

کاربرد رویکرد بیلان جرمی در ارزیابی تغییرات تبادل آب‌های سطحی و زیرزمینی در زیرحوضه لنجان‌ات

سید علی اصغر هاشمی شیخ شبانی^۱، روح‌الله فتاحی نافچی^{۲*} و حسین صمدی بروجنی^۳

چکیده

در سال‌های اخیر، استخراج بیش از حد آب از آبخوان‌ها در سراسر کشور، پایداری منابع آب زیرزمینی را تهدید کرده است. از این رو، شناخت ارتباط آب سطحی و آب زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، براساس بیلان آب سطحی و جریان ماهانه چهار ایستگاه آب‌سنجی متوالی سد تنظیمی، پل زمانخان، پل کله و لنج واقع بر رودخانه زاینده‌رود، به‌ازای هر ماه، معادله‌ای برای خروجی هر بازه رودخانه استخراج شد. پارامترهای این معادله، بیانگر ارتباط خالص آب سطحی با جو و آب زیرزمینی است. داده‌ها به دو دوره زمانی بیست‌ساله (۱۳۵۳ تا ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۲) تقسیم و تبادل آب در دو دوره مقایسه شد. نتایج مطالعه سه بازه سد تنظیمی - پل زمانخان، پل زمانخان - پل کله و پل کله - لنج نشان داد که در بازه اول طی دو دوره زمانی، آب زیرزمینی به‌طور خالص تغذیه‌کننده آب سطحی بوده است. آب سطحی بازه انتهایی، در دوره زمانی اول، تغذیه‌کننده آب زیرزمینی بوده؛ در حالیکه در دوره زمانی دوم (۱۳۷۳-۱۳۹۲) در اکثر ماه‌ها به وسیله آب زیرزمینی تغذیه شده است. در خشکسالی شدید به‌جز بازه اول، دو بازه دیگر دچار کمبود آب شدند. یافته‌ها نشان داد که افزایش آب سطحی به وسیله آب زیرزمینی، اهمیت بالایی در تأمین آب در شرایط خشکسالی دارد. براساس نتایج، روش ارائه شده، ابزار مناسبی در بررسی تبادل آب سطحی با آب زیرزمینی است.

واژه‌های کلیدی: بیلان جرمی، بازه رودخانه، تبادل آب سطحی و آب زیرزمینی، جریان ورودی و خروجی.

ارجاع: هاشمی شیخ شبانی س.ع.ا. فتاحی نافچی ر. و صمدی بروجنی ح. ۱۳۹۸. کاربرد رویکرد بیلان جرمی در ارزیابی تغییرات تبادل آب‌های سطحی و زیرزمینی در زیرحوضه لنجان‌ات. مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۱۲۷-۱۳۶.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: fatahi2@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸

مقدمه

از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند. نتایج این مطالعه، بیانگر اهمیت رودخانه زاینده‌رود در تغذیه سفره آب زیرزمینی است. مطالعات دیگری نیز با همین رویکرد در حوضه زاینده‌رود انجام شد که از جمله می‌توان به مطالعات سامانی مجد (۱۳۷۹)، صفوی (۱۳۸۳) و کارآموز و همکاران (۱۳۸۵) اشاره کرد. جیسک و میران‌زاده (۲۰۰۰) نیز آبخوان دشت لنجان را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی و تبادل آبخوان با رودخانه را بررسی کردند. روش آماری، رویکردی دیگر در بررسی ارتباط آب‌های سطحی و زیرزمینی است. کلاه‌دوزان و همکاران (۱۳۹۳) با آزمون ناپارامتری من-کنندال روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان دشت نجف‌آباد را پس از خشک‌شدن زاینده‌رود بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که تمامی پیژومترهای واقع در شبکه‌های آبیاری و زهکشی دارای روند منفی بوده‌اند.

در این مطالعه برای بررسی تبادل آب بین رودخانه و آبخوان، روشی به کار گرفته شده است که در آن با استفاده از بیلان هیدرولوژیکی در یک بازه رودخانه، معادله‌ای بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به دست می‌آید که نتیجه آن، دستیابی به ارتباط خالص آب سطحی و آب زیرزمینی است. این روش زیرمجموعه رویکردهای بیلان جرمی و اصلاح‌شده روشی است که توسط لیو و شنگ (۲۰۱۱) ارائه شده است. در روش ارائه‌شده، برداشت‌های مربوط به شرب و صنعت، آب بازگشتی و انتقال آب بین بازه‌ها در نظر گرفته نشده است و اجرای این روش در سیستم پیچیده رودخانه زاینده‌رود نتایج دقیقی به دست نخواهد داد. بنابراین در این مطالعه با انجام اصلاحاتی، تبادل آب سطحی و آب زیرزمینی در سه بازه از رودخانه زاینده‌رود در پایین‌دست سد، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه این تحقیق، شامل سه بازه از رودخانه زاینده‌رود، حد فاصل ایستگاه‌های سد تنظیمی، پل زمانخان، پل کله و لنج، واقع در پایین‌دست سد زاینده‌رود، در حوضه لنجان است. پایین‌دست سد زاینده‌رود، یک ناحیه نیمه‌خشک با تنش آبی بالاست که در آن کمبود مزمن آب، توسعه اقتصادی را محدود می‌کند (سالمی و همکاران، ۲۰۰۰؛ وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۸؛

