تدقیق مولفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی در آبخوان آبرفتی سملقان (استان خراسان شمالی)

عطاءاله جودوی (نویسنده مسئول)[۱]، میثم مجیدی[۲]

[۱] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، خراسان رضوی atajoodavi@kashmar.ac.ir
[۲] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، خراسان رضوی m.majidi@kashmar.ac.ir

چکیده

تغذیه آب‌زیرزمینی از جمله مهمترین پارامترهای بیلان آب‌زیرزمینی می‌باشد، هرچند که تعیین دقیق این پارامتر بسیار دشوار و گاه غیر ممکن می‌نماید. از طرفی کمبود داده کافی و مورد اعتماد و از طرف دیگر وابستگی پارامتر تغذیه به سایر پارامترهای معادله بیلان، نیاز به مدل‌های دقیق‌تر را نمایان‌تر می‌کند. در این پژوهش، محاسبه و برآورد دقیق مولفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی آبخوان سملقان در طی سال‌های آبی ۱۳۸۴-۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۲ مورد نظر بوده است. بدین منظور ابتدا مولفه‌های ورودی و خروجی تأثیرگذار در بیلان آب‌زیرزمینی معین شده و هرکدام با استفاده از اندازه‌گیری میدانی و یا روشهای هیدرولوژیکی محاسبه و تدقیق شده اند. نتایج مطالعات نشان داد که جریان ورودی زیرزمینی و آب برگشتی حاصل از مصارف گوناگون بیشترین نقش را در تغذیه داشته و برداشت از چاه‌ها مهم‌ترین عامل تخلیه کننده آبخوان هستند. همچنین معین گردید که به دلیل غالب بودن پارامترهای تخلیه، کسری مخزنی برابر با ۴۸ میلیون مترمکعب در طی زمان مورد مطالعه بوجود آمده است. روش‌شناسی استفاده شده در این پژوهش باعث تدقیق برآورد مولفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی شده و می‌تواند در دیگر مناطق بکار گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی

بیلان آب-خاک، مدل تورنثویت، تغذیه آب‌زیرزمینی، اندرکنش آب سطحی و آب‌زیرزمینی

۱. مقدمه

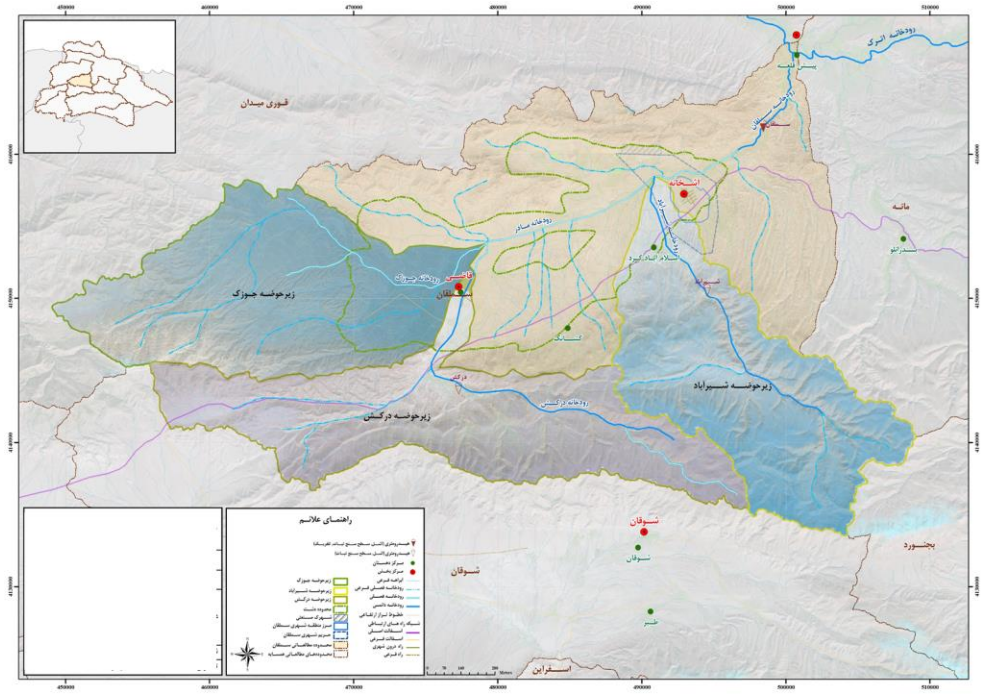
محاسبه تغذیه آب‌زیرزمینی به منظور مدیریت و حفاظت از منابع ارزشمند آب‌زیرزمینی مورد اهمیت است [1] [2] [3]. محاسبه دقیق تغذیه منطقه‌ای آب‌زیرزمینی بسیار دشوار یا حتی غیر ممکن است، علی الخصوص زمانی که اطلاعات کمیاب یا دارای عدم قطعیت بوده و یا مقادیر متعددی برای یک پارامتر مشخص مانند تغذیه از یک آبخوان، بارندگی و نفوذ از بستر یک رود گزارش شده باشد.

