

## تغییر ضرایب ذخیره و قابلیت انتقال آبخوان دشت الشتر به علت خشکسالی و افزایش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی

مهدی سلیمانی مطلق<sup>۱</sup>، هدی قاسمیه<sup>۲\*</sup>، علی طالبی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۵/۱۸

### چکیده

خشکسالی و افزایش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی از عوامل کنترل‌کننده خصوصیات آبخوان هستند. نقش این عوامل زمانی مشخص می‌شود که عملکرد آبخوان از لحاظ ضرایب هیدرودینامیکی در دوره‌های مختلف مطالعه شود. از آنجاکه مدیریت تخصیص و بهره‌برداری در بیشتر آبخوان‌ها بر مبنای نتایج آزمایشات پمپاژ در گذشته است، نمی‌توان انتظار مدیریت بهینه را داشت. بدین منظور در این مطالعه، ابتدا وضعیت و وقوع دوره‌های خشکسالی آب زیرزمینی در دشت الشتر با استفاده از شاخص SGI بررسی شد، سپس دو دوره خشکسالی در اواخر دهه ۱۳۷۰ و اواخر دهه ۱۳۸۰ که وضعیت شدید و خیلی شدید داشتند، به عنوان تنش‌های وارده به سیستم آبخوان انتخاب شدند. در این دوره‌ها از نتایج آزمون‌های پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری که تقریباً شرایط چاه‌های کامل را داشتند، برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان استفاده شد. برآورد ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان در چاه‌های بهره‌برداری با استفاده مدل تحلیلی مانچ که خطاهای ناشی از زهکشی لحظه‌ای، عدم تراکم‌پذیری آبخوان آزاد و ذخیره چاه را در نظر می‌گیرد، انجام شد. ضرایب حاصل با نتایج آزمون‌های پمپاژ و مطالعات ژئوالکترونیک (در ابتدای دوره مطالعاتی) مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان در هر دو دوره خشکسالی نسبت به دوره پایه کاهش داشتند. درخصوص قابلیت انتقال آبخوان بیشترین مقدار آن حدود ۱۰۰ تا ۳۲۰ مترمربع در روز در اواخر دهه ۸۰ و در مکان‌های مختلف دشت اتفاق افتاده که نشان‌دهنده کاهش ضخامت بخش اشباع و کاهش نفوذپذیری آبخوان در اثر خشکسالی و افزایش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی است. همچنین در این دوره، بیشترین کاهش مقدار ضریب ذخیره بین ۳ تا ۱۰ درصد نسبت به سال‌های اولیه بوده است. برای هر دو پارامتر مورد بررسی (ضریب ذخیره و قابلیت انتقال)، نتایج مقایسه میانگین با استفاده از آزمون آماری t در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر هر متغیر در دوره‌های تنش نسبت به دوره پایه وجود دارد. به طور کلی با افزایش شدت خشکسالی و برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، بخش‌های مختلف دشت ضرایب هیدرودینامیکی کمتر را در سطوح بیشتری تجربه کرده‌اند.

**کلمات کلیدی:** دوره‌های خشکسالی، شاخص SGI، ضرایب هیدرودینامیک آبخوان، مدل مانچ.

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کاشان

۲. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه کاشان، نویسنده مسئول / Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

۳. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه یزد

## مقدمه

اندازه‌گیری سطح آب در چاه پمپاژ صورت می‌گیرد (غفوری خرائق، ۲۰۱۲). قابل توجه است که از نتایج آزمایش پمپاژ در چاه‌های کشاورزی یا بهره‌برداری که تقریباً دارای شرایط چاه‌های کامل (چاه‌هایی کاملاً نفوذپذیر که عمق آن‌ها تا کف آبخوان بوده و نماینده یک زون هیدروژئولوژیکی هستند) می‌توان برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان استفاده کرد (کرسیک<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷). استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری که زمان آزمایش آن‌ها در تطابق با دوره‌هایی که خشکسالی به وقوع پیوسته، می‌تواند به تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان با شرایط جدید کمک کند. تحلیل نتایج آزمایش پمپاژ با استفاده از مناسب‌ترین مدل تحلیلی متناسب با شرایط آبخوان صورت می‌گیرد.

به‌طور کلی، با شناسایی دوره‌های خشکسالی به‌وقوع پیوسته آب زیرزمینی و اطلاع از وضعیت بهره‌برداری این منابع، شرایط هیدرولیکی آبخوان مطالعه و اثرات آن با استفاده از نتایج پمپاژ مشخص می‌شود. با بررسی نتایج تحقیقات گذشته، اگرچه برخی از پژوهشگران نظیر رادفر و همکاران (۲۰۱۱)، اشرف و احمد (۲۰۱۱) و زنگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه آثار خشکسالی بر روی وضعیت سطح آب زیرزمینی، تغییرات ذخیره و پدیده نشست آبخوان پرداخته‌اند. در خصوص تبعاتی که خشکسالی و بهره‌برداری نامتعارف روی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان می‌گذارد، کمتر بحث شده است. در تحقیق انجام‌شده توسط مختاری و اسپهبد (۲۰۰۹)، با استفاده از تحلیل نتایج آزمایش پمپاژ چاه‌های کشاورزی و برآورد ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، به بررسی نتیجه برداشت غیر اصولی آب و به تبع آن، تغییرات کمی و کیفی پرداخته شده است. همچنین در تحقیق تکایی (۲۰۱۵) در آبخوان شیروان، تغییرات ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در سال ۱۳۸۷ نسبت به سال ۱۳۴۹ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق آن‌ها، مبین این مطلب است که احتمالاً افت زیاد سطح ایستابی و تغییر در خصوصیات آبخوان در اثر کاهش ضخامت اشباع باعث این اختلاف شده است. در این پژوهش، با مرور تحقیقات

افزایش تقاضای آب و وقوع تغییر اقلیم، سال‌های اخیر را با حالات مختلفی از خشکسالی روبه‌رو کرده است. خشکسالی به‌عنوان یک فاجعه زیست‌محیطی به رسمیت شناخته شده و توجه زیست‌شناسان، بوم‌شناسان، هیدرولوژیست‌ها، هواشناسان، زمین‌شناسان و دانشمندان کشاورزی را جلب کرده است (میشرا و سین<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). از طرفی دیگر، محدودیت منابع آب سطحی به‌علت نیمه‌خشک بودن اقلیم ایران باعث شده تا منابع آب زیرزمینی به‌عنوان گزینه‌ای برای تأمین آب مورد توجه قرار گیرد. اما باید توجه داشت که استفاده بی‌رویه و غیراصولی از این منابع، صدمات جبران‌ناپذیری ایجاد خواهد کرد و باعث به خطر افتادن منابع آب زیرزمینی- به‌عنوان یک گزینه مهم و در برخی نواحی تنها گزینه مطرح در تأمین مصارف مختلف- خواهد شد؛ پس ضروری است که مدیریت بهینه بهره‌برداری و حفاظت منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در شرایط خشکسالی به‌عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های منابع آب مورد توجه قرار گیرد (سلیمانی‌مطلق، ۲۰۱۱). این امر نیازمند شناخت شرایط هیدرولیکی آبخوان است (مختاری و اسپهبد، ۲۰۰۹).