در چرخه هیدرولوژیکی، آب سطحی و آب زیرزمینی اجزای به‌هم پیوسته و در ابعاد مختلف با یکدیگر در ارتباط هستند (سافکلوس، ۲۰۰۲). امروزه به دلیل استفاده تلفیقی از این منابع، مطالعه اندرکنش بین این دو منبع مورد توجه قرار گرفته است. در دهه‌های اخیر نیز با افزایش توسعه و تخریب اکوسیستم‌ها، بر ارتباط آب زیرزمینی با آب سطحی تأکید بیشتری شده است (وینتر، ۱۹۹۹؛ سافکلوس، ۲۰۰۲). اهمیت بررسی این ارتباط در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که متکی به منابع آب زیرزمینی هستند، بیشتر است. در سال‌های اخیر، استخراج بیش از حد آب از آبخوان‌های سراسر کشور به‌ویژه حوضه زاینده‌رود، پایداری منابع آب زیرزمینی را تهدید کرده است. از این رو، شناخت ارتباط آب سطحی و آب زیرزمینی در حوضه زاینده‌رود از اهمیت بالایی برخوردار است. بیلان جرمی، یکی از رویکردهای بررسی ارتباط رودخانه و آبخوان است (منسیو و همکاران، ۲۰۱۴). براساس بیلان جرمی، هر تغییری در مقدار و خصوصیات آب سطحی به یک منبع آب مربوط می‌شود (کالبوس و همکاران، ۲۰۰۶). مثلاً تراوش آب زیرزمینی در بستر رودخانه را می‌توان از اختلاف جریان در ایستگاه‌های متوالی در طول رودخانه محاسبه کرد (هاروی و واگنر، ۲۰۰۰؛ فارتسوورس، ۲۰۱۱؛ و منسیو و همکاران، ۲۰۱۴). روش دیگر برآورد سهم آب زیرزمینی در جریان سطحی، تجزیه هیدروگراف جریان است. در این روش فرض می‌شود جریان پایه، ورودی آب زیرزمینی به رودخانه است ارفع‌نیا و سامانی (۱۳۸۶) با استفاده از این رویکرد، هیدروگراف جریان رودخانه زاینده‌رود را در یک دوره ۱۵ ساله تفکیک کردند. نتایج این تحقیق نشان داد جریان پایه ۸۲/۴ درصد از جریان رودخانه زاینده‌رود را تشکیل می‌دهد. در بین روش‌های بیلان جرمی، ردیاب‌های شیمیایی و زیست‌محیطی نیز به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (پرتی و همکاران، ۲۰۰۶؛ سولسبای و همکاران، ۲۰۰۷).

رویکرد مدل‌سازی دیگر، روش بررسی منابع آب سطحی و زیرزمینی است، که در این زمینه بحرینی و صفوی (۱۳۸۷) با شبیه‌سازی آبخوان دشت نجف‌آباد و رودخانه زاینده‌رود در گذر از آن، به بررسی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در این منطقه پرداختند. بدین‌منظور

نیکیوی و زیبایی، ۱۳۹۱). آمار جریان چهار ایستگاه برای بررسی تبادل آب سطحی با آب زیرزمینی زیرین آن به کار

گرفته شد. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک منطقه مورد مطالعه

مساحت حوضه لجانان در حدود ۴۰۰۰ کیلومتر مربع است. میانگین بارش حوضه حدوداً ۲۵۰ میلی‌متر در سال است که حداکثر آن در ایستگاه پل زمانخان با میانگین ۳۵۰ میلی‌متر در سال و کمترین مقدار در خروجی حوضه (ایستگاه لنج) با میانگین ۱۴۰ میلی‌متر در سال ثبت شده است. میانگین حداکثر و حداقل دما در منطقه مورد مطالعه، به ترتیب ۱۹/۶ و ۴/۸ درجه سلسیوس است. متوسط درازمدت جریان سالانه رودخانه زاینده‌رود در محل سد تنظیمی زاینده‌رود معادل ۱۴۴۰ میلیون مترمکعب در سال است.

در این مطالعه براساس بیلان آب سطحی در هر یک از بازه‌های مورد مطالعه، معادله‌ای به دست می‌آید که مجموع خروجی‌های هر بازه به صورت تابعی از ورودی رودخانه در آن بازه خواهد بود. پارامترهای این معادله، بیانگر نحوه و میزان تبادلات آب در آن بازه خواهد بود. در منطقه مورد مطالعه، علاوه بر مسیر رودخانه، تبادل آب بین بازه‌ها از طریق کانال‌های برداشت و انتقال آب بین حوضه‌ای نیز صورت می‌گیرد، که باید در معادله بیلان وارد شوند. برداشت آب شرب اصفهان، آب انتقالی به یزد، آب انتقالی به شبکه جرقویه و آب انحرافی به شبکه‌های نکوآباد و برخوار، از جمله برداشتها و انتقال‌های آب در این منطقه‌اند. بدین منظور، در کنار داده‌های دبی جریان ایستگاه‌های سدتنظیمی، پل زمانخان، پل کله و لنج، از

سری تاریخی داده‌های برداشت و انتقال آب نیز استفاده شد.