به منظور برآورد تغذیه آب‌زیرزمینی، بسته به در دسترس بودن داده‌ها و سطح دقت مورد نیاز، روش‌های مختلفی مانند روش نوسانات سطح آب‌زیرزمینی ، بیلان آب حوضه آبریز و مدل‌های عددی توسعه یافته‌اند [1] [2] [4] [5]. در میان روش‌های مذکور مدل‌های عددی به صورت گسترده برای شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی، برآورد پارامترهای مجهول یا داده‌های با درجه اطمینان پایین مانند تغذیه و پمپاژ به کار رفته است. با این وجود، این مدل‌ها به داده‌های جامع و قابل اعتماد مانند توزیع مکانی و زمانی تغذیه و نیز خصوصیات فیزیکی آبخوان احتیاج دارند. از طرف دیگر، روش‌های بیلان آب، نوسانات سطح آب و در برخی موارد ترکیب این روش‌ها با یک مدل یکپارچه بر روی کل حوضه بدون درنظر گرفتن تغییرات مکانی پارامترهای آب‌زیرزمینی می‌تواند در تخمین تغذیه و پمپاژ مفید باشد [6]. این روش‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری و سادگی‌شان در تحقیقات زیادی به کار برده شده‌اند [2] [4] [7] [8] [9]. برجسته‌ترین محدودیت روش‌های تخمین تغذیه این است که دقت آن‌ها بستگی به دقت داده‌های ورودی آن‌ها دارد. هیلی و کوک (۲۰۰۲) مروری بر کاربرد روش نوسانات سطح ایستابی برای محاسبه تغذیه آب‌زیرزمینی انجام دادند [10]. آن‌ها راه حلی برای تعیین آبدهی ویژه که می‌تواند منشا ایجاد عدم اطمینان در برآورد تغذیه باشد ارائه کردند. مارشال و همکاران (۲۰۰۶) از ترکیب دو روش بیلان آب و نوسانات سطح آب برای تخمین آبدهی ویژه و تغذیه به ترتیب در آبخوانی با سطح ایستابی افتان(خشکسالی) و خیزان(ترسالی) استفاده کردند. در این تحقیق چنین فرض شد که سایر پارامترها به صورت صریح موجود هستند. سو و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر پمپاژ جهت آبیاری، تغذیه حاصل از آبیاری و جریان ورودی به آبخوان از طریق مرزهای آبخوان را در نظر گرفتند. آنها همچنین نرخ پمپاژ از آبخوان را به منظور تخمین میزان تخلیه غیرقانونی از چاه‌ها محاسبه نمودند [11]. در این پژوهش تلاش شده است مولفه‌های بیلان آبخوان سملقان واقع در استان خراسان شمالی تدقیق شود.

۲- مواد و روش‌ها

۱،۲. مشخصات منطقه مورد مطالعه

مساحت محدوده بیلان برای آبخوان سملقان ۱۵۸ کیلومتر مربع در نظر گرفته شده و بیلان برای سال‌های آبی ۸۴ـ۱۳۸۳ تا ۹۳ـ۱۳۹۲ محاسبه شده است. بر پایه مطالعات هیدرولوژی، رودخانه سملقان، زهکش اصلی محدوده مطالعاتی است و رودخانه‌های جوزک، شیرآباد و درکش از سرشاخه‌های آن می‌باشند. رودخانه سملقان از غرب دشت سملقان به سمت شرق این دشت جریان دارد. برخلاف جوزک که یک آبراهه فصلی می‌باشد، رودخانه‌های درکش و شیرآباد رودخانه‌های دائمی هستند و از ارتفاعات جنوب دشت سملقان منشاء گرفته و بعد از پیوستن به رودخانه سملقان از شمال‌شرق دشت خارج و به رودخانه اترک می‌ریزند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت آبراهه‌ها در محدوده مطالعاتی سملقان

۲،۲. معادله ریاضی بیلان آب‌زیرزمینی

بیلان آب‌زیرزمینی را می‌توان به‌صورت معادله زیر نوشت:

$$\Delta S = R + Q_{in} - Q_{bf} - Q_{out} - W \quad (۱)$$

که در این معادله R حجم کل نفوذ از نزولات جوی، جریان‌های سطحی و جریان‌های برگشتی به آبخوان، Q_{in} حجم ورودی زیرزمینی به آبخوان، Q_{out} حجم خروجی زیرزمینی از آبخوان، Q_{bf} تخلیه آب‌زیرزمینی به رودخانه (جریان پایه)، W حجم بهره‌برداری از آبخوان و ΔS تغییرات حجم سفره آب‌زیرزمینی می‌باشد.

۳،۲. روش برآورد مولفه‌های بیلان آب‌زیرزمینی

سفره آب‌زیرزمینی مانند منبعی بوده که به طرق مختلف و از منابع گوناگون آب به آن وارد و خارج شده که آب‌های ورودی را تغذیه و آب‌های خروجی را تخلیه آب‌زیرزمینی می‌نامند. بر پایه مطالعات انجام گرفته در تهیه مدل مفهومی آبخوان سملقان، منابع اصلی تغذیه و تخلیه کننده آبخوان سملقان عبارت از نفوذ به سفره آب‌زیرزمینی حاصل از بارش، جریان ورودی زیرزمینی، نفوذ به سفره آب‌زیرزمینی از طریق جریانات سطحی، نفوذ به سفره آب‌زیرزمینی از طریق آب برگشتی مصارف گوناگون، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر و تعرق از سطح ایستابی و زهکشی آبخوان توسط رودخانه، چشمه و قنات می‌باشد.

۱ .۳،۲ نفوذ سطحی حاصل از بارش

در این مطالعه، اجزای مختلف بیلان آب ـ خاک به‌صورت روزانه توسط روش تورنث‌ویت ـ متر اصلاح شده[۱] محاسبه شده است. در این مدل، سطح آبخوان را می‌توان به چند زیرحوضه (سلول) تقسیم کرد و تغذیه را به صورت جداگانه برای هر سلول در مدل برآورد کرد.

---

[۱] Thornthwaite-Mather

داده‌های مورد نیاز این روش شامل بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، کلاس‌بندی کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیکی خاک و ظرفیت آب خاک می‌باشد.

معادله تغییرات رطوبت خاک در زمان به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$S^t = S^{t-1} + P^t - ET_P^t - RO^t - PE^t \quad (۲)$$

در این معادله، PE^t تغذیه آب‌زیرزمینی از بارش، P^t مقدار بارش، ETp^t تبخیر ـ تعرق پتانسیل، RO^t رواناب، s^t رطوبت خاک در زمان t و s^{t-1} رطوبت خاک در زمان t-1 است.