تعیین خصوصیات هیدرولیکی آبخوان ازجمله ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره این امکان را فراهم می‌کند که مدیریت تخصیص و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در مواقع خشکسالی منطقی شود. باید توجه داشت که تغییر این خصوصیات در طی دوره‌های بهره‌برداری و خشکسالی به‌علت افت آبخوان در عملکرد منفی لایه آبدار نقش دارد. این موضوع پدیده نشست را به دنبال داشته که باعث بسته شدن منافذ مواد متخلخل، کاهش ضخامت بخش اشباع و کاهش دسترسی به منابع آب خواهد شد (نادریان‌فر و انصاری، ۲۰۱۱؛ رادفر و همکاران، ۲۰۱۳). پمپاژ روشی متداول برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان است که به‌وسیله برداشت آب از یک چاه با یک دبی ثابت یا متغیر و مشاهده تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی در یک یا دو چاه مشاهده‌ای دیگر با یک فاصله مشخص از چاه اصلی یا ثبت

2. Kresic  
3. Zhang

1. Mishra and Singh

انجام شده و درک سیستم آبخوان دشت الشتر، تلاش بر این است که تأثیر دوره‌های خشکسالی و بهره‌برداری نامتعادل بر روی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان مورد ارزیابی قرار گیرد تا در تخصیص منابع آب در مواقع خشکسالی و غیرخشکسالی تفاوت حاصل شود و تا حدودی منطقی گردد.

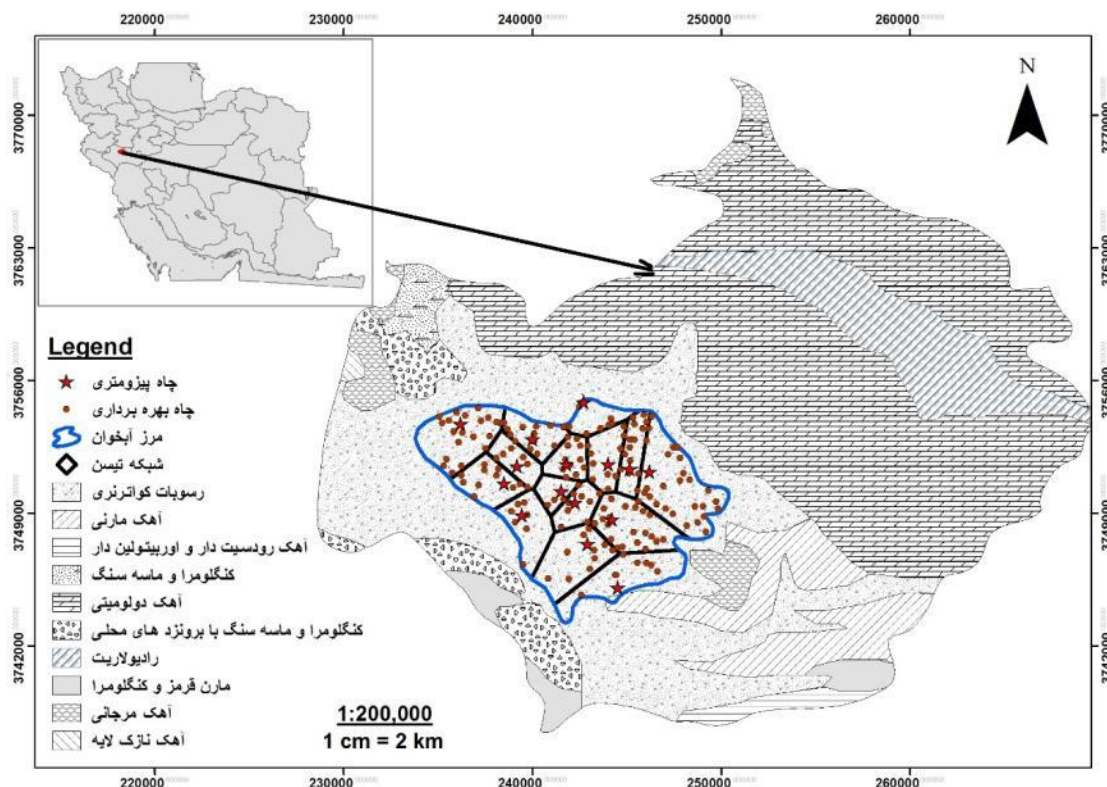
**مواد و روش**

**خصوصیات منطقه**

دشت الشتر در شمال غربی دشت خرم‌آباد و در فاصله حدود ۵۲ کیلومتری از آن قرار دارد. آبخوان این دشت در مختصات جغرافیایی  $33^{\circ} 47' 51''$  تا  $33^{\circ} 57' 6''$  عرض شمالی و  $2^{\circ} 48' 41''$  تا  $48^{\circ} 20' 56''$  طول شرقی واقع شده است. دو رشته کوه مرتفع آهکی، حد شمالی و شمال شرقی دشت را محدود کرده‌اند که با قابلیت نفوذپذیری زیاد جزو منابع تغذیه‌کننده دشت محسوب می‌شوند. در حاشیه جنوب غربی و بخش کوچکی از شمال غرب دشت الشتر، رخنه‌های کنگلومرای بختیاری دیده می‌شود. این طبقات از کنگلومراهای نسبتاً پایدار و ماسه‌سنگ‌های نسبتاً فرسوده تشکیل شده است. این رسوبات در منطقه مورد مطالعه دارای تخلخل مناسبی نبوده و در تغذیه سفره دشت نقش عمده ندارند (ژرفاب پایش ۲۰۰۳). قسمت جنوب شرقی دشت از لحاظ نفوذپذیری به علت وجود مارن در سازندهای آهکی نقشی در فرار آب ندارند. تنها بخشی کوچکی از جنوب دشت که بر روی رسوبات کواترنری واقع شده، به‌عنوان