آمار برداشت آب شرب اصفهان و آب انحرافی به شبکه نکوآباد از سال ۱۳۶۷ و داده‌های انتقال آب به یزد و شبکه مهیار- جرقویه به ترتیب از سال ۱۳۷۹ و ۱۳۷۶ موجودند. منبع تهیه این داده‌ها، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان است. میزان پمپاژهای کوچک، برداشتهای شرب و صنعت و آب بازگشتی نیز از مؤلفه‌های بیلان آب سطحی در هر بازه حاصل شد. در این مطالعه از مقادیر متوسط سالانه این متغیرها، گزارش شده در مطالعه قبلی سالمی و حیدری (۱۳۸۵) استفاده شد. در مطالعه حاضر، معادلات خروجی سه بازه مورد مطالعه طی دو دوره زمانی (۱۳۷۲-۱۳۵۳ و ۱۳۹۲-۱۳۷۳)، استخراج و روند تبادلات در بازه‌ها بررسی شد. در بازه سوم به دلیل شروع آمار دبی ایستگاه لنج از سال ۱۳۶۰، استخراج معادلات در دوره زمانی اول براساس آمار سال‌های آبی ۱۳۷۲-۱۳۶۰ انجام پذیرفت. در ادامه، نحوه کاربرد این داده‌ها و تولید توابع خروجی بازه‌ها ارائه خواهد شد. طبق لیو و سنگ (۲۰۱۱) و براساس معادله بیلان، می‌توان آب خروجی هر بازه را به صورت زیر نوشت:

$$Q_{so} = Q_{si} - \Delta S_s + (Q_p - Q_e) + (Q_{gg} - Q_{gl}) + (Q_{ig} - Q_{il} - Q_{ET}) \quad (1)$$

که در آن: Q_{so} ، خروجی آب سطحی از هر بازه به بازه پایین دست آن؛ Q_{si} ، ورودی آب سطحی از بازه بالادست؛ ΔS_s ، تغییر ذخیره آب سطحی بازه؛ Q_p ، افزایش آب

$$f(Q_{si}) = f(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n Q_{si}^n \quad (۴)$$

که در آن، α_n ها، مقادیری ثابت هستند. زمانی که به دلیل تشابه آب و هوایی در دو بازه مجاور مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند حوضه زاینده‌رود، Q_{si} برابر صفر باشد، انتظار می‌رود مقدار $f(0)$ نیز صفر باشد. حال می‌توان از توابع چندجمله‌ای برای تخمین ΔQ_a استفاده کرد. بنابراین، می‌توان از معادله (۳) یک معادله عمومی به صورت معادله (۵) برای خروجی شبیه‌سازی شده استخراج کرد:

$$Q_{so}^T = \sum_{j=2}^n \alpha_j Q_{si}^j + (1 + \alpha_1) Q_{si} + C_g \quad (۵)$$

در معادله بالا، ملاحظه می‌شود که جریان خروجی خالص شبیه‌سازی شده هر بازه به صورت یک تابع چندجمله‌ای از جریان ورودی تعریف می‌شود. از این رو، می‌توان با رسم نمودار داده‌های ورودی هر بازه در برابر خروجی خالص و برازش یک تابع چندجمله‌ای بر آنها، به مقادیر پارامترهای معادله (۵) دست یافت. لازم به ذکر است که خروجی خالص از جمع جریان خروجی ثبت شده با جریان انتقالی خالص و برداشت شرب و صنعت منهای آب بازگشتی (سمت چپ معادله (۲)) به دست می‌آید. همان‌گونه که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، در این مطالعه فرم خطی برای بیان خروجی خالص شبیه‌سازی شده کافی است. بر این اساس، در فرم خطی معادله هرگاه α_1 و C_g برابر با صفر باشند، آب سطحی هیچ ارتباطی با آب زیرزمینی و جو ندارد. اگر C_g بزرگ‌تر از صفر باشد، آب زیرزمینی تغذیه‌کننده آب سطحی است؛ در غیر این صورت، سیستم آب سطحی تلفاتی به آب زیرزمینی داشته است. زمانی که α_1 بزرگ‌تر از صفر باشد، سیستم آب سطحی به‌طور خالص به وسیله آب موجود در جو افزایش یافته است و هرگاه مقدار آن کمتر از صفر باشد، نشان از تلفات خالص آب سطحی به جو دارد.

نتایج و بحث

معادلات خروجی شبیه‌سازی شده

طبق روش ارائه شده در بخش قبل، معادلات خروجی شبیه‌سازی شد و ارتباط بین آب سطحی و آب زیرزمینی در سه بازه مورد مطالعه بررسی و الگوی ارتباط بین آنها در دو دوره زمانی ارزیابی شد. برای استخراج معادلات

سطحی به وسیله جو (بارندگی و ذوب برف)؛ Q_e ، تبخیر از آب سطحی بازه؛ Q_{gg} ، افزایش آب سطحی بازه با منشأ آب زیرزمینی؛ Q_{gl} ، تلفات آب سطحی بازه با نشت به آب زیرزمینی؛ Q_{ig} ، افزایش آب سطحی در اثر زهکشی کشاورزی؛ Q_{il} ، نفوذ عمقی آب آبیاری؛ و Q_{ET} ، تلفات تبخیر و تعرق از آب آبیاری هستند. ابعاد همه متغیرهای ذکر شده، مکعب طول بر زمان است. در معادله بالا به برداشت‌های شرب و صنعت از آب سطحی و آب بازگشتی آنها به رودخانه و همچنین جابه‌جایی آب بین بازه‌ها، خارج از مسیر رودخانه اصلی اشاره نشده است. در این مطالعه با دخیل کردن برداشت‌های شرب و صنعت و انتقال بین بازه‌ها، تغییراتی در معادله (۱) ایجاد و به صورت معادله (۲) اصلاح شد:

$$Q'_{so} = Q_{so} + Q_{to} + Q_{di} - Q_r - Q_{ti} \\ = Q_{si} - \Delta S_s + (Q_p - Q_e - Q_{ET}) \\ + (Q_{gg} - Q_{gl} - Q_{il}) \quad (۲)$$