اولین گام در برآورد مقدار جدید رطوبت خاک از تفاضل تبخیر ـ تعرق پتانسیل از بارش روزانه که مقدار رواناب از آن کم شده است حاصل می‌شود. مقدار منفی این پارامتر، نشان‌دهنده کمبود پتانسیل آب و مقدار مثبت آن بیانگر آب مازاد می‌باشد. اگر آب مازاد وجود داشته باشد، مقدار جدید رطوبت خاک، با اضافه کردن این مقدار به مقدار قبلی رطوبت خاک، به‌دست می‌آید. اگر مقدار جدید رطوبت خاک همچنان پایین‌تر از حداکثر ظرفیت نگهداشت آب در خاک باشد، مقدار تغذیه صفر خواهد بود. معادلات ۳ حالت‌هایی را نشان می‌دهند که تغذیه‌ای وجود نخواهد داشت.

$$\begin{cases} PE = 0 & if \quad P - RO \le ET_P \\ PE = 0 & if \quad P - RO > ET_P \ \text{و} \ S^{t-1} + P - ET_P - RO \le S_{max} \end{cases} \quad (۳)$$

در این معادله‌ها، S_{max} حداکثر ظرفیت نگهداشت آب در خاک است که قابل استفاده برای گیاه باشد. مقادیر ظرفیت نگهداشت آب در خاک برای خاک‌های مختلف در منابع علمی موجود است. لازم به ذکر است که تمامی این ظرفیت برای گیاهان قابل استفاده نیست، لذا از ضرایبی برای اصلاح این ظرفیت استفاده می‌شود. در هر گام زمانی، S_{max} از حاصل‌ضرب عمق توسعه ریشه گیاه در ظرفیت نگهداشت آب در خاک و ضریب اصلاحی به‌دست می‌آید.

در این مطالعه، برای تعیین عمق توسعه ریشه در زمان t از معادله شماره (۴) که توسط بورگ و گریمز (۱۹۸۶) ارائه شده است:

$$D_c^t = D_c^{max}\left(0.5 + 0.5\,sin\left[3.03\left(\frac{(t - T_{0_C}) + 1}{NTP_C - T_{0_C} + 1}\right) - 1.47\right]\right) \forall c, t \quad (۴)$$

که در آن D_c^{max} حداکثر عمق ریشه گیاه بر حسب سانتی‌متر و T_{0_C} و NTP_C زمان شروع و پایان دوره رشد می‌باشد. در مدل تورنث‌ویت ـ متر اصلاح شده، برای تفکیک بارش از رواناب از روش شماره منحنی بهره گرفته می‌شود که توسط اداره حفاظت خاک آمریکا (SCS) ارائه شده است. معادله ۵ برای محاسبه حجم رواناب در روش مذکور استفاده می‌شود:

$$RO = \frac{(P - I_a)^2}{(P + [s_{max} - I_a])} \quad if \quad P > I_a \quad (۵)$$

که در این رابطه RO رواناب، P بارش روزانه، S_{max} حداکثر ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، I_a ترم جذب اولیه[۲]، مقداری از بارش که قبل از هرگونه نفوذ یا جاری شدن جذب می‌شود. در واقع ترم جذب اولیه نمایانگر مجموع فرایندهایی است که باعث کاهش رواناب می‌شوند، که شامل برگاب، گودال‌ها و نفوذ هستند. جذب اولیه (I_a) و حداکثر ذخیره رطوبت (S_{max}) دارد:

$$I_a = 0.2 S_{max} \quad (۶)$$

$$s_{max} = \left(\frac{1000}{CN}\right) - 10 \qquad 0 \le CN \le 100 \quad (۷)$$

مقادیر شماره منحنی‌ها بسته به مقدار بارش که در دوره ۵ روزه گذشته رخ داده قابل تغییر هستند. مقدار بارندگی در ۵ روز گذشته برای شرح شرایط رطوبت خاک استفاده می‌شود. در این روش سه حالت رطوبتی تعریف شده که به صورت شرایط رواناب پیشین I، II و III نام گذاری شده است. زمانی که رطوبت اولیه خاک نزدیک به اشباع باشد، حالت سوم رواناب اتفاق افتاده است. در این حالت شماره منحنی

---

[۲] Initial abstractoin

برای سلول شبکه به طرف بالای حالت دوم رواناب تنظیم شده است. معادله ۸ برای برآورد مقادیر بالای رواناب زمانی که بارندگی روی خاک اشباع باشد به‌کار می‌رود.

$$CN_{ARC(III)} = \frac{CN_{ARC(II)}}{(0.427 + 0.00573 * CN_{ARC(II)})} \quad (۸)$$

برعکس، زمانی که خاک خشک است مانند حالت اول رواناب، شماره منحنی به طرف پایین و حالت دوم رواناب تنظیم شده است. معادله ۹ سعی در افزایش نرخ نفوذ در خاک خشک دارد.

$$CN_{ARC(I)} = \frac{CN_{ARC(II)}}{(2.281 + 0.01281 * CN_{ARC(II)})} \quad (۹)$$

از مولفه‌های دیگر مورد نیاز برای مدل بیلان آب- خاک، مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل است که در این تحقیق با استفاده از روش تجربی منحنی وایت محاسبه شده است.

۲.۳.۲ جریان ورودی و خروجی زیرزمینی

جریان ورودی آب‌های زیرزمینی برای نواحی مورد نظر را می‌توان با به‌کار بردن ترکیبی از معادله پیوستگی با قانون دارسی برای جریان آب از یک محیط متخلخل به شرح زیر ارزیابی نمود.

$$Q = K.I.A = T.W.I \quad (۱۰)$$

که در آن I: گرادیان هیدرولیکی، K: هدایت هیدرولیکی، A: سطح مقطع جریان، T: قابلیت انتقال و W: عرض مقطع جریان (عمود بر جهت جریان) می‌باشد. برای مناطق مورد مطالعه گرادیان هیدرولیکی برای دوره کم آبی و پرآبی بطور جداگانه محاسبه و بایستی یک مقدار متوسط برای جریان ورودی سالیانه به‌دست آید.

