



## بررسی اثر متقابل آبخوان و رودخانه کارون در دشت گتوند - عقیلی، با استفاده از مدل MODFLOW

• علی موحدیان

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران (نویسنده مسئول)

• منوچهر چیت‌سازان

استاد، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: دی ماه ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: اردیبهشت ماه ۱۳۹۳

Email: ali\_movahedian@yahoo.com

### چکیده

سامانه‌های منابع آب در مناطق نیمه خشک به علت تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های بشری آسیب پذیرتر هستند و براین اساس مدیریت مؤثر این منابع آب مستلزم شناخت روابط متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی در این مناطق می باشد. مدل‌های فراوانی برای شبیه‌سازی این پدیده وجود دارد که هر یک مشکلات و نواقص خاص خود را دارد. هدف این تحقیق شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی دشت گتوند - عقیلی توسط مدل مادفلو، با استفاده از بسته رودخانه می باشد. ابتدا آبخوان در حالت ماندگار شبیه‌سازی گردید. سپس با استفاده از داده‌های سطح ایستابی مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۸۷، آبخوان گتوند - عقیلی در حالت ناماندگار واسنجی شد. در مرحله بعد مدل واسنجی شده در حالت ناماندگار، با استفاده از داده‌های سطح ایستابی مهر ۱۳۸۷ تا شهریور ۱۳۸۸ مورد صحت سنجی قرار گرفت. سپس ارتباط رودخانه کارون با آبخوان در سناریوهای مختلف مدیریتی شامل افزایش و کاهش سطح آب رودخانه در اثر بهره‌برداری از دو سد گتوند، و پیش بینی روابط متقابل آبخوان و رودخانه در دوره‌های خشک و ترسالی توسط بیلان بخشی ۲ مادفلو انجام گردید. به این منظور، رودخانه در محدوده مورد مطالعه به هفت زون تقسیم شد و بیلان آبی در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشانگر زهکش بودن رودخانه در زون‌های شمالی و خصوصاً مرکزی، و تغذیه‌ی آبخوان توسط آن در زون‌های جنوبی بوده و تبادلات بیشتر متأثر از نوسانات تراز رودخانه می باشد.

کلمات کلیدی: بیلان بخشی، ارتباط آبخوان و رودخانه، دشت گتوند - عقیلی، رودخانه کارون، مدل مادفلو.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 111 pp: 9-18

### Analysis of interactions of groundwater and Karun river in Gotvand-Aghili plain using MODFLOW model

By: A. Movahedian, Young researchers and elite club, Islamic Azad University, Ahvaz Branch (Corresponding Author).  
M. Chitsazan, Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz.

In semi-arid regions water resources systems are more vulnerable due to climate change and human activities, and based on this, knowing the basics of interaction between groundwater and surface water is essential for effective management of water resources in these regions. There are several models to simulate this phenomenon, each of which has its own problems and shortcomings. This study aims to simulate groundwater flow in Gotvand - Aghili plain using the River Package of MODFLOW model. First, aquifer was simulated in steady state. Then, using the data of water table from October 2007 to September 2008 the aquifer was calibrated in the unsteady-state. Next, by using the calibrated model in unsteady-state and data of water table from October 2008 to September 2009, the model was verified. After that, the interactions between aquifer and Karun River in different scenarios including the impacted of two dams Gotvand and predicting the interaction of aquifer and the river during the dry and wet periods was investigated by zone budget method in modflow. Afterward, the Karun river reach in the study area was divided into seven zones and water balance was assessed in each of them. Results indicate that the river is draining the aquifer in the northern and especially central parts of the plain and recharging it in the southern zones. Aquifer - river exchanges are mostly affected by the river water level fluctuations.

Keywords: Zone Budget, Aquifer-River Interaction, Gotvand-Aghili Plain, Karun River, MODFLOW Model.