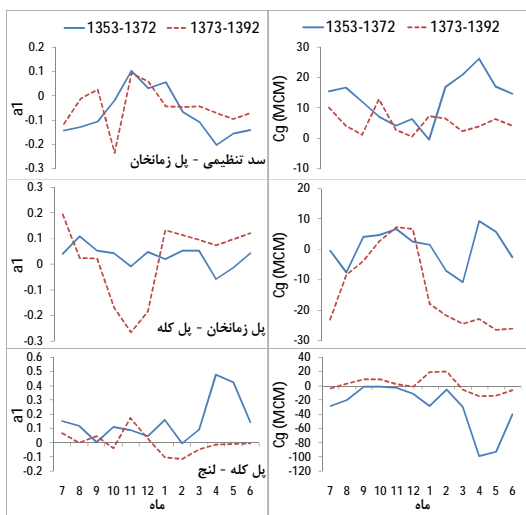
که در آن، Q_{to} و Q_{ti} ، به ترتیب آب انتقالی ورودی و خروجی بازه؛ Q_{di} ، برداشت‌های شرب و صنعت؛ و Q_r ، کل آب بازگشتی هستند. با ارائه فرضیات ساده‌کننده لیو و شنگ (۲۰۱۱)، می‌توان خروجی خالص شبیه‌سازی شده (Q_{so}^T ، شکل ۲) را به صورت معادله (۳) ارائه کرد. این فرضیات، عبارت‌اند از: (۱) خروجی شبیه‌سازی شده، جریان ماهانه ماندگاری است که به ازای مقدار مشخصی ورودی ماندگار، در یک ماه از سیستم آب سطحی بازه خارج می‌شود؛ (۲) از تغییرات عمق آب سطحی در مقطع زمانی مذکور صرف‌نظر می‌شود؛ (۳) سطح آب زیرزمینی نیز ثابت فرض می‌شود. در معادله (۳)، Q_{so}^T ، شبیه‌سازی شده عبارت سمت چپ معادله (۲) است (لیو و شنگ، ۲۰۱۱).

$$Q_{so}^T = Q_{si} - \Delta Q_a + C_g \quad (۳)$$

در معادله بالا، $\Delta Q_a = Q_p - Q_e - Q_{ET}$ نشان‌دهنده ارتباط آب سطحی با آب موجود در جو در یک بازه از رودخانه است. $C_g = Q_{gg} - Q_{gl} - Q_{il}$ بیانگر تبادل آب سطحی با آب زیرزمینی در آن بازه است. تغییرات Q_e ، Q_{ET} و Q_{ET} به تغییر آب و هوا و مدیریت آبیاری در محدوده هر بازه بستگی دارد. همچنین، ورودی بازه (Q_{si}) الزاماً تحت تأثیر شرایط آب و هوایی و مدیریت آب در بالادست قرار دارد. بنابراین، می‌توان فرض کرد که ΔQ_a تابعی از Q_{si} است. بسط مک لورن این تابع را می‌توان بدین صورت نوشت:

مطالعه نیز در شکل ۲ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در بازه سد تنظیمی تا پل زمانخان طی دوره ۱۳۵۳ تا ۱۳۷۲، تبادل خالص آب سطحی با جو (ضریب α_1) در سه ماه بهمن، اسفند و فروردین مثبت بوده و در بقیه ماه‌ها، آب سطحی دارای تلفات خالص به جو است. این الگو در دوره زمانی دوم (۱۳۷۳ تا ۱۳۹۲) نیز تقریباً به همین صورت تکرار شده است (شکل ۲).

عمده بارندگی منطقه نیز در زمستان و اوایل بهار روی می‌دهد و از این رو، آب سطحی در تبادل مثبت با جو است. براساس نتایج، تبادل خالص آب سطحی با آب زیرزمینی در بازه اول، طی دو دوره، همواره مثبت است؛ به این معنی که آب زیرزمینی در این مقطع از رودخانه تغذیه‌کننده آب سطحی است. تنها ورودی آب سطحی در بازه سد تنظیمی - پل زمانخان، آب رهاشده از سد تنظیمی بوده و خروجی آن نیز در محل ایستگاه پل زمانخان واقع است. در این بازه هیچ انتقال آبی به خارج از حوضه صورت نمی‌گیرد و برداشت از رودخانه تنها شامل پمپاژهای کوچک و برداشت آب شرب ساکنان محلی است. دبی متوسط سالانه برداشت آب و بارندگی در این بازه به ترتیب برابر ۳ و ۱/۲ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است (سالمی و حیدری، ۱۳۸۵).



