

مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های آب و هوایی و از جمله رخدادهایی است که هر ساله خسارت‌های زیادی را باعث می‌شود. این پدیده از ویژگی‌های اصلی و تکرار شونده تمامی اقلیم‌ها به شمار می‌آید. اثرات خشکسالی صرفاً به نواحی خشک و نیمه خشک محدود نبوده و می‌تواند اثرات زیان‌آوری بر منابع آب زیرزمینی هر منطقه داشته باشد [۱]. علاوه بر خشکسالی، بهره‌برداری زیاد از منابع آب زیرزمینی می‌تواند افت سطح ایستابی را تشدید کند. برای ارزیابی اثرات خشکسالی و بهره‌برداری زیاد از منابع آب زیرزمینی نیاز است که جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی گردد، تا با دستیابی به وضعیت آبخوان، راهکارهای مدیریتی جهت کاهش اثرات عوامل مذکور اعمال شود. راهکارهای متعددی در خصوص مدیریت آب زیرزمینی برای بهره‌برداری بهینه آب و تعدیل خشکسالی وجود دارد که از جمله می‌توان به مدیریت کاهش برداشت، استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری، تغییر الگوی کشت، اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی و غیره اشاره کرد. پژوهش‌های گوناگون محققین در راستای توجه به خشکسالی‌ها و بهره‌برداری غیر اصولی از منابع آب زیرزمینی مزید بر تلاش آنان برای ارائه بهترین روش‌های مدیریتی و یا تعدیل و کنترل اثرات آنها است. بعنوان مثال طایی سمیرمی [۶] با بررسی وضعیت آبخوان دشت گریاگان فسا با استفاده از مدل MODFLOW کاهش بهره‌برداری به میزان ۱۰ درصدی به همراه افزایش ۱۰ درصدی تغذیه مصنوعی را راهکاری مناسب در راستای کنترل اثرات منفی روند کنونی بهره‌برداری از آب زیرزمینی ارائه داده است. ظهره‌وند و همکاران [۹] انتقال آب از دشت‌های اطراف و تزریق آن به دشت بیرجند را گزینه مناسبی برای افزایش سطح آب زیرزمینی و مدیریت آن پیشنهاد کرده‌اند. بارانی [۲] با استفاده از مدل تفاضل محدود MODFLOW، آبخوان دشت مروست را شبیه‌سازی نمود؛ نتایج وی بیانگر قابلیت مدل در برآورد مؤلفه‌های بیلان بویژه مؤلفه تغذیه مصنوعی می‌باشد. ایشان با اعمال تغذیه مصنوعی در مدل مذکور نتیجه گرفت که روند افت در بخش غربی آبخوان مورد مطالعه کنترل شده و در بخش شرقی آبخوان بدلیل افزایش چاه‌های بهره‌برداری ادامه دارد. رضایی و سرگزی [۵] روش تغذیه مصنوعی راهکاری مناسب برای کنترل روند افت و اثرات منفی خشکسالی در آبخوان آبرفتی دشت گوهرکوه در جنوب باختر زاهدان پیشنهاد شده است. در این تحقیق سعی بر آن است تا ابتدا سطح آب زیرزمینی آبخوان الشتر با اعمال سناریوهای خشکسالی در مدل MODFLOW مورد ارزیابی قرار گیرد و برای

 اثر اجرای طرح تغذیه مصنوعی در تعدیل
خشکسالی

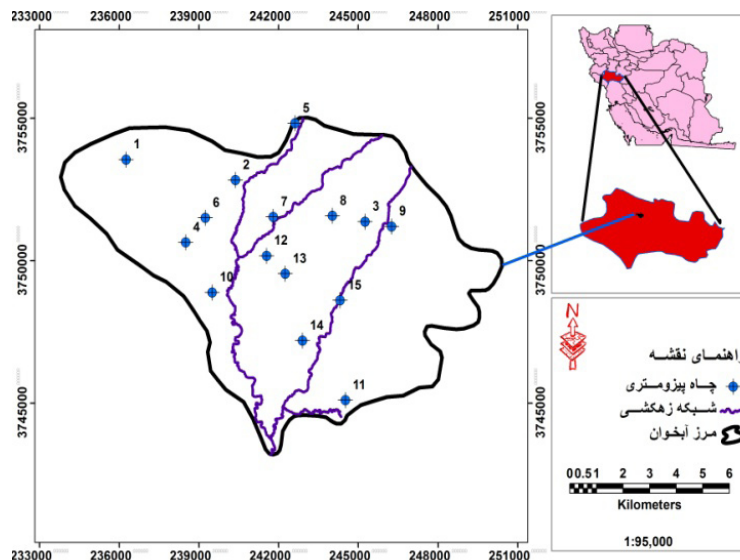
مهدی سلیمانی مطلق^۱، علی طالبی^۲، حسین ملکی‌نژاد^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۱۱