۳.۳.۲ اندازه گیری نفوذ از رودخانه

در ناحیه ورود رودخانه درکش و شیرآباد به دشت، به علت پایین بودن سطح آب‌زیرزمینی و درشت بودن آبرفت رودخانه‌ای، مقداری از آب رودخانه به آبخوان نفوذ می‌کند و آبخوان را تغذیه می‌کند. برای محاسبه میزان نفوذ توسط رودخانه‌ها بایستی دبی رودخانه‌ها را در دو نقطه (معمولاً در ابتدای رودخانه‌ها و در انتهای خروجی) اندازه‌گیری نمود. تفاضل دبی رودخانه در دو نقطه به‌طور متوسط معادل میزان نفوذ به سفره آب‌زیرزمینی خواهد بود. در طی مطالعات میدانی، اندازه‌گیری دبی رودخانه درکش در دو مقطع به فاصله تقریبی ۳۰۰ متری در بالاترین نقطه‌ای که رودخانه درکش وارد دشت می‌شود انجام گرفت (شکل ۲). با توجه به اینکه کشاورزان از آب رودخانه در مسیر آن برداشت می‌کنند، امکان اندازه‌گیری در مقاطع طولانی‌تر و برآورد دقیق‌تر نفوذ از بستر رودخانه وجود نداشت.

شکل ۲. اندازه‌گیری دبی رودخانه درکش در محل ورود رودخانه به دشت

۴.۳.۲ برآورد تخلیه آب‌زیرزمینی از طریق تبخیر- تعرق

هرگاه سطح آب‌زیرزمینی به نزدیک سطح زمین برسد، مقداری آب توسط نیروی کشش موئینه خاک به سطح زمین آمده و تبخیر می‌گردد و همچنین مقداری دیگر از آن توسط ریشه گیاهان منطقه جذب و در برگ‌های آنها در اثر عمل تعریق به فضا منتقل می‌گردد. برای برآورد تبخیر و تعرق از آب‌زیرزمینی می‌توان از روش تجربی منحنی وایت استفاده کرد که در دستورالعمل تهیه بیلان آب (کد ۴۳۰ـ۱۶۶ـ۴۷۴) آورده شده است.

۳،۲. ۵ بهینه‌سازی پارامترهای بیلان آب‌زیرزمینی

با انجام محاسبات در مدل بیلان آب ـ خاک با گام زمانی روزانه، مقدار تغذیه آبخوان و تبخیر ـ تعرق واقعی به‌دست می‌آید. گام بعدی بهینه‌سازی پارامترهای موجود در معادله بیلان آب‌زیرزمینی، با توجه به عدم قطعیت هرکدام می‌باشد. مقادیر بهینه با استفاده از حداقل نمودن اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر سطح ایستابی آبخوان فیروز آباد برآورد گردید. رابطه زیر جهت کمینه نمودن مسائل مقید ایجاد شده است.

$$Minimize\ f = \sum_{t=1}^{16} (h^t_{observed} - h^t)^2 \quad (۱۱)$$

که در این رابطه h^t به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$h^t = h^{t-1} + \frac{(PE^t + I^t_{karst} + IRF^t_{GW} + IRF^t_{SW} + D^t + R^t_{in} - R^t_{out} - W^t)}{A.S_y} \quad (۱۲)$$

$$W^t_{lb} \le W^t \le W'_{ub} \quad (۱۳)$$

$$(S_y)_{lb} \le S_y \le (S_y)_{ub} \quad (۱۴)$$

$$I^t_{karst} = \frac{[A_{SO}.k.P]_{SO}}{[A_S.k.P]_{Atashkade}}.D^t \quad (۱۵)$$

در روابط ۱۵-۱۲، $h^t_{observed}$ میانگین سطح آب در زمان t، h^t سطح آب محاسبه شده در زمان t، lb و ub کران‌های پایین و بالای هر پارامتر بوده که به عنوان سطح اطمینان هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق نتایج بهینه‌سازی و دقت بیلان با استفاده از تفاضل بین داده‌های مشاهداتی و میانگین سطح ایستابی محاسبه شده ارزیابی شد. بدین منظور، ضریب همبستگی (R^2) و ضریب کارایی نش و ساتکلیف ۱۹۷۰ (CE) استفاده شد.

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(h^t_{observed} - h^t)^2}{\sum_{i=1}^{n}(h^t_{observed} - \bar{h}_{observed})^2} \quad (۱۶)$$

که در این رابطه n تعداد کل مشاهدات (۱۶ سال در این پژوهش) و $\bar{h}_{observed}$ میانگین سطح آب مشاهده شده است. CE نشان‌دهنده خطای نسبی نسبت به تغییرات مقادیر مشاهداتی بوده و مقدار آن از $-\infty$ (شبیه‌سازی ضعیف) تا ۱ (شبیه‌سازی عالی) تغییر می‌نماید.