موردی بازگشته است. در این رابطه از مدل‌های رایج آب زیرزمینی مانند MODFLOW، تکنیک‌های جدیدتر تحلیل اجزا و همچنین روش‌های Link-Node استفاده می‌شود که تمام این روش‌ها، تنها به بررسی جریان آب می‌پردازد. اگرچه این روش‌های مدل‌سازی می‌توانند روابط پیچیده هیدرولیکی محیط اشباع را شبیه‌سازی کنند، ولی کمتر قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای منطقه غیر اشباع هستند. از آنجا که این مورد در پاسخ‌های اکولوژی محیط به خصوص در رابطه با رشد گیاهان سبزی، هوازدگی و آزادسازی مواد آلی و معدنی بسیار مهم است، Bradley و Gilvear (۲۰۰۰) منطقه غیر اشباع را در تالاب‌های یک دشت سیلابی در انگلستان مدل‌سازی کردند. مدل دیگری به نام FEUWAT توسط Dall و همکاران (۲۰۰۱) در تالاب‌های شمال آلمان برای بررسی آلودگی‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. در حال حاضر بسیاری از مدل‌های روابط آب‌سطحی - آب‌زیرزمینی مانند ModBranch، the Wetland Modflow module، Daflow-Modflow بر اساس ارتباط بین مدل‌های آب‌سطحی و مدل آب‌زیرزمینی Modflow می‌باشند (عبداللهی پورحقیقی و پیری، ۱۳۸۸). مطالعات مدل‌سازی در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۴۸ توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) صورت گرفت. در پی این اقدام اولین آبخوانی که با استفاده از مدل ریاضی شبیه‌سازی شد، آبخوان دشت ورامین در جنوب شرقی تهران و توسط N.A.DeRidder بوده است (عطارزاده، ۱۳۶۰). توسلی و چیت‌سازان (۱۳۷۷) با

#### مقدمه

استفاده از مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی به علت دقت قابل قبول به سرعت در حال گسترش می‌باشد. هدف از مدل ریاضی یک آبخوان آب زیرزمینی، شبیه‌سازی شرایط طبیعی یک آبخوان با استفاده از روابط ریاضی است. در صورتی که شبیه‌سازی یک آبخوان با موفقیت صورت گیرد می‌توان با دقت مناسبی در مباحث مدیریتی از آن بهره گرفت. آگاهی و درک ارتباط بین آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی باعث افزایش قابلیت مدل‌های تفهیمی و ریاضی و بازسازی صحیح رابطه متقابل و پیچیده منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی می‌شود. مدل‌سازی روابط آب سطحی - زیرزمینی بیش از ۳۰ سال است که یکی از زمینه‌های تحقیقاتی فعال بوده است و به خصوص در سال‌های اخیر مورد توجه دوباره‌ای قرار گرفته است. نخستین مطالعات توسط Winter (۱۹۷۶ و ۱۹۷۸ و ۱۹۸۳) انجام گرفت. روابط آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط محققین متعددی مورد بحث قرار گرفته است. برای مثال تفاوت‌های زمانی پدیده انتشار آب‌های زیرزمینی و سطحی توسط Nemeth (۱۹۹۲)، Bredehoeft و Konikow (۲۰۰۳)، Solo-Gabriele و (۲۰۰۳)، تفاوت مقیاس مکانی بین سیمای‌های آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی توسط Haitjema (۲۰۰۱)، Kennedy (۲۰۰۸)، بیان ریاضی مکانیسم رابطه آب‌های زیرزمینی و سطحی توسط Tomlinson و Rushton (۱۹۷۹)، Rushton (۲۰۰۷) مورد بحث قرار گرفته است. در سال‌های اخیر توجه مدل‌سازی به روابط آب سطحی - زیرزمینی دوباره به سمت مطالعات