خروجی آب زیرزمینی محسوب می‌شود. قابل توجه است که شیب دشت به سمت جنوب دشت در بخش خروجی آن است. به‌طور کلی، رسوبات دشت الشتر از نوع نهشته‌های آبرفتی است که به‌طور متناوب متشکل از رسوبات دانه درشت و ریزند. مساحت حوزه آبخیز این دشت، ۸۱۱ کیلومتر مربع و مساحت آبخوان دشت الشتر، حدود ۱۰۹ کیلومتر مربع است. در شکل (۱)، موقعیت آبخوان دشت الشتر در منطقه مورد مطالعه، سازندهای زمین‌شناسی و پراکنش چاه‌های بهره‌برداری، پیژومتری و شبکه‌بندی تیسن آن‌ها نشان داده شده است. تعداد چاه‌های بهره‌برداری در دشت ۱۷۶ حلقه بوده که تمرکز بیشتر آن‌ها در بخش میانی و شرقی دشت است. قابل توجه است که نرخ بهره‌برداری در این مناطق به‌علت خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و حاصلخیزی دشت نسبت به سایر مکان‌های دشت بیشتر است. تقریباً بالغ بر ۵۰ درصد آب مورد نیاز دشت برای مصارف مختلف از آب زیرزمینی تأمین می‌شود.

در این پژوهش، از آمار ماهانه ۲۴ ساله ۱۳۷۰-۱۳۹۳ تراز سطح آب زیرزمینی ۱۵ چاه‌های پیژومتری موجود که دارای آمار کامل بوده‌اند، برای پایش خشکسالی منابع آب زیرزمینی استفاده شد. همچنین از نتایج آزمون‌های پمپاژ چاه‌های اکتشافی و اطلاعات آزمون‌های پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری که حداقل شرایط چاه‌های کامل را داشتند و از نظر زمانی مطابق با دوره‌های خشکسالی به وقوع پیوسته در آب زیرزمینی بودند، استفاده شد.



شکل (۱): موقعیت آبخوان دشت الشتر در منطقه مورد مطالعه، سازندهای زمین شناسی و پراکنش چاههای بهره برداری و پیزومتری

## روش تحقیق

مراحل انجام پژوهش به شرح زیر است:

الف. استفاده از شاخص سطح آب زیرزمینی (SGI<sup>۱</sup>) به عنوان جدیدترین ابزار پایش خشکسالی آب زیرزمینی و طبقه بندی شدت خشکسالی در آبخوان دشت مورد مطالعه. از آنجایی که سطح آب زیرزمینی یک متغیر پیوسته است و به تجمعی کردن یک سری زمانی مشخص نیاز ندارد مانند بیشتر سری های زمانی هیدرولوژیکی دیگر، ممکن است از توزیع گاما یا سایر توزیع های پارامتریک تبعیت نکند؛ بنابراین براساس تجربیات سایر پژوهشگران اوستی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، ویدا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۰) و بلومفیلد و مرکانت<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) روش های ناپارامتریک که بهتر می توانند رفتار این گونه داده ها را مدل کنند، در مطالعات خشکسالی آب زیرزمینی استفاده می شوند. در این تحقیق، از شاخص SGI پیشنهاد شده به وسیله بلومفیلد و مرکانت (۲۰۱۳) که

مبتنی بر یک توزیع ناپارامتریک است، استفاده شد. شاخص SGI با استفاده از انتقال نمرات نرمال توزیع ناپارامتریک داده های سطح ایستابی آب زیرزمینی برای هر ماه تقویمی برآورد و سپس مقادیر ماهانه باهم ترکیب می شوند. طبقه بندی این شاخص همانند شاخص بارش استاندارد (SPI<sup>۵</sup>) بوده، به طوری که مقادیر بیشتر از صفر نشان دهنده ترسالی و مقادیر کمتر از صفر نشان دهنده خشکسالی است. شدت خشکسالی SGI بر مبنای نظر مک کی<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۳) به ۵ طبقه  $-2 \leq SGI \leq -1/5$  نشان دهنده خشکسالی خیلی شدید،  $-1/5 \geq SGI > -2$  متناظر با خشکسالی شدید،  $0 \geq SGI > -1$  متناظر با خشکسالی متوسط و  $SPI > 1$  تقسیم شده است.

در این تحقیق، برای پایش و تعیین دوره های خشکسالی آب زیرزمینی، از اطلاعات تراز سطح ایستابی میانگین دشت استفاده شد. میانگین تراز سطح ایستابی دشت با استفاده از مجموع

1. Standardized Groundwater Index
2. Osti
3. Vida
4. Bloomfield and Marchant

5. Standardized Rainfall Index
6. McKee

زمان پمپاژ را برطرف کند. همچنین این مدل خطاهای مربوط به جداره چاه که ممکن است در اثر بسته شدن منافذ یا باز شدن منافذ نزدیک چاه ایجاد شود در نظر می‌گیرد.

### روابط استفاده شده در مدل مانچ

حل تبدیل لاپلاس افت بی‌بعد در چاه پمپاژ به صورت زیر است (مانچ، ۱۹۹۷):

$$\overline{h_{wd}} = \frac{2(A + S_w)}{P(L_D - d_D)[1 + P_{wD}(A + S_w)]} \quad (1)$$

(۲)

$$A = \frac{2}{(L_D - d_D)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K_0(q_n) \{ \sin[\varepsilon_n(1-d_D)] - \sin[\varepsilon_n(1-L_D)] \}^2}{\varepsilon_n q_n K_1(q_n) [\varepsilon_n + 0.5 \sin(2\varepsilon_n) n^2 \pi^2]}$$

$$w_D = \frac{\pi r_c^2}{2r_w^2 S_s (l - d)} \quad (3)$$

$$q_n = \sqrt{\varepsilon^2 \beta_w + p} \quad (4)$$

$$\beta_w = \frac{r_w^2 K_z}{b K_r} \quad (5)$$

$$h_D = \frac{4\pi K b}{Q} (h_0 - h) \quad (6)$$

$$t_D = \frac{K t}{S_s r_w^2} \quad (7)$$

همچنین  $\varepsilon_n \tan(\varepsilon_n) = \frac{p}{(\sigma \beta - p/\gamma)}$  ریشه‌های  $\varepsilon_n$  که در آن

$$\overline{h_{wd}}$$
 ذکر شده روابط  $\beta = \alpha_1 b S_y / K_z$  و  $\sigma = S_s b / S_y$