چکیده

خشکسالی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مهمترین عوامل تنش سفره هستند. مدیریت بهره‌برداری و خشکسالی ابزاری کارآمد برای متعادل نمودن وضعیت آبخوان دشت الشتر است. برای محقق شدن این امر جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی گردید. سپس واکنش مدل نسبت به سناریوهای خشکسالی نرمال، متوسط، شدید و خیلی شدید سنجیده شد. نتایج نشان داد که با افزایش خشکسالی، تراز سطح ایستابی و ذخیره سفره کاهش می‌یابد. برای کنترل اثرات خشکسالی نرمال، متوسط و شدید، مدیریت کاهش ۳۵ درصدی بهره‌برداری در قالب نصب کتورهای هوشمند و اجرای طرح‌های نوین آبیاری سودمند بوده و جهت تعدیل تنش خشکسالی خیلی شدید علاوه بر روش مدیریتی مذکور، اجرای طرح تغذیه مصنوعی پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، حوضچه تغذیه، راهکار مدیریتی، دشت الشتر

۱. نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کاشان و رایانامه: soleimani@grad.kashanu.ac.ir
۲ و ۳. اعضای هیأت علمی گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه یزد



شکل ۱- موقعیت آبخوان دشت الشتر و پراکنش چاه‌های بهره‌برداری

تعدیل اثرات منفی آن راهکار مدیریتی ارائه گردد.

مواد و روش‌ها

دشت الشتر در شمال غربی دشت خرم‌آباد و با فاصله حدود ۵۲ کیلومتر از آن قرار دارد. آبخوان این دشت دارای مختصات جغرافیایی با عرض‌های شمالی از $33^{\circ} 54' 15''$ تا $33^{\circ} 57' 6''$ و طول‌های شرقی از $48^{\circ} 44' 7''$ تا $48^{\circ} 18' 7''$ می‌باشد. دو رشته کوه مرتفع آهکی، حد شمالی و شمال شرقی دشت را محدود کرده‌اند. مساحت حوضه آبخیز این دشت ۸۱۱ کیلومتر مربع و مساحت آبخوان دشت الشتر حدود $109/62$ کیلومتر مربع می‌باشد. سفره موجود در محدوده مورد مطالعه از نوع آزاد بوده و کلیه چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه در سفره آزاد و آبرفتی واقع شده‌اند [۸]. موقعیت آبخوان دشت الشتر در حوضه مورد مطالعه به همراه پراکنش چاه‌های پیزومتری در شکل (۱) نشان داده شده است. ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان که پارامترهای اصلی مدل‌سازی آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند، از طریق آزمون پمپاژ در ۴ چاه اکتشافی تعیین شده‌اند. بر این اساس مقادیر قابلیت انتقال برای چاه‌های مختلف بین ۸۴۰ تا ۱۵۶۰ متر مربع در روز متغیر است. بارندگی متوسط سالانه در محدوده دشت بر اساس رابطه گرادیان-ارتفاع $011/8$ میلی‌متر محاسبه شده است.

برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت الشتر، کلیه اطلاعات بویژه داده‌های عمق سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری، بارندگی و ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان گردآوری گردید.

شبکه‌بندی آبخوان مورد مطالعه با ابعاد سلول ۵۰ در ۵۰ متر صورت گرفت. که با احتساب مساحت آبخوان تعداد ۳۳۳ ستون و ۲۳۷ سطر به‌دست آمد. محدوده مدل آبخوان الشتر در مجموع دارای ۴۳۸۷۹ سلول فعال و مرز آن تلفیقی از دو نوع فیزیکی و مصنوعی (هیدرولیکی) می‌باشد. در مرحله بعدی تمام لایه‌های مورد نیاز مدل MODFLOW شامل لایه توپوگرافی کف و سقف آبخوان،

لایه هدایت هیدرولیکی در محیط نرم‌افزار ARCGIS تهیه و وارد مدل شد. در مدل MODFLOW چهار بسته تغذیه، رودخانه، چاه و تبخیر و تعرق فعال گردید.