استفاده از مدل عناصر محدود آبخوان دشت مهبیار از توابع شهرضا

در استان اصفهان را شبیه‌سازی نمودند. سپس با استفاده از مدل ساخته شده، شیوه‌های مختلف بهره‌برداری تلفیقی از آب زیرزمینی و آب انتقالی از زاینده رود به دشت مهبیار را مورد بررسی قرار دادند. کاظمی (۱۳۸۱) با استفاده از مدل MODFLOW2000 آبخوان دشت قوچان- شیروان را با هدف ارزیابی هیدروژئولوژیکی و مدیریتی مورد بررسی قرار داد. احمدی افزادی و چیت‌سازان (۱۳۸۱) از مدل تفاضلات محدود VisualModflow برای مدیریت منابع آب دشت کرمان استفاده کردند. احمدی و چیت‌سازان (۱۳۸۸) با استفاده از VisualModflow به ارزیابی شرایط مرزی خارجی حاصل از شبیه‌سازی جریان برای حالت پایدار و ناپایدار در دشت ایزه پرداختند. در منطقه مطالعاتی گتوند- عقیلی، مظفری (۱۳۸۵) آبخوان دشت گتوند را با استفاده از مدل تفاضلات محدود شبیه‌سازی کرد. نجاتی‌چهرمی (۱۳۸۸) نیز با استفاده از مدل تفاضلات محدود GMS ۴ شبیه‌سازی آبخوان دشت عقیلی را انجام داد. این تحقیق شبیه‌سازی همزمان دو آبخوان و روابط آن با رودخانه کارون را بررسی می‌کند. هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی یکپارچه سامانه هیدروژئولوژیکی دشت گتوند- عقیلی و رودخانه کارون با استفاده از کد MODFLOW2000 در نرم‌افزار GMS می‌باشد. در این فرایند از بسته رودخانه بهره گرفته شد و روابط آب‌های زیرزمینی و رودخانه کارون در این سامانه بررسی گردید. تهیه بیان و بررسی اثرات سناریوهای مختلف مدیریتی بر تبادل آب‌های زیرزمینی و رودخانه کارون از اهداف دیگر این تحقیق است. مفاهیم پایه و معادلات اساسی روابط متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی تبادل آب زیرزمینی و آب سطحی در مقیاس وسیع از طریق نحوه توزیع شیب هیدرولیکی در آبراه‌ها و رسوبات دشت آبرفتی اطراف آن، همچنین تفاوت بین سطح آب در آبراه به سطح ایستابی تعدیل شده و شکل و موقعیت آبراه در دشت آبرفتی کنترل می‌شود. همچنین تبادل آب در سیستم، به بار و هدایت هیدرولیکی رسوبات وابسته است (عبداللهی‌پورحقیقی و پیری، ۱۳۸۸). مدل‌های فراوانی برای شبیه‌سازی این ارتباط وجود دارند که هرکدام دارای ایرادهای خاص خود می‌باشد و به علت پیچیدگی این پدیده، هنوز مدل کاملی ارائه نشده است. معمولاً در معادلات روابط آب سطحی- زیرزمینی، تبادل میان دو سیستم به میزان هدایت هیدرولیکی (ضریب نشت از بستر رودخانه) با اختلاف بار هیدرولیکی مربوط به آن-ها مرتبط گردد. بر این اساس معادلات اساسی اندرکنش به فرم روابط ۱ و ۲ ارائه می‌گردد (نون کرسیک، ۱۳۸۱):

$$QRIV = CRIV \times (HRIV - h_{i,j,k}) : h_{i,j,k} > RBOT \quad (1)$$

$$QRIV = CRIV \times (HRIV - RBOT) : h_{i,j,k} \leq RBOT \quad (2)$$

واژه رسانایی رودخانه (CRIV) در روابط فوق براساس معادله شماره ۳ بیان می‌شود. در این رابطه K ضریب هدایت هیدرولیکی، W و L به ترتیب عرض و طول ناحیه تماس و M ضخامت بستر می‌باشد.  $CRIV = K.L.W/M$  (۳)

QRIV = جریان تبادلی بین رودخانه و آبخوان

CRIV = هدایت پذیری (رسانایی رودخانه)