شکل ۲ - روند تغییرات ضریب a_1 و C_g

تغذیه خالص آب سطحی بازه سد تنظیمی - پل زمانخان توسط آب زیرزمینی، می‌تواند تحت تأثیر ارتباطات هیدرولیکی دریاچه سد با آب زیرزمینی و نفوذ عمقی از اراضی کشاورزی در این منطقه صورت گیرد. آب زیرزمینی

خروجی شبیه‌سازی شده در پایین دست سد زاینده رود از داده‌های جریان ماهانه رودخانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی سد تنظیمی، پل زمانخان، پل کله و لنج و همچنین داده‌های انتقال آب، برداشت شرب و صنعت و آب بازگشتی استفاده شد. داده‌های موجود، امکان بررسی تبادل آب را طی دو دوره زمانی قبل و بعد از سال آبی ۱۳۷۲ فراهم می‌کنند. معادلات به وسیله نرم‌افزار Excel از داده‌های ماهانه ورودی و خروجی بازه‌های رودخانه برای سه بازه به دست آمدند. نمونه‌ای از روابط استخراج شده برای بازه پل زمانخان - پل کله در شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر پارامترهای معادلات شبیه‌سازی شده نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

روند محاسبات بدین گونه است که ابتدا، مؤلفه‌های بیلان شامل جریان خروجی هر بازه، آب انتقالی از/ به بازه، برداشت‌های شرب و صنعت در هر ماه با یکدیگر جمع و منهای جریان بازگشتی شده تا مقدار سمت چپ معادله (۲) در هر ماه محاسبه شود. آمار ماهانه برداشت شبکه نکوآباد، شرب اصفهان، شبکه آبیاری مهیار - جرقویه و انتقال به یزد به ترتیب از سال ۱۳۶۳، ۱۳۶۷، ۱۳۷۶ و ۱۳۷۸ موجود است. به دلیل نبود آمار ماهانه برداشت شرب و صنعت در این مطالعه از متوسط سالانه این متغیرها، گزارش شده توسط سالمی و همکاران (۱۳۸۵)، استفاده شد. بر این اساس، دبی متوسط سالانه شرب و پمپاژهای کوچک در بازه‌های منتهی به ایستگاه‌های پل زمانخان و پل کله به ترتیب برابر ۳ و ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه و پمپاژهای کوچک و برداشت شرب و صنعت در بازه پل کله - لنج نیز به ترتیب برابر ۶/۳ و ۲/۵ مترمکعب بر ثانیه بیان شده است. در مطالعه حاضر، همچون مطالعه سالمی و همکاران (۱۳۸۵)، میزان آب برگشتی از پمپاژهای کوچک، معادل ۲۰ درصد و مصارف شرب و صنعت در بازه سوم، معادل ۵۰ درصد در نظر گرفته شد.

در این مطالعه، با استفاده از ورودی‌ها و خروجی‌های هر بازه در هر دوره زمانی، به‌ازای هر ماه، یک معادله استخراج شد. همان گونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، بازه‌های مورد مطالعه در دو دوره دارای خروجی شبیه‌سازی شده با فرم خطی هستند. همچنین، مشاهده می‌گردد که شبیه‌سازی جریان در اکثر موارد دارای دقت مناسبی بود که مقادیر خطای مطلق آن را تأیید می‌کند. نحوه تغییرات تبادل آب سطحی با جو و آب زیرزمینی طی دو دوره مورد

در این منطقه از طریق ۸۰ چاه عمیق و نیمه‌عمیق، ۲۷۸ قنات و ۵۸۹ چشمه تخلیه می‌شود. ملاحظه می‌شود که برداشت آب زیرزمینی، بیشتر از طریق چشمه‌ها و قنات‌ها صورت می‌گیرد و نزدیک به ۸۵ درصد آن در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (بی‌نام، ۱۳۸۷).

از شکل ۲ مشاهده می‌شود که الگوی تغییرات ماهانه پارامترهای α_1 و C_g برخلاف یکدیگرند؛ بدین صورت که معمولاً با افزایش α_1 ، مقدار C_g کاهش یافته است و برعکس. بر این اساس، معمولاً در ماه‌هایی که آب سطحی به وسیله آب جوی به طور خالص افزایش می‌یابد، تغذیه‌کننده آب زیرزمینی بوده و طی ماه‌هایی که آب سطحی دارای تلفات به جو است، معمولاً آب زیرزمینی به تغذیه‌کننده آب سطحی تبدیل می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که معمولاً در فصل کشت که آب سطحی از طریق اراضی به صورت تبخیر-تعرق دارای تلفات است، تقاضا برای آب و در پی آن تخلیه آب‌های زیرزمینی باعث می‌شود که آب زیرزمینی به طور خالص آب سطحی را افزایش دهد. از شکل ۲ مشاهده می‌شود که تبادل خالص آب سطحی با آب زیرزمینی در بازه پل زمانخان - پل کله در ماه‌های آذر تا فروردین و همچنین تیر و مرداد مثبت است. تغذیه خالص آب سطحی به وسیله آب زیرزمینی را در زمستان می‌توان ناشی از کاهش برداشت آب زیرزمینی و بالآمدن سطحی ایستایی به دلیل بارش و کاهش برداشت دانست و وقوع آن را در تابستان می‌توان به نفوذ عمقی از اراضی تحت آبیاری نسبت داد. ملاحظه می‌شود که تغذیه خالص آب سطحی به وسیله آب زیرزمینی در دو بازه ابتدایی، در دوره ۱۳۹۲-۱۳۷۳ نسبت به دوره ۱۳۷۲-۱۳۵۳ کاهش داشته است. در صورتی که در بازه پل کله - لنج تغذیه خالص آب سطحی از طریق آب زیرزمینی افزایش یافته است.