بعد از ورود لایه‌های اطلاعاتی در مدل و تکمیل نمودن بسته‌ها، مدل با ۲۰۰۰ تکرار اجرا شد. سپس در واسنجی حالت ماندگار، از داده‌های سطح آب چاه‌های پیزومتری در آبان‌ماه ۱۳۷۱ که دارای کمترین نوسان است، استفاده شد و عوامل ذاتی آبخوان نظیر هدایت هیدرولیکی، تخلخل مؤثر و رسانایی هیدرولیکی رودخانه در مدل بهینه گردید. همچنین در واسنجی حالت ناپایدار عوامل تغذیه و تخلیه به روش سعی و خطا در ۲۶ دوره (از آبان‌ماه ۷۲ تا مهرماه ۸۵) تغییر داده شد و مدل اجرا گردید. میزان دقت بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی با معیار ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) بر اساس رابطه (۱) سنجیده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X}_t)^2} \quad (1)$$

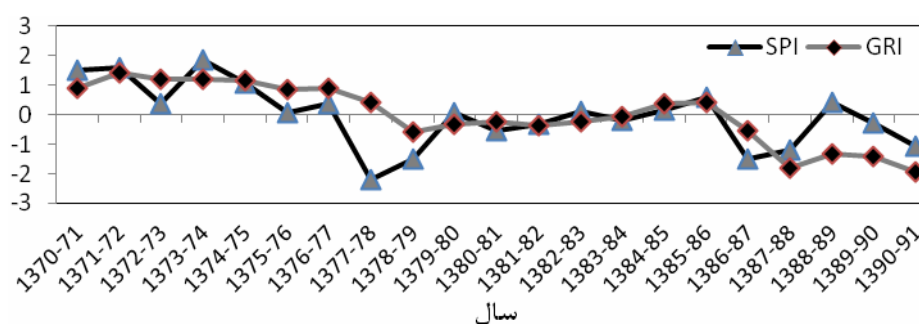
در رابطه فوق X_t ، $\bar{X}_t$ و n به ترتیب مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی شده و تعداد مقادیر مشاهداتی می‌باشند. بعد از واسنجی در حالت ناپایدار مدل نیازمند تأیید یا صحت‌سنجی است تا بتوان به آن اطمینان کرد. بدین منظور از آبان‌ماه ۱۳۸۵ تا مهرماه ۱۳۹۱ صحت‌سنجی صورت گرفت. میزان خطای محاسباتی مطابق با رابطه [۱] برای هر چاه پیزومتری در طی ۱۲ دوره تنش محاسبه شده است. در ادامه وضعیت خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی (هیدروژئولوژیک) بررسی گردید.

شاخص استاندارد بارش (IPS)

این شاخص جهت بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی در هر منطقه بر اساس ثبت بارندگی‌های طولانی مدت آن محاسبه می‌شود. رابطه شاخص SPI بصورت زیر می‌باشد:

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص‌های SPI و GRI

مقادیر SPI	مقادیر GRI	طبقات خشکسالی
> ۰	> ۰	بدون خشکسالی
۰ تا ۰/۹۹	۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی ملایم
-۱ تا -۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	-۲ و کمتر	خشکسالی بسیار شدید



شکل ۲- تغییرات شاخص SPI و GRI در مقیاس زمانی سالانه

سپس واکنش مدل نسبت به اعمال هر سناریو ارزیابی و روش‌های مدیریتی جهت تخفیف و کنترل آنها ارائه می‌گردد.

بحث و نتیجه‌گیری

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در واسنجی حالت ماندگار، تراز سطح ایستابی مشاهداتی و محاسباتی تنظیم گردید و پارامترهای ذاتی آبخوان مانند پارامتر هدایت هیدرولیکی، تخلخل مؤثر و رسانایی هیدرولیکی رودخانه بهینه شد. ضریب تعیین بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی ۰/۹۹ محاسبه شده که نشان دهنده دقت نسبتاً قابل قبول نتایج است. همچنین ضریب تعیین بالای ۰/۸ و RMSE کمتر از ۱/۵ بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در اغلب چاه‌های پیرومتری برای دو حالت واسنجی ناپایدار و صحت‌سنجی، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در امر شبیه‌سازی است.