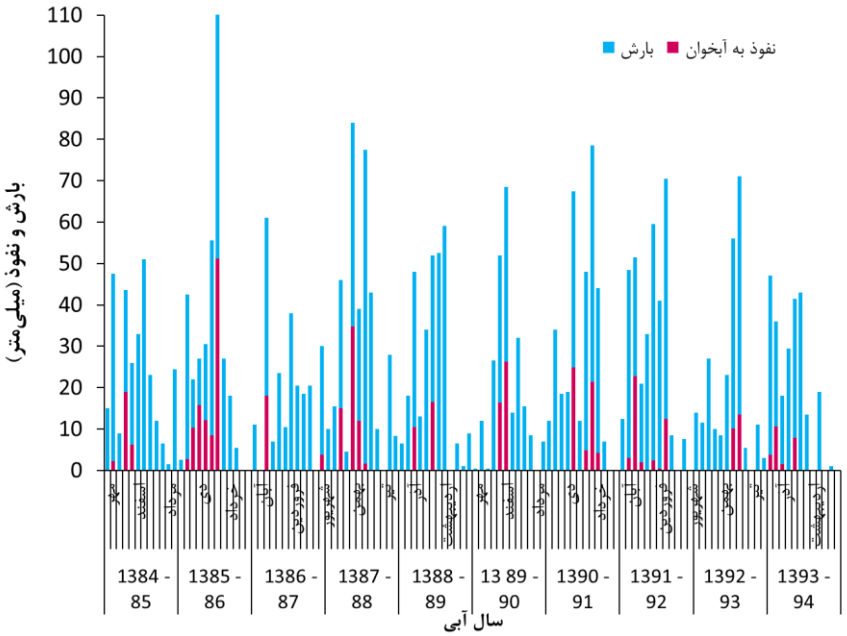
۳. نتایج و بحث

۳. ۱. محاسبه جریان ورودی و خروجی سطحی

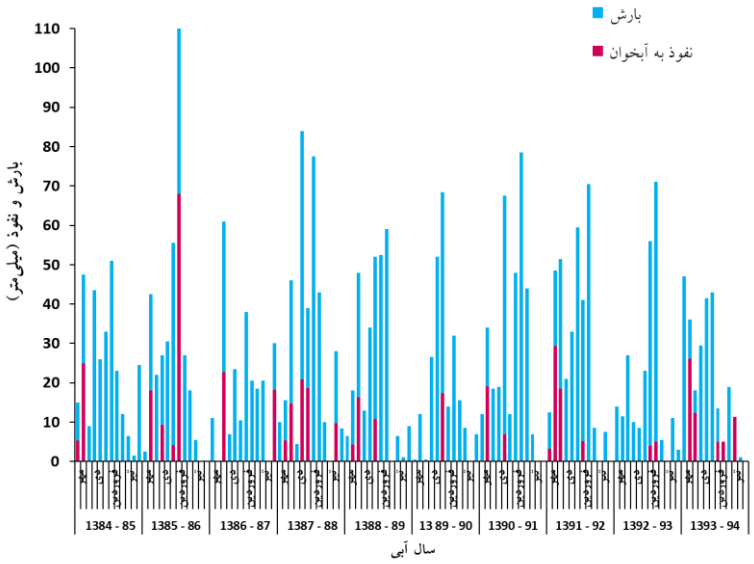
در مطالعه حاضر، مقدار تغذیه آبخوان از بارش برای زمین‌های کشاورزی و غیرکشاورزی توسط مدل بیلان آب ـ خاک محاسبه گردیده و نتایج آن در شکل و شکل و

جدول ۱. مقادیر نفوذ از بارش برای زمین‌های غیرکشاورزی و کشاورزی

ارائه شده است. بر پایه این روش، میانگین ۱۰ ساله تغذیه آبخوان توسط بارش، ۷/۶ میلیون‌مترمکعب در سال برآورد گردید.



شکل ۳. مقادیر ماهانه نفوذ از بارش برای زمین‌های غیرکشاورزی



شکل ۴. مقادیر ماهانه نفوذ از بارش برای زمین‌های کشاورزی

جدول ۱. مقادیر نفوذ از بارش برای زمین‌های غیرکشاورزی و کشاورزی

سال آبی	بارش (میلی‌متر)	تغذیه آبخوان (میلی‌متر)	
		زمین غیرکشاورزی	زمین کشاورزی
۸۴ - ۱۳۸۳	۳۶۵	۷۵,۴	۹۶,۳
۸۵- ۱۳۸۴	۲۹۲,۵	۲۷,۵	۳۰,۲
۸۶ - ۱۳۸۵	۳۴۲,۰	۱۰۰,۶	۹۹,۴
۸۷ - ۱۳۸۶	۲۴۰,۵	۲۱,۹	۴۰,۹
۸۸ - ۱۳۸۷	۳۶۵,۹	۶۳,۵	۶۹,۱
۸۹ - ۱۳۸۸	۲۹۹,۵	۲۷,۰	۳۱,۴
۹۰ - ۱۳۸۹	۲۳۷	۴۲,۶	۱۷,۳
۹۱ - ۱۳۹۰	۳۴۰,۵	۵۵,۲	۲۶,۰
۹۲ - ۱۳۹۱	۳۵۳,۵	۴۳,۱	۵۶,۴
۹۳ -۱۳۹۲	۲۴۰,۵	۲۳,۶	۹,۰

بازدیدهای میدانی نشان داد که در مواقع غیرسیلابی، تمامی دبی پایه رودخانه‌های شیرآباد و درکش قبل از رسیدن به رودخانه اصلی سملقان توسط کشاورزان مصرف شده و یا از بستر آبراهه نفوذ می‌کند. شکل - الف نشان می‌دهد که در محل شمال شهر آشخانه (فاصله حدود ۷ کیلومتری از ایستگاه دربند) در رودخانه سملقان آبی جریان ندارد. اما در محل ایستگاه دربند (خروجی دشت)، جریانی در حدود ۱۵۰ لیتر بر ثانیه مشاهده می‌شود (شکل - ب). لذا دبی پایه رودخانه سملقان در خروجی دشت (ایستگاه دربند) از زهکشی آبخوان و زمین‌های کشاورزی تأمین می‌شود. عمق کم سطح ایستابی در این نواحی تایید کننده این موضوع می‌باشد. در نتیجه برای تخمین مقدار آب زهکش شده از آبخوان، دبی پایه رودخانه سملقان از دبی سیلابی جدا شده و به عنوان حجم آب زهکش شده در بیلان در نظر گرفته شده است. بر پایه این روش، میانگین ۱۰ ساله حجم آب تخلیه شده از آبخوان، ۷/۷ میلیون‌مترمکعب در سال برآورد گردید.