افت بی‌بعد در چاه پمپاژ  $\alpha_1$  ثابت تجربی برای زهکشی غیرلحظه‌ای است  $[L/T]$ ،  $b$  ضخامت آبخوان  $[L]$ ،  $d$  فاصله از سطح ایستابی تا بالای اسکرین چاه پمپاژ  $[L]$ ،  $d_D = d/b$  هدایت  $K_r$  هدایت هیدرولیکی شعاعی  $[L/T]$ ،  $K_z$  هدایت هیدرولیکی عمودی  $[L/T]$ ،  $l$  فاصله از سطح ایستابی تا کف اسکرین چاه پمپاژ  $[L]$ ،  $l_D = l/b$  متغیر تبدیل لاپلاس،  $Q$  نرخ پمپاژ  $[L^3/T]$ ،  $r$  فاصله شعاعی،  $r_c$  شعاع لوله جداره  $[L]$ ،  $r_w$  شعاع چاه  $[L]$ ،  $S_s$  ذخیره ویژه  $[L/T]$ ،  $S_w$  فاکتور پوسته‌ای درون چاهی (بدون بعد)،  $S_y$  آبدهی ویژه بی‌بعد و  $t$  زمان  $[L]$  است.

ضرایب هیدرودینامیک آبخوان مورد مطالعه در دوره‌های خشکسالی (اواخر دهه ۱۳۷۰ و اواخر دهه ۱۳۸۰) با استفاده از مدل مانچ در نرم‌افزار AQTESOLV از داده‌های افت-زمان و دبی ثبت شده چاه‌های پمپاژ (بهره‌برداری) برآورد

حاصل ضرب مساحت محاسبه شده تحت تأثیر چاه‌های پیرومتری (مساحت شبکه تیسن هر چاه) در تراز سطح ایستابی ماهانه آن‌ها تقسیم بر مساحت کل دشت به دست آمد.

ب. برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان

درک اهمیت چهار فاکتور مهم از جمله خصوصیات هیدرولیکی آبخوان، توزیع زمانی تغذیه و تخلیه آبخوان و توزیع مکانی چاه‌ها می‌تواند به عملکرد پایدار سیستم آب زیرزمینی کمک کند (هاگمن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱). خصوصیات هیدرولیکی آبخوان منعکس‌کننده قابلیت انتقال و ظرفیت ذخیره آبخوان هستند که در رخدادهای شدید از قبیل خشکسالی یا برداشت بی‌رویه از آبخوان می‌توانند تحت تأثیر واقع شوند. در این تحقیق، پس از شناسایی دوره‌های خشکسالی آبخوان مورد مطالعه، وضعیت هیدرولیکی آبخوان مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به این که آبخوان مورد مطالعه از نوع آزاد است، روش‌های برآورد ضرایب هیدرودینامیک بایستی با شرایط آبخوان آزاد مطابقت کنند یا اینکه از روش‌های به‌کارگرفته شده برای آبخوان‌های تحت فشار اما با اعمال یک سری تصحیحات استفاده شود (علیزاده، ۲۰۰۶). روش‌های متفاوتی برای برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان‌های آزاد وجود دارد که می‌توان مدل بولتون (بولتون<sup>۲</sup>، ۱۹۶۳)، مدل نیومن (نیومن<sup>۳</sup>، ۱۹۷۲) روش تایس و کوپر-ژاکوب با تحلیل کوزنی و مدل مانچ<sup>۴</sup> (مانچ، ۱۹۹۷) را نام برد. هر کدام از این مدل‌ها یک سری فرضیات در نظر می‌گیرند که ممکن است با یکدیگر تفاوت‌هایی داشته باشند. براساس بررسی به‌عمل آمده و نوع داده‌های مورد استفاده (داده‌های افت-زمان با دبی‌های پمپاژ پلکانی در چاه‌های بهره‌برداری) مدل تحلیلی مانچ به‌عنوان مدلی انتخاب شد که می‌تواند خطاهای ناشی از زهکشی آبی<sup>۵</sup> عدم تراکم‌پذیری و ذخیره چاه در

1. Hugman
2. Boulton
3. Neuman
4. Moench

۵. این مفهوم زهکشی برای آبخوان‌های آزاد سازگاری نداشته زیرا واکنش به کاهش ارتفاع سطح آب در اثر تخلیه در این گونه آبخوان‌ها تأخیری است و تابع نیروی ثقل است.

بررسی، وضعیت متوسط تا شدید خشکسالی نیز در آبخوان مورد مطالعه حاکم بوده است. به طور کلی، در طول دوره آماری، دو دوره خشکسالی در سال‌های آبی ۱۳۷۹-۱۳۸۰ و ۱۳۸۷-۱۳۸۸ که تقریباً تا اواخر شهریور ۱۳۹۳ ادامه داشته، اتفاق افتاده است. در این سال‌ها کاهش مقدار بارش نسبت به سال‌های دیگر قابل ملاحظه است (شکل ۲). علاوه بر خشکسالی، عامل برداشت بی‌رویه در این سال‌ها بر شدت تنش سیستم آبخوان الشتر افزوده است (شکل ۳). تحقیقات قبلی سلیمانی مطلق (۲۰۱۱) و طالبی و همکاران (۲۰۱۴) وضعیت‌های به وقوع پیوسته خشکسالی آب زیرزمینی دشت الشتر را در سال‌های بیان شده و همچنین برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در این سال‌ها را تأیید می‌کنند.