بررسی خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی

با استفاده از دو شاخص SPI و GRI خشکسالی هواشناسی و هیدروژئولوژیکی در مقیاس سالانه بررسی شده است. مطابق شکل (۲) ملاحظه می‌گردد که با وجود شرایط نرمال یا ترسالی در اغلب سال‌ها، خشکسالی‌های هواشناسی با شدت نسبتاً زیاد در سال‌های آبی ۷۸-۱۳۷۷، ۷۹-۱۳۸۷، ۸۷-۱۳۸۶ و ۸۸-۱۳۸۷ بوقوع پیوسته است. شاخص خشکسالی GRI نیز در اغلب سال‌های آبی مذکور و در پایان دوره مورد بررسی در اوج شدت بوده است. در مورد میزان تأخیر وقوع بین دو نوع خشکسالی، می‌توان گفت که بطور

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (2)$$

در این رابطه SPI شاخص استاندارد بارش، x_i مقدار باندگی در سال مورد نظر، $\bar{x}$ میانگین طولانی مدت باندگی سالانه و S انحراف از معیار می‌باشد. طبقات مختلف SPI بر اساس نتایج مک‌کی و همکاران [۳] در جدول (۱) ارائه شده است.

شاخص منبع آب زیرزمینی (IRG)

مندیسینو و همکاران [۴] شاخص GRI را به عنوان شاخص مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی هیدروژئولوژیک برای منطقه مدیریتانه پیشنهاد دادند. مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (3)$$

در این رابطه $D_{y,m}$ ارتفاع سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیرومتری در سال y و ماه m، $\mu_{D,m}$ میانگین ماهانه آنها و $\sigma_{D,m}$ انحراف از معیار این مقادیر در ماه m می‌باشد. طبقات مختلف رطوبتی در شاخص GRI همانند شاخص SPI می‌باشند (جدول ۱).

اعمال سناریوهای مختلف

در این تحقیق با حل معکوس معادله SPI مقادیر بارش برای هر کدام از سناریوهای خشکسالی متوسط و شدید محاسبه و تغذیه متناسب با هر بارش در دوره‌های تنش در مدل اعمال می‌شود.

تشکر و قدر دانی

پژوهش حاضر بخشی از طرح تحقیقاتی صورت گرفته توسط پژوهشکده مناطق بیابانی دانشگاه یزد با عنوان مدیریت بهینه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی در دشت الشتر استان لرستان بوده است. در اینجا از زحمات و همکاری کارکنان اداره تحقیقات و مطالعات شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Ashraf, A and Ahmad Z. 2008. Regional groundwater flow modelling of Upper Chaj Doab of Indus Basin, Pakistan using finite element model (Feflow) and geoinformatics. *Geophys. J. Int*, 173: 17–24.
2. Barani, S. 2010. Simulation of aquifer of the marvast plain using MODFLOW model. master of science Thesis. Yazd university.
3. McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relation of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology. Am. Meteorol. Soc. Boston*, 179–184.
4. Mendicino G, Senatore A and Versace P, 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357: 282-302.
5. Rezaei, M. and Sargazi, A. 2010. The Investigation of effects of artificial recharge on the aquifer of gohar-koh plain. *Journal of earth sciences*. 76:99-106.
6. Taie Semiromi, M. 2010. Groundwater Resources Management using MODFLOW in Garebaygan Plain, Fars Province, Iran. Master of Science Thesis. Tarbiat Modares University. 98pp.
7. Unesi, M. Behbahani, S.M.R. Mohamadi, K. and Unesi, H, 2009. Drought evaluation and its effect on groundwater, case study: Qazvin plain. *International conference on water resources in Shahrood University*.
8. Zharfab Payesh Consulting Engineers Company. 2003. Semi – conceptual studies of groundwater resources in the alashtar plain.
9. Zohrevand, A. karbaschi, A. Babazadeh, H. and Manshori, M. 2009. Modeling of aquifer of the birjand plain using VISUAL MODFLOW. 2th national conference on drought effects and its management strategies.