در بازه پل زمانخان - پل کله، علاوه بر خروج آب از ایستگاه پل کله، در بالادست این ایستگاه انتقال آب شرب اصفهان و یزد انجام می‌شود. طرح انتقال آب شرب اصفهان از سال ۱۳۶۷ و آب انتقالی به یزد از سال ۱۳۷۸ راه‌اندازی شده است. میانگین سالانه آب انتقالی شهر اصفهان ۵/۸ مترمکعب بر ثانیه و آب انتقالی به یزد نیز ۱/۸ مترمکعب بر ثانیه است. در مطالعه سالمی و حیدری (۱۳۸۵) برداشت شرب و پمپاژهای کوچک در این بازه از رودخانه معادل ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است.

حد فاصل ایستگاه پل کله تا ایستگاه لنج شروع برداشت‌های مهم آب از زاینده‌رود است. تنها ورودی این بازه، جریان رودخانه اصلی از ایستگاه پل کله است. خروجی‌های این بازه، علاوه بر جریان رودخانه زاینده‌رود در ایستگاه لنج، شامل آب انتقالی به شبکه مهبیار - جرقویه و انحراف آب به شبکه نکوآباد هستند. برداشت متوسط سالانه آب صنایع و پمپاژهای کوچک در این بازه به ترتیب معادل ۲/۵ و ۶/۳ مترمکعب بر ثانیه گزارش شده است (سالمی و همکاران، ۱۳۸۵).

اندرکنش‌ها در یک سال آبی نرمال

در این مطالعه برای ارزیابی تبادل آب در سال آبی نرمال، از میانگین بلندمدت (۱۳۹۲-۱۳۵۳) جریان رودخانه زاینده‌رود در ایستگاه سد تنظیمی استفاده شد. متوسط جریان رودخانه در این دوره زمانی، برابر ۱۴۴۴ میلیون مترمکعب در سال بوده است. با توجه به سری تاریخی آورد رودخانه در این محل، مقدار جریان در سال آبی ۷۴-۱۳۷۳، معادل ۱۴۴۶ میلیون مترمکعب نزدیک‌ترین عدد به میزان متوسط است. از این رو، با انتخاب این سال به‌عنوان یک سال آبی نرمال، به کمک معادلات خروجی، مقادیر خروجی سه بازه مورد مطالعه در پایین‌دست سد محاسبه و نتایج در جدول ۲ آورده شد.

همان‌گونه که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود، تقریباً تمامی آب سطحی از محل سد تنظیمی به حوضه‌های پایین‌دست سد وارد و تنها مقدار ۵ میلیون مترمکعب در بازه پل زمانخان - پل کله به‌طور خالص به آب سطحی اضافه شده است. در تبادل خالص آب سطحی با آب زیرزمینی و جو، ۸ میلیون مترمکعب از آب سطحی بازه سد تنظیمی - پل زمانخان و ۴۴ میلیون مترمکعب در بازه سوم کاهش یافته است. براساس جدول ۲، در سال آبی نرمال از ایستگاه لنج معادل ۶۶۲ میلیون مترمکعب در سال آب سطحی خارج شده و به پایین‌دست سرازیر می‌شود.

بازه‌های مورد مطالعه به‌طور خالص در حدود ۹۵ میلیون مترمکعب (مجموع مقادیر مثبت در ستون سوم جدول ۲) در سال از جو آب دریافت می‌کنند و همچنین، ۱۰۹ میلیون مترمکعب (مجموع مقادیر منفی در ستون سوم جدول ۲) در سال از طریق تبخیر و تبخیر-تعرق از دست می‌دهند. افزایش خالص آب سطحی از طریق جو تنها در بازه منتهی به پل کله اتفاق افتاده است؛ در حالی که

اندرکنش‌ها در یک خشکسالی شدید

براساس آمار جریان سالانه رودخانه زاینده‌رود در ایستگاه سد تنظیمی، کمترین آورد رودخانه در سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۷۹ روی داده است. این سال آبی، به‌عنوان یک سال با خشکسالی شدید انتخاب و از داده‌های جریان آن برای بررسی تبادل آب استفاده شد. ورودی و خروجی هر بازه در جدول ۳ ارائه شده است. خروجی شبیه‌سازی شده در هر بازه با استفاده از روابط به‌دست آمده محاسبه گردید. مقادیر جریان در سال آبی نرمال نیز برای مقایسه با حالت خشکسالی در جدول ۳ آمده است.

در مقایسه با سال آبی نرمال، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در تبادل آب سطحی با آب زیرزمینی و جو در شرایط خشکسالی شدید مشاهده می‌شود. در بازه اول، تغذیه آب سطحی به وسیله آب زیرزمینی صورت گرفت. این افزایش آب سطحی ۱۷ درصد خروجی این بازه در شرایط خشکسالی است. در جدول ۳، ملاحظه می‌شود که طی خشکسالی، تنها بازه اول با کمبود مواجه نشده است. برداشت‌ها و تبادل آب به گونه‌ای بوده است که خروجی مشاهده شده سه بازه مورد مطالعه به نصف ورودی تقلیل یافته است. بازه اول در شرایط خشکسالی به‌طور خالص تغذیه‌کننده آب سطحی است؛ در حالی که در شرایط نرمال، این بازه به‌طور خالص برداشت‌کننده آب بوده است.