$H_{i,j,k}$  = هد هیدرولیکی در گره متناظر سلول زیرین در آبخوان

HRIV = هد هیدرولیکی رودخانه

معادلات فوق که از معادلات اساسی اندرکنش محسوب می‌گردند، براساس این فرض بنا نهاده شده‌اند که شرایط جریان در رودخانه در طول دوره تنش تغییرات اساسی و مهمی ندارد. به عنوان نمونه رودخانه به حالت‌های حدی کاملاً خشک یا کاملاً طغیانی به نحوی که از کناره‌ها سرریز نماید، نخواهد رسید. بسته‌های متعددی در مورد جریان رودخانه با استفاده از مدل MODFLOW تهیه شده است. در تمام این بسته‌ها، جریان از رودخانه به آبخوان بسته به ارتباط هیدرولیکی یا عدم ارتباط هیدرولیکی سیستم، بطور متفاوت محاسبه می‌شود. از لحاظ معادلات مفهومی مدل MODFLOW، ارتباط هیدرولیکی بین رودخانه و آبخوان زمانی برقرار می‌باشد که سطح ایستابی بالاتر از ارتفاع قاعده رسوبات بستر رودخانه باشد. معادله دیفرانسیل جزئی سه بعدی جریان آب‌های زیرزمینی در حالت ناماندگار در یک محیط متخلخل ناهمگن و ایزوتروپ در آبخوان آزاد یا تحت فشار که تحت تأثیر رابطه متقابل آب‌های سطحی، تخلیه و تغذیه قرار دارد به صورت زیر بیان می‌شود (نون کرسیک، ۱۳۸۱):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

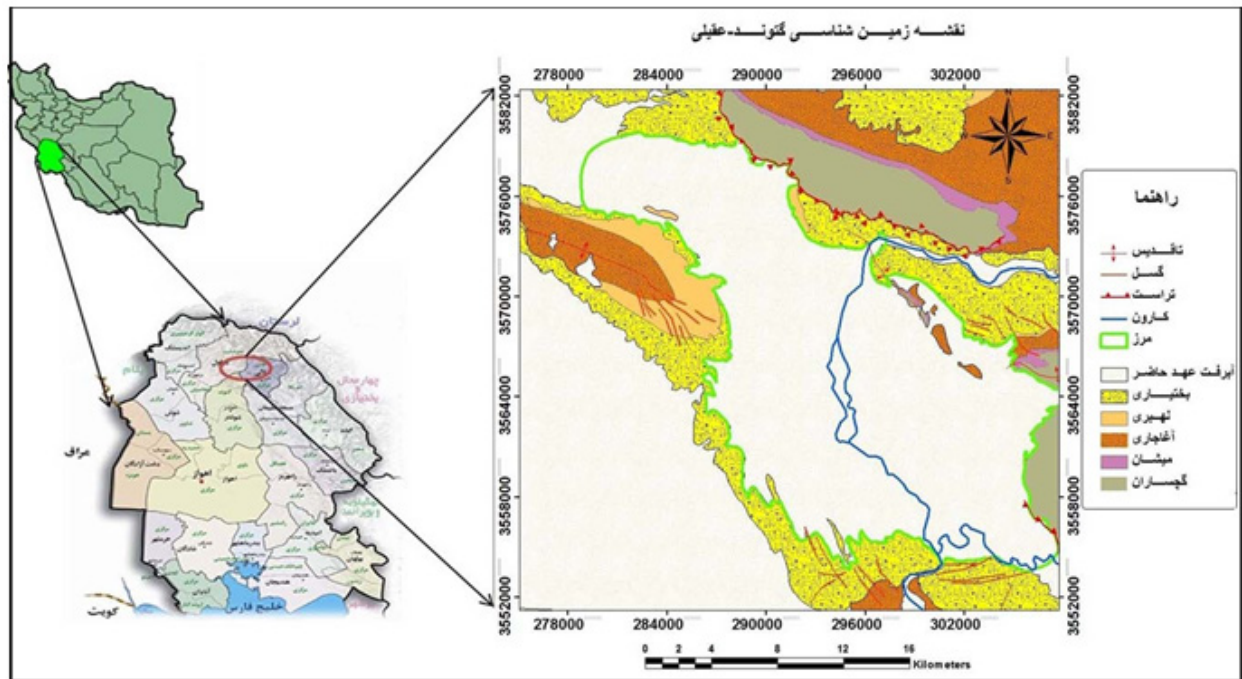
که در آن  $K_{xx}$ ،  $K_{yy}$  و  $K_{zz}$  به ترتیب هدایت هیدرولیکی در امتداد X، Y و Z می‌باشند. h بار هیدرولیکی، W شار حجمی بر حجم واحد،  $S_s$  ضریب ذخیره ویژه محیط متخلخل و t زمان می‌باشد. رابطه متقابل آب‌های زیرزمینی دشت گتوند-عقیلی و رودخانه کارون از طریق معادله (۱) تا (۴) و مشخص کردن بار هیدرولیکی در مرزهای آبخوان، بار هیدرولیکی اولیه و سطح آب رودخانه شبیه‌سازی می‌شود. پس از اجرای مدل MODFLOW با استفاده از نرم‌افزار GMS، سناریوهای مدیریتی مختلف اجرا و تأثیر آن‌ها بر ارتباط آبخوان و رودخانه تحلیل گردید.

### مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی گتوند - عقیلی با مساحتی در حدود ۳۴۲ کیلومترمربع و در شمال استان خوزستان و شهرستان شوشتر بین عرض‌های جغرافیایی ۰۷ دقیقه و ۲۲ درجه و ۲۴ دقیقه و ۳۲ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۳۸ دقیقه و ۴۸ درجه و ۰۰ دقیقه و ۴۹ درجه شرقی با ارتفاع متوسط ۸۴ متر از سطح دریا در دامنه‌های غربی رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است. این دشت بر اساس تقسیمات زمین شناسی در زاگرس چین‌خورده قرار می‌گیرد (آقانیاتی، ۱۳۸۵). رودخانه کارون از میان اراضی این دشت عبور نموده و اراضی گتوند در قسمت غربی و عقیلی در قسمت شرق آن واقع شده‌اند. این دشت توسط سازندهای گچساران، میشان، بختیاری، آماجاری و بخش لهری احاطه گردیده است (شکل ۱).

ایستگاه ۴۰۶/۷ میلیمتر می‌باشد. پربارش‌ترین ماه سال دی ماه با بارش متوسط ۹۷/۱ میلیمتر و کم بارش‌ترین ماه‌های سال تیر، مرداد و شهریور با صفر میلیمتر بارندگی می‌باشند. این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک است (سازمان آب و برق خوزستان، ۱۳۸۹).

توالی چینه‌بندی در تراس‌ها و پرتگاه‌ها، شمال منطقه را در بر گرفته و رودخانه کارون از میان آنها عبور کرده و به دشت گتوند وارد می‌گردد. میانگین بارش سالانه طی دوره آماری مورد نظر در این



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

و با استناد به آمار و اطلاعات موجود، واسنجی مدل در دوره زمانی مهر ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۸۷ به مدت ۳۶۵ روز با ۱۲ استرس پی‌ریود، با استفاده از MODFLOW2000 در نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی گردید. صحت سنجی آن نیز در یک دوره تنش ۱۲ ماهه از مهر ۱۳۸۷ تا شهریور ۱۳۸۸ انجام شد. پس از انتهای دوره صحت سنجی، به دلیل تصحیح پارامترهای بیلان و محاسبه سلول به سلول عوامل آن، محاسبه بیلان مدل توسط بسته Budget صورت گرفت.

### روابط متقابل آبخوان و رودخانه

جهت بررسی دقیق روابط متقابل آبخوان دشت گتوند-عقیلی و رودخانه کارون، با بهره‌گیری از مدل تهیه شده، از بسته رودخانه (River boundary package) استفاده گردید. برای این بررسی با استفاده از بسته (Zone budget)، رودخانه کارون بصورت زون‌هایی تقسیم‌بندی گردید. این بسته، بیلان آبی در زون‌های کوچکتری از منطقه را محاسبه می‌کند. جهت مشخص کردن عملکرد سیستم و جریان ورودی از رودخانه کارون به آبخوان گتوند-عقیلی و جریان خروجی از آبخوان، رودخانه به هفت زون تقسیم گردید (شکل ۴). پس از تعریف پارامترهای مورد

