
28. Xu, Z. X., K. Takeuchi and H. Ishidaira. 2003. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. *Journal of Hydrology* 279: 144-150.

Groundwater Depletion and Stream-Aquifer Interaction (Case Study: The Najafabad Aquifer in Zayandehroud River Basin)

M. Mirmohammad Sadeghi¹, B. Ebrahimi^{*2} and M. Pasandi³

(Received: September 20-2016 ; Accepted: July 15-2017)

Abstract

Depletion and consequently reduction in groundwater storage results in numerous harmful environmental effects such as reduction in yields of wells, land subsidence, lowering of water quality and also reduction in storage of surface water bodies having hydraulic relation with aquifers. In this research, groundwater depletion in the Najafabad subcatchment aquifer located in the GavKhouni basin, Isfahan province was evaluated. These studies indicate groundwater depletion and deterioration of the aquifer water quality during the recent years. Zayandehroud River had been effluent and it has recently converted to influent and dominantly recharges the aquifer. The groundwater depletion in this region has been due to wells overpumping and it does not comply with the uniform rainfall variations in recent years. According to the shaly aquifer bedrock, the groundwater depletion cannot be due to leakage through the bedrock. Moreover, the groundwater quality has been deteriorated in all parts of the aquifer, especially in the regional drawdown cones resulted from recently groundwater overexploitation by deep wells. The river leakage to the aquifer is predicted to be persistent and increasing according to results of the research and it is necessary to limit the groundwater extraction and change the average surface water inflow to the area to mid 1370s condition.

Keywords: Interaction, Depletion, Aquifer, Najafabad

1. Department of Civil Engineering, Water and Natural Environment, Isfahan Higher Education and Research Institute (IHEARI), Ministry of Energy, Isfahan, Iran.

2. Water Planning Office, Isfahan Regional Water Company, Isfahan, Iran.

3. Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mbeb50@yahoo.com