**– برآورد ضرایب هیدرودینامیک آبخوان و تغییرات آن‌ها در طی تنش‌های وارد شده به سیستم آبخوان**

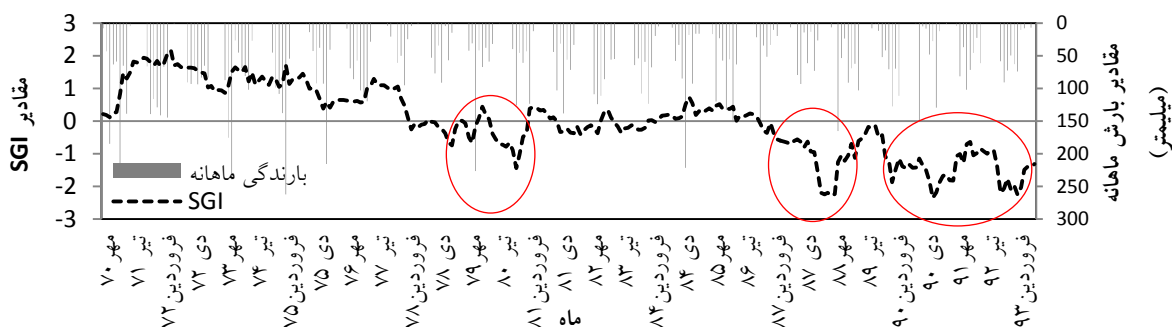
نتایج تغییرات مکانی ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در سه مقطع زمانی در ابتدای دوره آماری، در اواخر دهه ۷۰ و در اواخر دهه ۸۰ مورد ارزیابی واقع شد. نتایج پهنه‌بندی مکانی در طی این سه دوره، برای ضریب قابلیت انتقال و ضریب ذخیره دشت مورد مطالعه، در شکل (۴) نشان داده شده است.

شده است. تعداد چاه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه در روش مانچ، ۱۲ حلقه در هر دوره بوده که در دشت پراکنش مناسبی داشته‌اند. در ابتدای دوره آماری مورد مطالعه، از نتایج مطالعات ژئوالکتریک و آزمون‌های پمپاژ صورت گرفته در چاه‌های اکتشافی (که با روش‌های تاپس و کوپر-ژاکوب تحلیل شده‌اند) در تعیین این ضرایب استفاده شد.

**نتایج و بحث**

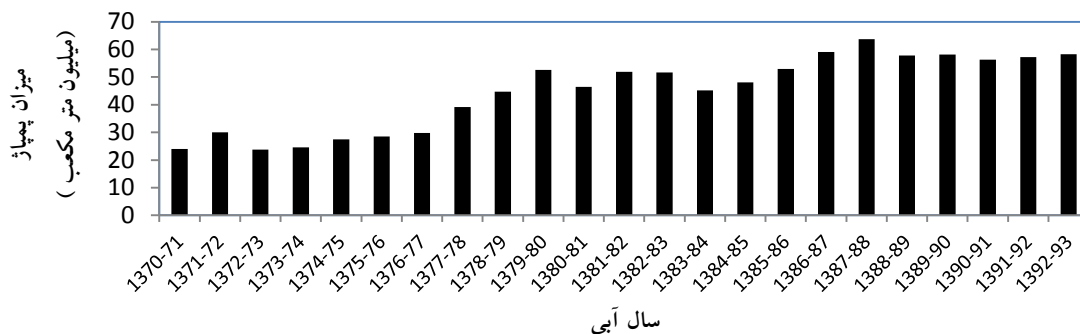
**– پایش و تعیین خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص SGI**

در آبخوان دشت الشتر وضعیت خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص SGI تعیین و بررسی شد. با توجه به نمودار شکل (۲)، نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای دوره آماری مورد بررسی وضعیت منابع زیرزمینی نرمال و مقدار تغذیه نسبت به تخلیه، بیشتر بوده است. این روند، تقریباً تا سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۹ حفظ شده و در سال ۱۳۸۰-۱۳۷۹، خشکسالی آب زیرزمینی به وقوع پیوسته است. پس از این سال، نمودار SGI مجدداً سیر صعودی پیدا کرده و وضعیت ترسالی بر سیستم آب زیرزمینی حاکم شده تا اینکه در سال ۱۳۸۷-۱۳۸۸ خشکسالی خیلی شدید در سیستم آب زیرزمینی به وقوع پیوسته است. در اواخر دوره آماری مورد

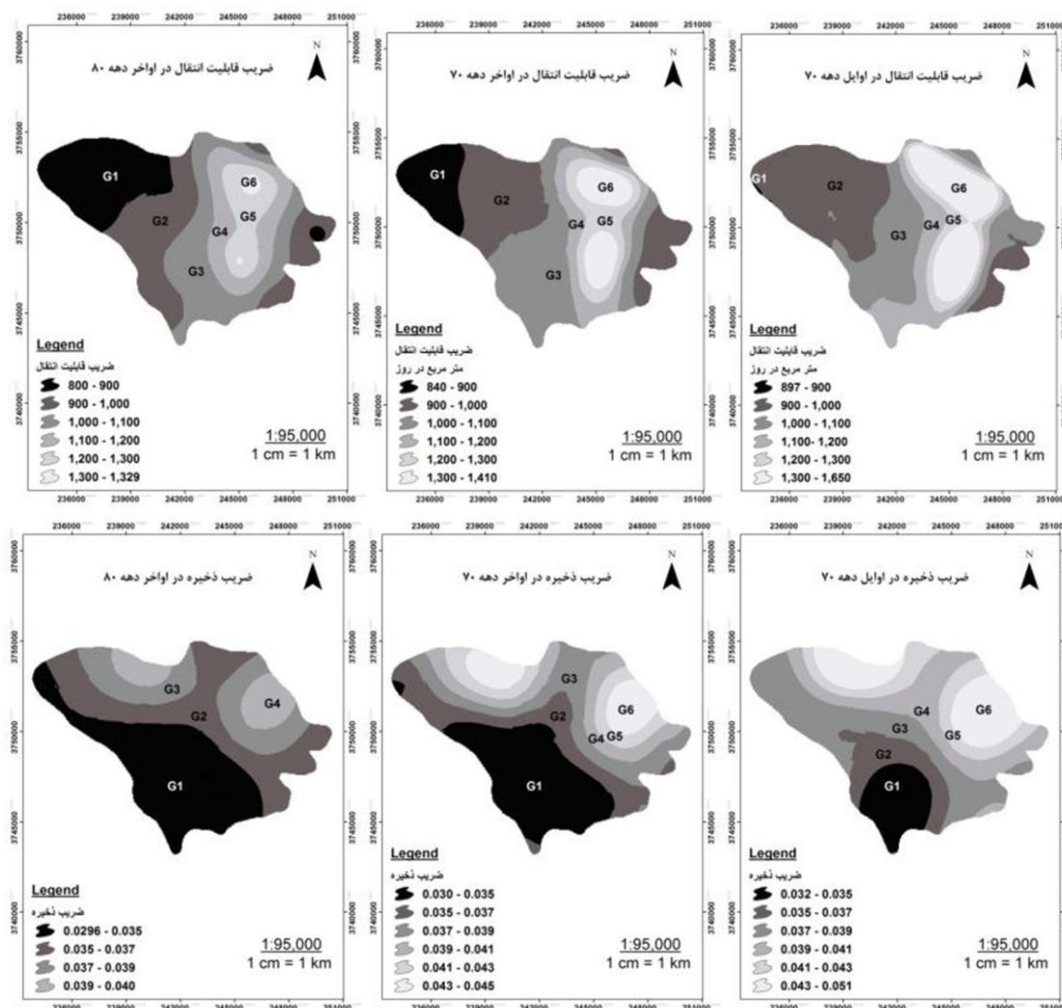


شکل (۲): تغییرات مقادیر شاخص SGI در میانگین تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی الشتر