(ب) (الف)

شکل ۵. (الف) بستر رودخانه سملقان در محل شمال شهر آشخانه (ب) رودخانه سملقان در نقطه خروجی دشت (ایستگاه دربند)

همچنین مشاهدات میدانی نشان داد که در شرایط غیرسیلابی، اکثر دبی پایه رودخانه شیرآباد قبل از رسیدن آبخوان سملقان توسط یک بند بزرگ در نزدیکی روستای شیرآباد مهار شده و به مصرف کشاورزی می‌رسد و عملاً آبی در این رودخانه جریان ندارد. فقط در شرایط وقوع بارندگی شدید، سیلاب در رودخانه جریان می‌یابد. علاوه بر این، اندازه‌گیری دبی رودخانه در دو مقطع نشان داد که در مقطع اول و دوم جریانی برابر با ۲۴۰ و ۲۳۰ لیتر بر ثانیه وجود دارد.

با توجه به بررسی‌های میدانی و مشاهده نوع رسوبات و عرض مسیل‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده، تخمین زده می‌شود که حدود ۳۰ درصد از رواناب جاری شده در بستر رودخانه‌ها توسط نفوذ عمقی به آب‌زیرزمینی بپیوندد. به این منظور پس از جداسازی رواناب سیلابی از دبی پایه، ۳۰ درصد آن به عنوان نفوذ درنظر گرفته شد. با استفاده از این روش، میانگین ۱۰ ساله تغذیه آبخوان توسط نفوذ از بستر رودخانه‌ها، ۸/۳ میلیون‌مترمکعب در سال برآورد گردید.

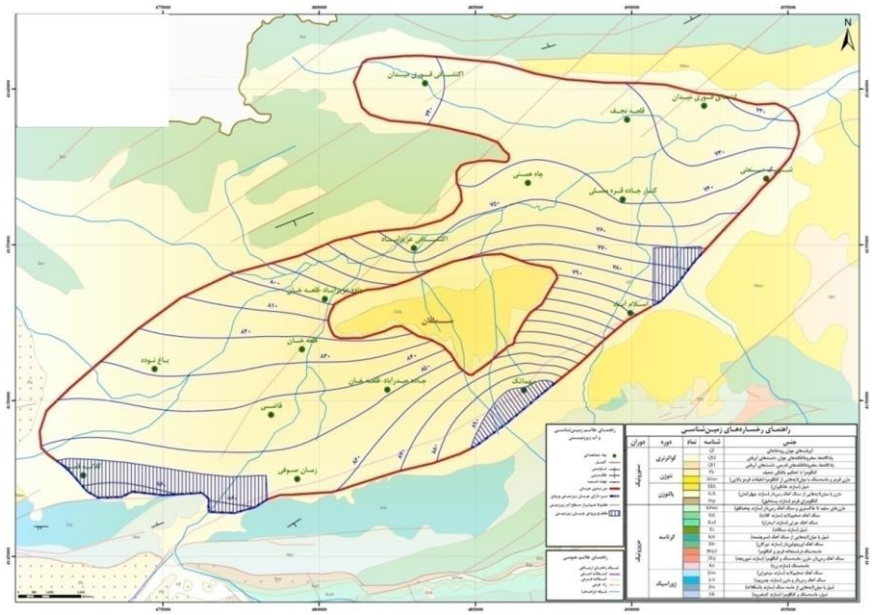
۳. ۲. محاسبه جریان ورودی و خروجی زیرزمینی

همان‌طور که قبلاً مطرح گردید، مطالعه هیدروژئولوژی منطقه نشان می‌دهد که تنها مناطقی که احتمال تغذیه آبرفت توسط جریان‌های زیرسطحی حاصل از نفوذ آب سطحی و (یا) آب کارستی وجود دارد، محل ورود رودخانه‌های شیرآباد و درکش به دشت می‌باشد. در این نواحی جریان‌های سطحی باعث فرسایش آبرفت ریزدانه و رسوب‌گذاری مجدد رسوبات درشت‌دانه رودخانه‌ای روی آهک شده‌اند. ضمناً از محاسبه مقدار جریان خروجی زیرزمینی از آبخوان به‌دلیل ناچیز بودن صرف نظر گردیده است.

میزان آب‌زیرزمینی که جبهه‌های ورودی دشت را تغذیه می‌نمایند، با توجه به طول هر کدام از جبهه‌های ورودی، ضریب قابلیت انتقال و شیب هیدرولیکی در هر یک از این مقاطع، براساس قانون دارسی محاسبه و در جدول ارائه شده است. همچنین جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان سملقان در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به محاسبات جدول زیر میانگین جریان ورودی به آبخوان دشت، ۱۰/۷ میلیون‌مترمکعب در سال می‌باشد.

جدول ۲. محاسبه میانگین جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان آبرفتی سملقان

ورودی/ خروجی	طول مقطع (متر)	متوسط شیب هیدرولیکی	متوسط قابلیت انتقال ($m^2 \cdot day^{-1}$)	زمان (روز)	حجم آب‌زیرزمینی ورودی (میلیون‌متر مکعب)
۱	۷۰۰۰	۰,۰۰۶۹	۴۰۰	۳۶۵	۷
۲	۳۵۰۰	۰,۰۱۹	۶۰	۳۶۵	۱,۴
۳	۱۵۰۰	۰,۰۱۷	۳۵۰	۳۶۵	۳,۲
		حجم کل جریان ورودی			**۱۱,۷**



شکل ۶. منحنی تراز میانگین ۱۰ ساله و جبهه‌های ورودی آبخوان سملقان

۳. ۳. نفوذ به سفره آبخوان از طریق آب برگشتی حاصل از مصارف گوناگون

قسمتی از آب مصارف کشاورزی، شهری و صنعتی به طرق مختلف به داخل زمین نفوذ کرده و وارد سفره زیرزمینی می‌شود. مقداری از آبی که برای آبیاری مصرف می‌شود، در طول مسیر و در محل آبیاری و در اثر نیروی ثقل به داخل زمین نفوذ کرده و از منطقه ریشه گیاهان می‌گذرد و به سفره آب‌زیرزمینی می‌پیوندد که آن را آب برگشتی به آبخوان می‌نامند. در دشت سملقان با توجه به روش آبیاری سنتی و نوع کشت، ۲۵ درصد آب مصرفی در بخش کشاورزی به‌صورت نفوذ در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه علاوه بر آب چاه‌ها، از آب چشمه‌ها و رودخانه‌ها نیز برای آبیاری استفاده می‌گردد، به‌طور میانگین ۱۰ میلیون‌مترمکعب در سال توسط فعالیت‌های کشاورزی به آبخوان آب وارد می‌شود.