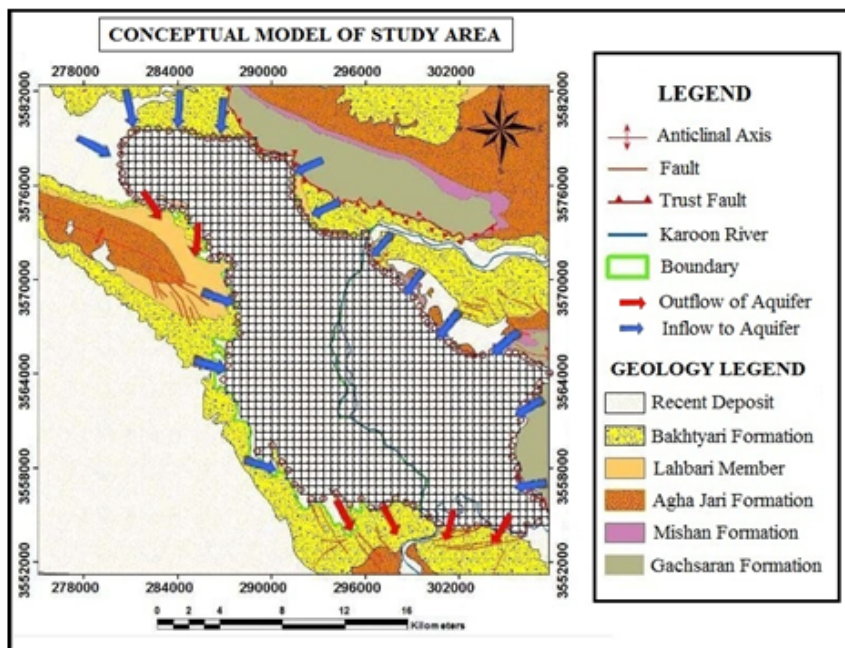
ابتدا ایجاد و ذخیره‌سازی داده‌ها در محیط GIS و با توجه به ساختاری مناسب و قابل تبادل با کد شبیه‌ساز (MODFLOW-۲۰۰۰) تهیه شد و نهایتاً بررسی وضعیت کلی موجود، تخمین و بهینه‌سازی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان و تهیه مدل کمی آبخوان با استفاده از نرم‌افزار GMS انجام گردید. به منظور مشخص کردن تبادلات میان رودخانه و آبخوان آبرفتی، اطلاعات رودخانه کارون در محدوده مورد نظر شامل تراز سطح آب رودخانه و ارتفاع بستر آن در ایستگاه‌های اشل منطقه، از سازمان آب و برق خوزستان تهیه، و در نقاط مورد نظر وارد مدل گردید.

### طراحی مدل

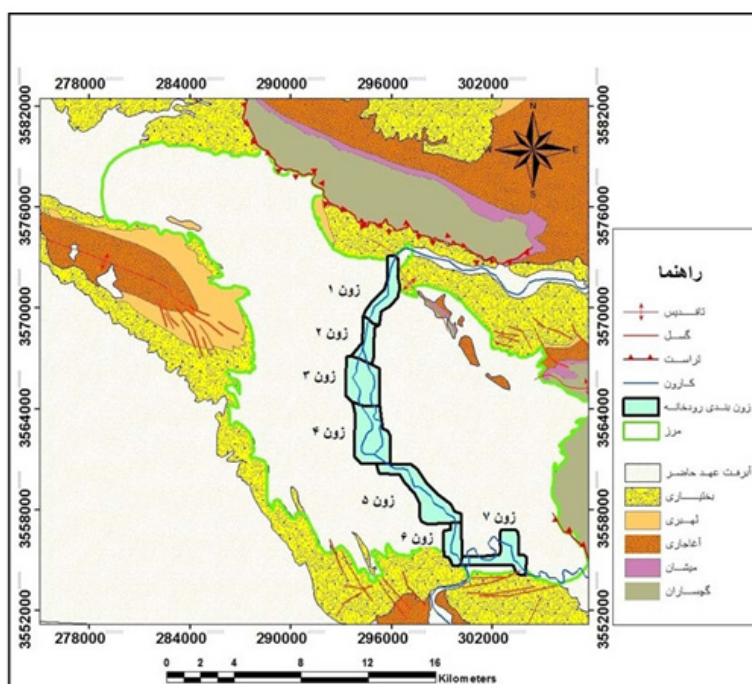
با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی، مدل مفهومی آبخوان دشت گتوند-عقیلی طراحی شد (شکل ۲). پس از تهیه مدل مفهومی، محدوده مورد نظر به ۶۴ ستون و ۵۸ ردیف از نوع مرکز بلوکی با طول و عرض ۵۰۰ متر شبکه بندی گردید. مرزهای ورودی مدل شامل بخش‌های شمال، شمال غربی- شرقی، غرب و شرق، و مرزهای خروجی بخش‌های مرکزی و جنوب دشت می باشد. با توجه به هیدروگراف واحد دشت