شکل (۳): تغییرات مقادیر بهره‌برداری آب زیرزمینی دشت الشتر



شکل (۴): تغییرات ضرایب هیدرودینامیک آبخوان در ابتدای دوره مورد مطالعه و دو دوره خشکسالی اواخر دهه ۷۰ و اواخر دهه ۸۰

می‌دهد که در اوایل دهه ۷۰ مقادیر آن از ۸۹۷ تا ۱۶۵۰ مترمربع در روز به ۸۴۰ تا ۱۴۱۰ متر در روز در اواخر دهه ۷۰ و سپس به ۸۰۰ تا ۱۳۲۹ متر در روز در اواخر دهه ۸۰ تغییر یافته است. به لحاظ آماری با استفاده از آزمون t اختلاف میانگین متغیر مورد بررسی در سطح اطمینان ۹۵ درصد

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، با اعمال تنش‌ها (خشکسالی، بهره‌برداری بیش از حد مجاز)، خصوصیات دشت تغییر کرده است، به طوری که پارامترهای ذکر شده هم از نظر مقدار و هم از نظر مساحت تفاوت قابل توجهی دارند. نتایج مقایسه ضریب قابلیت انتقال با توجه به شکل (۴) نشان

دارای مقادیر بالای ضریب قابلیت انتقال کاهش نشان می‌دهد. این در واقع نشان‌دهنده نتیجه عوامل تأثیرگذار خشکسالی و بهره‌برداری زیاد روی آبخوان دشت مورد مطالعه بوده که موجب گسترش محدوده‌های با مقادیر پایین قابلیت انتقال شده است؛ برای مثال، کلاس ۱ (ضرایب قابلیت انتقال کمتر از ۹۰۰ مترمربع) که دارای سطحی خیلی کم حدود ۱۳ درصد در اوایل دهه ۷۰ بوده است، در اواخر دهه ۷۰ به ۱۲ درصد و در اواخر دهه ۸۰ به ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. همین‌طور عکس این قضیه در کلاس ۶ اتفاق افتاده، به طوری که برای ضرایب بیشتر از ۱۳۰۰ مترمربع در روز، تغییر محدوده تحت تأثیر از ۱۷ درصد در اوایل دهه ۷۰ به ۹ درصد در اواخر دهه ۷۰ و سپس به یک درصد در اواخر دهه ۸۰ مشهود است. به طور کلی، با توجه به نتایج شکل (۴) و جدول (۱)، تغییرات مقدار و محدوده تحت تأثیر هر کلاس با وقوع دوره‌های خشکسالی و بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی در دشت رابطه مستقیم دارد.

معنی‌دار بوده است. با توجه به شکل (۲) و (۳)، وقوع خشکسالی‌های هیدروژئولوژیکی شدید و خیلی شدید و افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، از دلایل عمده کاهش این ضریب محسوب می‌شوند. تقلیل ضخامت بخش اشباع آبخوان و همچنین کند شدن سرعت نفوذپذیری در اثر کاهش خلل و فرج مواد متخلخل در طی تنش‌های وارد شده به سیستم آبخوان، می‌تواند باعث تغییر ضریب قابلیت انتقال آبخوان شود. مقایسه ضریب ذخیره نشان می‌دهد که مقادیر آن از ۰/۰۳۲ تا ۰/۰۵۱ در اوایل دهه ۷۰ به ۰/۰۳ تا ۰/۰۴۵ در اواخر دهه ۷۰ و سپس به ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۴ در اواخر دهه ۸۰ کاهش یافته است. در خصوص این متغیر نیز مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون t نشان داد که در سطح اطمینان ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در جدول (۱)، چنانچه مقایسه بین درصد تغییر محدوده کلاس‌های (۱-۶) صورت گیرد، مقدار آن برای ضرایب پایین قابلیت انتقال از اوایل دهه ۷۰ به اواخر دهه ۸۰ افزایش، و برای کلاس‌های

جدول (۱): درصد تغییر محدوده کلاس‌های ضریب قابلیت انتقال در سه دوره زمانی

کلاس	دامنه تغییرات ضریب قابلیت انتقال (مترمربع در روز)	اوایل دهه ۷۰ درصد محدوده	اواخر دهه ۷۰ درصد محدوده	اواخر دهه ۸۰ درصد محدوده
۱	<۹۰۰	۰/۱۳	۱۱/۶	۲۳
۲	۹۰۰-۱۰۰۰	۳۴/۵	۲۸	۲۷
۳	۱۱۰۰-۱۰۰۰	۲۵/۳	۳۰	۲۵
۴	۱۲۰۰-۱۱۰۰	۱۵	۱۱/۴	۱۴
۵	۱۳۰۰-۱۲۰۰	۷	۱۰	۱۰
۶	>۱۳۰۰	۱۷	۹	۱

جدول (۲): تغییر محدوده ضریب ذخیره در سه دوره زمانی و خوشه‌های مختلف

گروه	دامنه تغییرات ضریب ذخیره	اوایل دهه ۷۰ درصد محدوده	اواخر دهه ۷۰ درصد محدوده	اواخر دهه ۸۰ درصد محدوده
۱	<۰/۰۳۵	۱۲	۳۱	۳۸
۲	۰/۰۳۷-۰/۰۳۵	۱۱	۱۸	۳۲
۳	۰/۰۳۹-۰/۰۳۷	۲۷	۱۸	۲۰
۴	۰/۰۴۱-۰/۰۳۹	۲۰	۱۳	۱۰
۵	۰/۰۴۳-۰/۰۴۱	۱۳	۱۰	
۶	>۰/۰۴۳	۱۷	۱۰	



نتایج سلیمانی مطلق (۲۰۱۱) و شکل (۱) بیشترین تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در بخش‌های شرقی و در حوالی کلاس‌های ۴، ۵ و ۶ است. اثرات برداشت نامعقول به‌ویژه در وقوع خشکسالی‌ها می‌تواند در تغییرات حداکثری خصوصیات هیدرولیکی آبخوان در بخش‌های مذکور مؤثر باشد. تشدید پدیده خشکسالی در آب زیرزمینی در اثر برداشت بیش از حد و تبعات آن و چالش برانگیز بودن بهره‌برداری آب زیرزمینی در مواقع کاهش تغذیه، موضوع بسیار مهمی بوده که در یافته‌های ون کمپ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) و بلومفیلد و همکاران (۲۰۱۵) اشاره شده است.