آب مصارف شهری به روش‌های زیر به داخل زمین نفوذ می‌نماید. در شبکه‌های آب شهری مقداری آب در اتصال‌ها، شیرها و غیره به خارج نشت کرده که تمام آن وارد سفره آب‌زیرزمینی می‌گردد. در شهرهایی که شبکه جمع‌آوری فاضلاب وجود ندارد، فاضلاب‌ها به‌وسیله چاهک‌هایی مستقیماً به داخل سفره آب‌زیرزمینی تزریق می‌گردد. مقداری از آب توزیع شده در شهرها ممکن است به مصرف آبیاری فضای سبز برسد که با توجه به شرایط مختلف مقداری از این آب نیز به داخل زمین نفوذ می‌کند.

در محاسبه بیلان آب در دشت سملقان ۷۵٪ آب مصرفی در بخش شرب و صنعت به‌عنوان نفوذ در نظر گرفته شد که بر پایه این روش، میانگین ۱۰ ساله تغذیه آبخوان، ۳/۵ میلیون‌مترمکعب در سال برآورد گردید.

۳. ۴. حجم بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی از طریق چاه

برداشت از آب‌زیرزمینی توسط چاه و قنات برای مصارف مختلف (شرب،صنعت، کشاورزی و غیره) صورت می‌گیرد. همچنین ممکن است تخلیه آب‌زیرزمینی به‌طور طبیعی توسط چشمه‌ها صورت پذیرد. معمولاً مقدار آبدهی و تعداد ساعت‌های کارکرد هر چاه نیز با توجه به نوع مصرف آن مشخص است و به کمک این اطلاعات می‌توان مقدار برداشت هر چاه در هر دوره زمانی را محاسبه نمود. به عبارت دیگر برای یک دوره بیلان آبی بایستی کلیه آمار چاه‌های موجود در منطقه و مدت کارکرد آنها را محاسبه نمائیم که با جمع دبی کلیه چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در دوره مورد مطالعه میزان پمپاژ توسط چاه‌ها محاسبه خواهد شد.

بررسی نتایج آماربرداری سال ۱۳۸۳ انجام شده در محدوده مطالعاتی سملقان نشان می‌دهد که در آن سال در محدوده آبخوان حدود ۳۴/۵ میلیون مترمکعب در سال توسط ۱۲۰ حلقه چاه و ۱۶ دهنه چشمه برداشت می‌شود. همچنین آمار برداری سال ۱۳۸۹ بیانگر برداشت حدود ۳۸ میلیون مترمکعب در سال از آبخوان سملقان توسط ۲۱۸ حلقه چاه و ۲۳ دهنه چشمه می‌باشد. ضمن اینکه تخلیه قنوات در این سال، کمتر از ۰/۴ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است.

به منظور برآورد مقدار برداشت از آبخوان در سال‌های بین ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳، پرونده چاه‌ها و آمار گشت و بازرسی موجود در دفتر حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی مورد بررسی قرار گرفت و با تلفیق این داده‌ها و نتایج آماربرداری‌های سراسری سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۹، مقدار تخلیه سالانه هر چاه برای یک دوره ۱۰ ساله برآورد گردید و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

۳. ۵. تخلیه آبخوان توسط تبخیر و تعرق از آب‌زیرزمینی

بر اساس محاسبات انجام شده با استفاده از روش منحنی وایت، میانگین ۱۰ ساله تخلیه آبخوان توسط تبخیر و تعرق مستقیم، ۰/۳۲ میلیون‌مترمکعب در سال برآورد گردید.

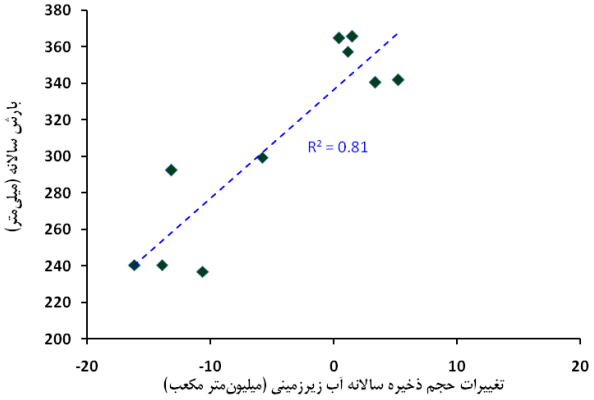
۳. ۶. تغییرات حجم مخزن آبخوان آبرفتی سملقان در دوره بیلان

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای ارزیابی بیلان آب‌زیرزمینی لازم است تا هر گونه تغذیه سطحی و زیرزمینی از هر منشأ و مبدأ و هر نوع تخلیه از نظر بهره‌برداری از چاه‌ها، تخلیه طبیعی توسط چشمه‌ها در ناحیه بیلان، زهکش و تبخیر از سفره آب و بالاخره تغییرات حجم سفره آب‌زیرزمینی در زمان مشخص و محدوده معینی که سطح بیلان نامیده می‌شود مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. تمامی مولفه‌های فوق با استفاده از روش‌های بیان شده در قسمت‌های قبلی، برآورد شده و بیلان برای سال‌های آبی ۸۴ ـ ۱۳۸۳ تا ۹۳ ـ ۱۳۹۲ محاسبه شده است و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. اجزاء بیلان آبخوان سملقان (ارقام به میلیون مترمکعب در سال)