جدول ۳- تبادل آب در دوره‌های نرمال و خشکسالی، میلیون مترمکعب

نام بازه	پارامتر	ورودی محاسبه یا مشاهده شده	خروجی محاسبه یا مشاهده شده	تغذیه (+) یا برداشت (-) خالص ^a	خروجی شبیه‌سازی شده ^b	افزایش از منشأ آب زیرزمینی (%)
سد تنظیمی - پل زمانخان	نرمال	۱۴۴۶ ^d	۱۴۵۰ ^e	-۸	۱۴۵۰	۹۴ (۶٪)
	خشکسالی	۵۶۳ ^d	۵۶۴ ^d	۵۷	۶۳۲	۹۴ (۱۷٪)
پل زمانخان - پل کله	نرمال	۱۴۵۰ ^e	۱۲۸۵ ^e	۵	۱۲۸۵	
	خشکسالی	۵۶۴ ^d	۱۹۸ ^d	-۵۹	۳۴۸	
پل کله - لنج	نرمال	۱۲۸۵ ^e	۱۰۸۷ ^d	-۶۴	۹۳۷	
	خشکسالی	۱۹۸ ^d	۲۸۲ ^d	-۴۴	۶۶۲	
	اختلاف	-۱۰۹۷	-۳۸۰	۶	۳۱۰	
	اختلاف				-۳۵۲	

^a برداشت (+) یا مصرف (-) خالص برابر خروجی منهای ورودی.

^b خروجی شبیه‌سازی شده با معادلات خطی.

^c نسبت تغذیه (از منشأ آب زیرزمینی) به خروجی واقعی

^d مشاهده شده

^e محاسبه شده

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روشی برای بررسی تبادل آب سطحی و آب زیرزمینی پیشنهاد شد. این روش با داده‌های تجمعی جریان در ورودی و خروجی هر بازه از رودخانه و برداشت شرب و صنعت و آب بازگشتی تبادل آب را ارزیابی می‌کند. بر این اساس، یک معادله عمومی به دست می‌آید که خروجی یک تابع چندجمله‌ای از جریان ورودی است. مقدار ثابت معادله، نشان‌دهنده ارتباط آب سطحی با آب زیرزمینی و بقیه جمله‌های تابع، نشان‌دهنده ارتباط آب سطحی با جو است. در این مطالعه، تمامی بازه‌ها دارای خروجی با فرم خطی بودند. برای بررسی زمانی تغییرات

ارتباط آب سطحی و آب زیرزمینی، سری تاریخی داده‌ها به دو قسمت تقسیم شد و تبادل آب در دو دوره ۱۳۷۲-۱۳۵۳ و ۱۳۹۲-۱۳۷۳ بررسی و مقایسه شد. در این مطالعه، با استفاده از ورودی‌ها و خروجی‌های هر بازه در هر دوره زمانی، به‌ازای هر ماه، یک معادله استخراج شد. براساس معادلات به‌دست‌آمده از دوره آماری اول، آب سطحی در دو بازه منتهی به ایستگاه‌های پل کله و لنج در بیشتر ماه‌های سال، دارای ورودی خالص از جو بوده است. در بازه ابتدایی در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین آب سطحی به‌طور خالص از جو آب دریافت کرده است. معادلات استخراج شده از سری دوم داده‌ها (سال‌های آبی

منابع

۱. ارفع‌نیا ر. و سامانی ن. ۱۳۸۶. تفکیک مؤلفه‌های اصلی جریان در شاخه اصلی رودخانه زاینده‌رود و کاربردهای آن. مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان. ۲۹(۳): ۶۱-۸۰.
 ۲. بحرینی غ. و صفوی ح. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی اندرکنش منابع آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS). نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۴(۳): ۱۴-۲۶.
 ۳. بی‌نام. ۱۳۸۷. مطالعه منابع و مصارف آب در حوضه زاینده‌رود. مطالعات مرحله اول. وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای اصفهان. ۳۶۷ ص.
 ۴. سالمی ح.، ترابی م. و اشرفی ش. ۱۳۸۵. کاربرد مدل WBSM در حوضه آبریز زاینده‌رود (اصفهان). دو ماهنامه علمی و پژوهشی آب و فاضلاب. ۱۷(۲): ۱۹-۳۱.
 ۵. سالمی ح. و حیدری ن. ۱۳۸۵. گزارش فنی: ارزیابی منابع و مصارف آب در حوزه آبریز زاینده‌رود. نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۲(۱): ۷۲-۷۶.
 ۶. سامانی مجد ا. م. ۱۳۷۹. شبیه‌سازی بهره‌برداری هماهنگ از آب‌های سطحی و زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. ۱۲۴ ص.
 ۷. صفوی ح. ر. ۱۳۸۳. مدل شبیه‌سازی تلفیقی کمی- کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی. پایان‌نامه دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. ۲۳۸ ص.
 ۸. کلاهدوزان ع. دین‌پژوه ی. میرعباسی نجف‌آبادی ر. اسدی ا. و دربندی ص. ۱۳۹۳. تأثیر خشک شدن زاینده‌رود بر تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت نجف‌آباد در دو دهه اخیر. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران). ۴۶(۱): ۸۱-۹۳.
 ۹. کارآموز م. هاشمی علیا ر. مریدی ع. و احمدی آ. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی: مطالعه موردی: دشت لنجانان اصفهان. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران. ۱۲ ص.
- بین ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۳) نشان داد که عموماً پارامتر مرتبط با تبادل آب سطحی و جو کاهش یافته است؛ به این معنی که افزایش آب سطحی از طریق جو و آب زیرزمینی کاهش یافته و یا تلفات آب سطحی به آن‌ها بیشتر شده است. نتایج نشان داد آب سطحی در بازه منتهی به ایستگاه پل زمانخان در تمامی ماه‌ها به‌طور خالص به‌وسیله آب زیرزمینی افزایش یافته است؛ در حالی که در بازه‌های دیگر، تلفات آب سطحی به آب زیرزمینی در دو دوره آماری مشاهده شد. در دو بازه ابتدایی با گذر زمان از دوره اول به دوره دوم، پارامتر مربوط به تبادل آب سطحی با آب زیرزمینی در بیشتر ماه‌ها کاهش یافته است. این تغییر نشان می‌دهد که در گذر زمان آب زیرزمینی کمتر آب سطحی را تغذیه می‌کند و یا تلفات آب سطحی به آب زیرزمینی بیشتر شده است.
- روش مورد استفاده در شرایط آبی نرمال و خشکسالی شدید نیز مورد بررسی قرار گرفت. خروجی هر بازه با استفاده از معادلات به‌دست‌آمده از سری بلندمدت داده‌ها (۱۳۹۲-۱۳۵۳) در شرایط آبی دو سال مذکور محاسبه شدند. طبق نتایج، در شرایط نرمال تقریباً تمامی آب سطحی از حوضه بالادست تأمین می‌شود و تنها مقدار ناچیزی در بازه پل زمانخان- پل کله به‌طور خالص به آب سطحی اضافه می‌شود. طی خشکسالی، تنها بازه اول با کمبود مواجه نشده است. برداشت‌ها و تبادل آب به گونه‌ای بوده است که خروجی مشاهده شده سه بازه مورد مطالعه به نصف ورودی تقلیل یافته است.
- به‌دلیل نبود اطلاعات دقیق از برداشت‌ها و آب بازگشتی به رودخانه، مؤلفه‌های بیلان آب سطحی در این مطالعه به شکل کلی وارد معادله شدند و گاهی از داده‌های متوسط سالانه برای بیان آنها استفاده شد. با این حال، نتایج به‌دست آمده در این مطالعه و مقایسه آنها با داده‌ها و اطلاعات موجود در مطالعات پیشین، نشان داد که روش ارائه شده، ابزار مناسبی برای بررسی تبادل آب سطحی با آب زیرزمینی است. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این روش با داده‌های دقیق‌تری از برداشت و آب بازگشتی مورد بررسی قرار گیرد. مقایسه نتایج این روش در ابعاد زمانی مختلف با سناریوهای مدیریتی و هیدرولوژیکی گوناگون می‌تواند مبنای مطالعات دیگر در این راستا باشد.