### نتیجه‌گیری

تصمیم صحیح برای تخصیص منابع آب زیرزمینی به متقاضیان، بستگی به شناخت و عملکرد آبخوان در طی دوره‌های ترسالی یا خشکسالی دارد. از آنجایی که شناخت و عملکرد سفره نیازمند برآورد خصوصیات آبخوان از جمله مقادیر قابلیت انتقال و ضریب ذخیره است، در دوره‌های مختلف به‌ویژه دوره‌های خشکسالی بایستی مد نظر قرار گیرد. عدم توجه به اثر خشکسالی و فشار بهره‌برداری آب زیرزمینی روی خصوصیات آبخوان، کارشناس یا تصمیم‌گیر را در مدیریت تخصیص مصارف مختلف دچار خطای محاسباتی می‌کند. درک این حلقه مفقوده می‌تواند به بهبود سیستم مدیریتی منابع آب زیرزمینی کمک کند. براساس نتایج استخراج‌شده، اثر دوره‌های خشکسالی و افزایش بهره‌برداری در اواخر دهه ۷۰ و اواخر دهه ۸۰ بر ضرایب هیدرودینامیک آبخوان دشت الشتر مشهود بوده است. این در حالی است که بیشترین کاهش در مورد قابلیت انتقال از ۱۰۰ تا ۳۲۰ مترمربع در روز در مکان‌های مختلف دشت در اواخر دهه ۸۰ نسبت به اوایل دوره مورد مطالعه اتفاق افتاده است. همچنین مقدار ضریب ذخیره در این دوره بین ۳ تا ۱۰ درصد نسبت به سال‌های اولیه کاهش نشان می‌دهد. تقلیل ضخامت بخش اشباع و کاهش خلل و فرج مواد متخلخل آبخوان در اثر افزایش بهره‌برداری و وقوع خشکسالی می‌تواند از دلایل

قابل توجه است که با افزایش خشکسالی و همچنین برداشت بی‌رویه آبخوان به‌ویژه در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰، مقدار ضریب قابلیت انتقال حدود ۳۲۰ مترمربع در روز در بخش شرقی دشت (مکان واقع شده در کلاس ۶) کاهش نشان می‌دهد و مقدار این کاهش در بخش غربی آبخوان حدود ۱۰۰ مترمربع در روز بوده است. نتایج این بخش مطالعه با نتایج تکابی (۱۳۹۴) سازگار است به طوری که نتایج مطالعه ایشان نشان داده که تغییر حدود ۴۰ تا ۴۰۰ مترمربع بر روز در قابلیت انتقال آبخوان شیروان در سال ۱۳۷۸ نسبت به سال قدیمی‌تر آن حاصل شده و علت آن افت سطح ایستابی و کاهش ضخامت اشباع ذکر شده است. با توجه به جدول (۲) از نظر محدوده تحت تأثیر هر کلاس، ضریب ذخیره در مقادیر کم (کلاس‌های ۱، ۲ و ۳) با گذشت زمان و وقوع دوره‌های خشکسالی و تشدید بهره‌برداری افزایش نشان می‌دهد و در مقادیر زیاد (کلاس‌های ۴ و ۵ و ۶) با گذشت زمان کاهش نشان می‌دهد؛ این درحالی است که کلاس‌های ۴ و ۵ هیچ سطحی در دوره خشکسالی به وقوع پیوسته در اواخر دهه ۸۰ را شامل نمی‌شوند. مقدار کاهش ضریب ذخیره از ۰/۰۵۱ به ۰/۰۴ در بخش شرقی و شمالی آبخوان و از ۰/۰۳۲ به ۰/۰۲۹ در بخش جنوبی و غربی با گذشت زمان و وقوع خشکسالی در اواخر دهه ۸۰ مشهود است. کاهش حجم آب ذخیره‌شده در اثر افزایش بهره‌برداری در دوره‌های ذکر شده و افزایش درصد تخلخل غیرمفید به تخلخل مفید در اثر کاهش خلل و فرج مواد متخلخل، می‌تواند از عوامل تغییر ضریب ذخیره باشند. این ضریب به‌طور کلی نتایج این تحقیق با یافته‌های حسینی و همکاران (۲۰۰۵)، مختاری و اسپهبد (۲۰۰۹)، نادریان‌فر و انصاری (۲۰۱۱)، زنگ و همکاران (۲۰۱۰)، رادفر و همکاران (۲۰۱۱)، اشرف و احمد (۲۰۱۱) و هاگمن و همکاران (۲۰۱۱) سازگاری دارد. یافته‌های این پژوهشگران بیان‌کننده این مطلب است که اثرات پدیده‌های خشکسالی آب زیرزمینی، پیامدهای تخلیه و افت سطح ایستابی آب زیرزمینی، باعث تغییرات خصوصیات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی آبخوان می‌شوند. قابل توجه است براساس

مطالعه در آینده شود اگر بهره‌برداری با روند کنونی ادامه یابد. نتایج این مطالعه می‌تواند به سیستم مدیریت آبخوان دشت الشتر و سایر آبخوان‌های کشور کمک کند تا تخصیص منابع آب زیرزمینی به مصارف مختلف در شرایط مختلف تنش تر یا خشک با حفظ خصوصیات آبخوان بهینه شود.