	سال آبی	۸۴-۸۳	۸۵-۸۴	۸۶-۸۵	۸۷-۸۶	۸۸-۸۷	۸۹-۸۸	۹۰-۸۹	۹۱-۹۰	۹۲-۹۱	۹۳-۹۲
ورودی	نفوذ از بارش	۱۴,۱۵	۴,۶۷	۱۵,۹۷	۵,۴۰	۱۰,۷۲	۴,۷۶	۴,۲۹	۵,۹۱	۸,۲۲	۱,۴۲
	برگشت کشاورزی (آب سطحی و زیرزمینی)	۱۰,۹۵	۹,۸۱	۱۰,۵۱	۹,۰۹	۱۰,۸۷	۹,۳۶	۹,۶۳	۱۰,۳۷	۹,۷۸	۱۰,۰۵
	برگشت شرب و صنعت	۱,۵۸	۱,۸۸	۳	۳,۷۵	۴,۱۳	۴,۱۳	۴,۱۳	۴,۱۳	۴,۱۳	۴,۱۳
	نفوذ از بستر رودخانه ها	۹,۱۲	۸,۵۸	۸,۹۹	۵,۱۱	۱۰,۲۲	۸,۱۶	۶,۱۳	۱۱,۹۴	۹,۰۱	۵,۸۵
	جریان زیرزمینی	۱۷,۶۷	۱۰,۳۴	۱۵,۱۸	۷,۱۹	۱۲,۳۷	۱۰,۵۲	۸,۳۰	۱۵,۹۷	۱۲,۲۸	۷,۰۶
	مجموع تغذیه	۵۳,۷۱	۳۵,۲۶	۵۳,۶۵	۳۰,۵۵	۴۸,۳۱	۳۶,۹۳	۳۲,۴۸	۴۸,۳۰	۴۳,۴۲	۲۸,۵۰
خروجی	چاه، چشمه و قنات	۳۸,۹۱	۳۶,۳۷	۳۷,۷۱	۳۴,۱۹	۴۰,۳۸	۳۴,۷۵	۳۶,۲۲	۳۷,۶۶	۳۶,۰۱	۳۷,۹۱
	تبخیر از سطح ایستابی	۰,۴	۰,۳۹	۰,۳۷	۰,۳۵	۰,۳۳	۰,۳۱	۰,۲۹	۰,۲۷	۰,۲۵	۰,۲۳
	زهکشی به رودخانه	۱۴,۰۰	۱۰,۶۰	۹,۵۱	۸,۷۵	۵,۱۶	۶,۶۱	۵,۴۷	۶,۲۲	۵,۰۶	۵,۳۴
	مجموع تخلیه	۵۳,۳	۴۷,۴	۴۷,۶	۴۳,۳	۴۵,۹	۴۱,۷	۴۲,۰	۴۴,۱	۴۱,۳	۴۳,۵
	تغییرات ذخیره آبخوان	۰,۴۰	-۱۲,۱۰	۶,۰۶	-۱۲,۷۳	۲,۴۵	-۴,۷۴	-۹,۵۰	۴,۱۶	۲,۱۱	-۱۴,۹۸

از نکات قابل توجه دیگر وابستگی زیاد تغییرات حجم ذخیره آبخوان به بارش‌های جوی می‌باشد (شکل). به‌طوری‌که در سال‌هایی که بارش بیشتر از میانگین (۳۱۲ میلی‌متر در سال) بوده است، شاهد افزایش حجم ذخیره آبخوان بوده‌ایم. در نتیجه منابع آب این محدوده مطالعاتی نسبت به خشکسالی و تغییرات اقلیمی، حساسیت زیادی دارند و آسیب‌پذیر می‌باشند.



شکل ۷. رابطه تغییرات حجم ذخیره آب‌زیرزمینی و بارش سالانه

بررسی اجزای بیلان نمایان می‌سازد که عوامل متعددی در تغذیه آبخوان سملقان نقش دارند. جریان ورودی زیرزمینی و آب برگشتی حاصل از مصارف گوناگون آب بیشترین نقش را در تغذیه آبخوان ایفا می‌کنند. در حالی‌که برداشت از چاه‌ها مهم‌ترین عامل تخلیه کننده آبخوان است و به‌دلیل بیشتر بودن برداشت از تغذیه در درازمدت، کسری مخزن به اندازه ۴۸ میلیون مترمکعب در طی ۱۰ سال (بطور میانگین ۴/۸ میلیون مترمکعب در هر سال) مشاهده می‌گردد.

منابع

[1] Sanford W (2002) Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeol J 10:110–120
[2] Scanlon BR, Healy RW, Cook PG (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol J 10:18–39
[3] Manghi F, Mortazavi B, Crother C, Hamdi MR (2009) Estimating regional groundwater recharge using a hydrological budget method. Water Resour Manag 23:2475–2489
[4] Tilahun K, Merkel BJ (2009) Estimation of groundwater recharge using a GIS-based distributed water balance model in Dire Dawa, Ethiopia, Hydrogeol J 17:1443-1457
[5] Jie Z, Heyden J, Bendel D, Barthel R (2011) Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. Hydrogeol J 19:1487-1502
[6] Bear J (1979) Hydraulics of Groundwater. McGrawHill Inc, New York
[7] Maréchal JC, Dewandel B, Ahmed S, Galeazzi L, Galeazzi FK (2006) Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. J Hydrol 329: 281– 293
[8] Singh A (2012) Development and Application of a Watertable Model for the Assessment of Waterlogging in Irrigated Semi-arid Regions. Water Resour Manage 26:4435-4448
[9] Joodavi A, Zare M, Raeisi E, Ahmadi MB (2015) A Multi-Compartment Hydrologic Model to Estimate Groundwater Recharge in an Alluvial-Karst System, Arabian Journal of Geosciences.
[10] Healy RW, Cook PG (2002) Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeol J 10:91–109
[11] Hsu KC, Yeh HF, Chen YC, Lee CH, Wang CH, Chiu FS (2012) Basin-scale groundwater response to precipitation variation and anthropogenic pumping in Chih-Ben watershed, Taiwan, Hydrogeol J 20:499-517