- Gieske A. 2000. Water Management for Sustainable Irrigated Agriculture in the Zayandeh Rud Basin, Esfahan Province, Iran: Iranian Agricultural Engineering Research Institute (IAERI). 18 p.
21. Sophocleous M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*. 10(1): 52-67.
22. Soulsby C. Tetzlaff D. Van den Bedem N. Malcolm I. Bacon P. and Youngson A. 2007. Inferring groundwater influences on surface water in montane catchments from hydrochemical surveys of springs and streamwaters. *Journal of Hydrology*. 333(2): 199-213.
23. Winter T. C. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*. 7(1): 28-45.
۱۰. نیکویی ع. و زیبایی م. ۱۳۹۱. مدیریت منابع آب و امنیت غذایی حوضه زاینده رود: کاربرد روش تحلیل یکپارچه حوضه آبریز رودخانه. اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۳): ۱۸۳-۱۹۶.
۱۱. وردی‌نژاد و. سهرابی ملایوسف ت. حیدری ن. عراقی‌نژاد ش. و مامن‌پوش ع. ۱۳۸۸. بررسی عرضه و تقاضا و برآورد بهره‌وری آب کشاورزی در حوضه آبریز زاینده‌رود مطالعه موردی: شبکه آبیاری سمت راست آبشار. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۲): ۸۸-۹۹.
12. Farnsworth H. A. 2011. Eastern Truckee Meadows Groundwater Interactions with the Truckee River: University of Nevada, Reno. 89 p..
13. Gieske A. Miranzadeh M. 2000. Groundwater Resources Modeling of the Lenjanat Aquifer System. IAERI-IWMI Research Reports
14. Hannula S. R. Esposito K. J. Chermak J. A. Runnells D. D. Keith D. C. and Hall L. E. 2003. Estimating ground water discharge by hydrograph separation. *Groundwater*. 41(3): 368-75.
15. Harvey J. W. and Wagner B. J. 2000. Quantifying hydrologic interactions between streams and their subsurface hyporheic zones. In *Streams and Groundwaters*, Jones J.B. and Mulholland P. J. (Eds.), Academic Press. pp. 3-44.
16. Kalbus E. Reinstorf F. and Schirmer M. 2006. Measuring methods for groundwater surface water interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 10(6): 873-87.
17. Liu Y. and Sheng Z. 2011. Trend-outflow method for understanding interactions of surface water with groundwater and atmospheric water for eight reaches of the Upper Rio Grande. *Journal of hydrology*. 409(3): 710-23.
18. Menció A. Galán M. Boix D. and Mas-Pla J. 2014. Analysis of stream-aquifer relationships: A comparison between mass balance and Darcy's law approaches. *Journal of hydrology*. 517: 157-72.
19. Pretty J. Hildrew A. and Trimmer M. 2006. Nutrient dynamics in relation to surface-subsurface hydrological exchange in a groundwater fed chalk stream. *Journal of Hydrology*. 330(1): 84-100.
20. Salemi H. Mamanpoush A. Miranzadeh M. Akbari M. Torabi M. Toomanian N. Murray-Rust H. Droogers P. Sally H. and