تقریبی تطابق زمانی یک‌ساله‌ای بین دو خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی در اکثر سال‌های آبی وجود دارد. البته بایستی به این نکته توجه نمود که بهره‌برداری بیش از حد آب زیرزمینی در بعضی سال‌ها، باعث ایجاد تأخیر بین دو نوع خشکسالی شده است که نباید آن را بعنوان تأخیر واقعی در نظر گرفت.

اعمال سناریوهای مدل و تغییرات سطح آب زیرزمینی

بر اساس مشهود بودن طبقات مختلف خشکسالی اقلیمی و هیدرولوژیکی در دوره آماری مورد بررسی و تطابق داشتن آن دو در طی یک سال آبی، مقادیر بارش و تغذیه متناظر با آن مربوط به هریک از سناریوها با استفاده از حل معکوس معادله SPI محاسبه شد، سپس تغییرات سطح ایستابی در مدل برای شرایط خشکسالی متوسط و شدید پیش‌بینی گردید (شکل ۳). همان‌گونه که خطوط تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهند با افزایش شدت خشکسالی، روندی کاهشی در تراز سطح ایستابی نقاط مختلف آبخوان قابل ملاحظه است. با انتخاب بخش شرقی آبخوان این مطلب بهتر به نمایش گذاشته شده است. در این بخش با شدت یافتن خشکسالی، تراز سطح ایستابی ۱۵۷۵ متری به مرز آبخوان نزدیک می‌شود و در صورت تداوم پدیده خشکسالی ممکن است جایگزین خط تراز ۱۵۸۲ متری گردد.

همچنین نتایج حاکی از منفی بودن بیلان آب زیرزمینی برای هر چهار سناریوی خشکسالی نرمال، متوسط، شدید و خیلی شدید است. بنابراین خشکسالی عامل مهمی در کاهش تراز سطح ایستابی و ذخیره آب سفره می‌باشد و در تحقیقات رضایی و سرگزی [۵] و اشرف و احمد [۱] نیز بدان اشاره شده است. البته بایستی به بهره‌برداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی در تشدید اثر پدیده خشکسالی بر روی افت سطح سفره توجه نمود.

کنترل و تعدیل خشکسالی منابع آب زیرزمینی

برای بهبود وضعیت آبخوان در چهار تنش خشکسالی نرمال، متوسط، شدید و خیلی شدید، مدیریت کاهش بهره‌برداری ۳۵ درصدی از منابع آب زیرزمینی در قالب نصب کتورهای هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری و استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری (قطره‌ای و بارانی) پیشنهاد و وارد مدل شد ولی با این وجود، بیلان آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در حالت‌های خشکسالی نرمال، متوسط و شدید مثبت و در حالت خشکسالی خیلی شدید حدوداً ۰/۷ میلیون مترمکعب منفی گردید. بدین ترتیب برای تعدیل و کنترل این تنش علاوه بر روش مدیریتی کاهش مقدار برداشت آب، اجرای طرح تغذیه مصنوعی با رعایت اصول مکانیابی آن در بخش شمال شرقی، شرقی و مرکزی آبخوان پیشنهاد گردید. با انحراف آب مازاد رودخانه کهمان الشتر به مقدار ۷/۵ میلیون متر مکعب به داخل حوضچه‌های نفوذ و اعمال آن در مدل، روند افت در شرایط خشکسالی شدید کنترل و بیلان به مقدار ۱/۱۳ میلیون متر مکعب مثبت گردید.

*Report***Assessing the Impact of Artificial Recharge Design on Regulation Drought**M. Soleimani Motlagh¹, A. Talebi² and H. Malekinezhad³

Recived: 2014.09.26 Accepted: 2014.11.02

Drought and exploitation of groundwater resources are major stresses on the aquifer. Drought and exploitation management is efficient tool for balancing the Aleshtar aquifer. In order to assess groundwater flow MODFLOW model was used. The model response to the scenarios of moderate drought, severe and very severe were measured. The results showed that with increasing drought, water table level and storage are reduced. To control the effects of normal, moderate and severe droughts, exploitation reduction in water use and new irrigation projects were considered. But for the control of very severe drought stress, in addition to using management system, implementation of artificial recharge design is recommended.

Keywords: *Drought, Recharge basin , Management strategies, Alashtar plain*

1. Ph.D. Student in Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Earth Science and Natural Resources, University of Kashan, Iran. Corresponding Author Email: soleimani@grad.kashanu.ac.ir

2. Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Iran.

3. Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Iran.