عمده‌ بروز تغییرات کاهشی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان دشت الشتر محسوب شود. به طور کلی، با افزایش شدت خشکسالی و برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، بخش‌های مختلف دشت ضرایب هیدرودینامیکی کمتر را در سطوح بیشتری تجربه کرده‌اند. تغییر ضرایب هیدرودینامیکی ممکن است باعث کاهش دسترسی منابع آب زیرزمینی دشت مورد

## منابع

- Alizadeh, A., 2006. Principles of Applied Hydrology. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. 807 pp.
- Ashraf, A., Ahmad, Z., 2008. Regional groundwater flow modelling of Upper Chaj Doab of Indus Basin, Pakistan using finite element model (Feflow) and geoinformatics. *Geophysical Journal International* 173, 17–24.
- Bloomfield, JP., Marchant, BP., 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardized precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 4769–4787.
- Bloomfield, JP., Marchant, BP., Bricker, SH., Morgan, RB., 2015. Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19, 4327–4344.
- Boulton, NS., 1963. Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 26, pp. 469-482.
- Consulting engineers of Zharfab Payesh, 2003. Semi-detailed studies of Aleshtar Groundwater.
- Ghafoori Kharanagh, S., 2012. Selection of suitable method to estimate the aquifer hydrodynamic coefficients. M.Sc. thesis, University of Tehran. 109 pp.
- Hosseini, A., Farajzade M., Velayati S., 2005. Analysis of the water crisis in Nishabur with environmental planning approach. Research Committee of Water Company Khorasan province. 143 pp.
- Hugman, R., Stigter, TY., Monteiro, JP., Nunes, L., 2011. Influence of aquifer properties and the spatial and temporal distribution of recharge and abstraction on sustainable yields in semi-arid regions. *hydrological processes* 26, 18, 2791–2801.
- Kresic, N., 2007. Hydrogeology and groundwater modeling. 2ed. CRC Press. 830pp.
- Mishra, A K., Singh, VP., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391, 202–216.
- Moench, AF., 1997. Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water-table aquifer, *Water Resources Research* 33, 6, 1397-1407.
- Mokhtari, H., Espahbod, H., 2009. The investigation of hydrodynamic parameters potentiality of the Varamin plain regarding the variation of salinity gradient. *Journal of Geoscience* 4,2, 27-47.
- Naderianfar, M., Ansari, H., 2011. evaluation of drought severity-duration effects on watertable elevation at different time scales (case study: neyshabur plain). *Water Engineering Journal* 4, 1-15.
- Neuman, SP., 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response of the water table, *Water Resources Research* 8, 4, 1031-1045.
- Osti, A L., Lambert, MF., Metcalfe, AV., 2008. On spatiotemporal drought classification in New South Wales: Development and evaluation of alternative techniques, *Australian Journal of Water Resources* 12, 21–34.
- Radfar, M., Van Camp, M., Walraevens, K., 2013. Drought impacts on long-term hydrodynamic behavior of groundwater in the tertiary–quaternary aquifer system of Shahrekord Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences* 70, 2, 927-942.
- Soleimani Motlagh, M., 2012. Optimized Exploitation Management of Groundwater Resources in Drought Conditions using MODFLOW Model (Case Study: Aleshtar

- Plain, Lorestan Province). M.Sc. thesis, University of Yazd. 136 pp.
19. Takabi, E., 2015. Determined the hydrogeological parameters of the Shirvan aquifer. M.Sc. thesis, University of Shahrood. 136 pp.
  20. Talebi, A., Soleimani Motlagh, M., Malekinezhad, H., Taie Semiromi, M. 2014. Optimized Exploitation Management of Groundwater Resources in Drought Conditions in Aleshtar Plain. Aridland & Desert Research Institute. Yazd University. 123 pp.
  21. Van Camp, M., Radfar, M., Walraevens, K., 2010. Assessment of groundwater storage depletion by overexploitation using simple indicators in an irrigated closed aquifer basin in Iran. *Agricultural Water Management* 97, 11, 1876–1886.
  22. Vidal, JP., Martin, E., Kitova, N., Najac, J., Soubeyroux, JM., 2012. Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios, *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 2935–2955.
  23. Zhang, Y., Xue, YQ., Wu, JC., Shi, XQ., Yu, J., 2010. Excessive groundwater withdrawal and resultant land subsidence in the Su-Xi-Chang area, China, *Environmental Earth Sciences* 61, 1135–1143.

## Change of storage coefficient and transmissivity of Aleshtar plain aquifer due to drought and groundwater overexploitation

Mahdi Soleimani Motlagh<sup>1</sup>, Hoda Ghasemieh<sup>2</sup>, Ali Talebi<sup>3</sup>

Received: 11/7/2016

Accepted: 8/8/2016

### Abstract

Drought and overexploitation of groundwater should control the aquifer properties (e.g. storage coefficient and transmissivity). The role of stress factors is identified when the performance of aquifer hydrodynamic coefficients be studied. Since in the most aquifers, allocation and utilization management is based on the pumping test in the past, it would not be expected the optimal management. In order, in this study, the condition of occurrence of groundwater drought periods was investigated using SGI Index. Afterward, two periods of drought in late 1990s and late 2000s which had the severe and very severe drought status was selected as entered stresses to aquifer system. In these periods, the results of pumping tests in exploitation wells (that had the conditions of complete wells) were used to determine the hydrodynamic coefficients of the aquifer. Estimating of hydrodynamic coefficients in the exploitation wells was done using Moench Model. This model is considered the errors caused by instantaneous drainage, wellbore storage and the lack of compressibility unconfined aquifer. Coefficients obtained were compared with the pumping tests and Geoelectric studies (at the beginning of the study period (in early 2000s)). The Results showed that in both drought periods, the aquifer hydrodynamic coefficients had a reduction in comparison with baseline period. In case of transmissivity of aquifer, most its value has been occurred about 100 to 320 m<sup>2</sup>/day in late of 2000s in different places of plain. This is indicative the reduction of permeability and decrease of saturated zone thickness of aquifer due to drought and overexploitation. In this period, the results also showed that storage coefficient have been reduced from 3 to 10 percent to initial period. For both parameters investigated (storage coefficient and transmissivity), the results of compare means using t test in confidence level 95% showed that there is a significant discrepancy between values of each parameter during stress period to primarily years. In general, with increasing of drought severity and overexploitation of groundwater, different sections of the Aleshtar plain have been experienced lower hydrodynamic coefficients in wider areas.

**Key words:** Drought Periods, SGI Index, Hydrodynamic parameters, Moench Model.

1. Department of Watershed and Range Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan City, Iran. Email: soleimani@grad.kashanu.ac.ir

2. Department of Watershed and Range Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan City, Iran. Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir Phone:+983155913227, Corresponding Author

3. Department of Watershed and Range Management, Faculty of Natural Resources and Desert, University of Yazd, Yazd City, Iran, talebisf@yazd.ac.ir