نیاز برای مدل، میزان تبادل آبی رودخانه و آبخوان در هریک از مناطق هفتگانه بیان محاسبه شد و مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲- مدل مفهومی آب‌های زیرزمینی دشت گتوند- عقیلی، همراه با شبکه‌بندی و شرایط مرزی



شکل ۴- منطقه‌بندی بیان برای مشخص کردن میزان تبادل رودخانه و آبخوان

سهم نفوذ (۵۹٪)، جریان ورودی مرزی (۳۸٪) و ورودی از رودخانه (۳٪) از جریان‌های ورودی در منطقه را تشکیل می‌دهند. از بین عوامل خروجی، جریان‌های خروجی مرزی (۵۶٪)، تبخیر (۲۴٪)، خروجی از رودخانه و تخلیه توسط چاه‌ها نیز هر کدام (۱۰٪) در بیلان منطقه سهم دارند. جدول (۲) بیلان آبی مدل مربوط به مناطق هفتگانه‌ی رودخانه را در سال آبی ۸۶-۸۷ نشان می‌دهد. با ترسیم مقادیر بیلان ورودی و خروجی در هریک از زون‌های هفتگانه بصورت سری زمانی، مناطق تغذیه یا تخلیه این سیستم در استرس‌سازهای مختلف مشخص گردید (شکل ۵). همچنین با استفاده از این نمودار می‌توان مناطق حساس و آسیب‌پذیر آبخوان و رودخانه را پیش‌بینی کرد.

جدول ۲- بیلان بخشی حجمی مربوط به زون‌های ۱ تا ۷ رودخانه در سال آبی ۸۶-۸۷

بیلان مربوط به هر زون ( مترمکعب *10 <sup>3</sup> )			
زون	ورودی (رودخانه به آبخوان)	خروجی (آبخوان به رودخانه)	حجم تبادل
۱	۲۸۷/۷۶	۱۱۳۵/۱۳	-۸۴۷/۳۷
۲	۶۴/۲۰	۲۵۴۰/۸۵	-۲۴۷۶/۶۵
۳	۱۶۲/۶۸	۷۳۰۳/۱۹	-۷۱۴۰/۵۲
۴	۹۸/۴۳	۱۱۵۴/۴۷	-۱۰۵۶/۰۴
۵	۲۶۵۸/۹۸	.	۲۶۵۸/۹۸
۶	۶/۷۸	۱۸۰/۹۴	-۱۷۴/۱۶
۷	۵۴۷/۱۳	۳/۵۸	۵۴۳/۵۴

هر یک از خطوط در شکل (۵) مربوط به یک استرس‌ساز پی‌ریز در مدل است که به ترتیب از ۱ تا ۱۲، ماه‌های سال مدل را نشان می‌دهند. جهت مقایسه نسبی بین مقادیر ورودی و خروجی، این مقادیر با یکدیگر آورده شده است. مقادیر ورودی با نام In و خروجی‌ها با نام Out به همراه شماره زون آورده شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، بیشترین خروجی آبخوان به رودخانه در زون‌های مرکزی دشت خصوصاً در زون شماره ۳ برابر ۷۱۴۰/۵۲ هزار مترمکعب در سال می‌باشد. این روند برای زون‌های اطراف (۲، ۱ و ۴) نیز با شدت کمتر قابل مشاهده است. همچنین بیشترین تغذیه آبخوان توسط رودخانه، در زون ۵ دیده می‌شود. که این نتایج با نقشه‌های هم‌تراز سطح ایستابی مطابقت دارد. با ترسیم مقادیر خروجی و ورودی با یکدیگر، و مقایسه آنها، می‌توان به زهکش بودن رودخانه کارون در بیشتر نواحی پی برد. در قسمت ورودی‌ها به آبخوان نیز همانطور که دیده می‌شود، زون ۵ در جنوب دشت بیلان مثبت داشته و موجب تغذیه آبخوان می‌گردد.

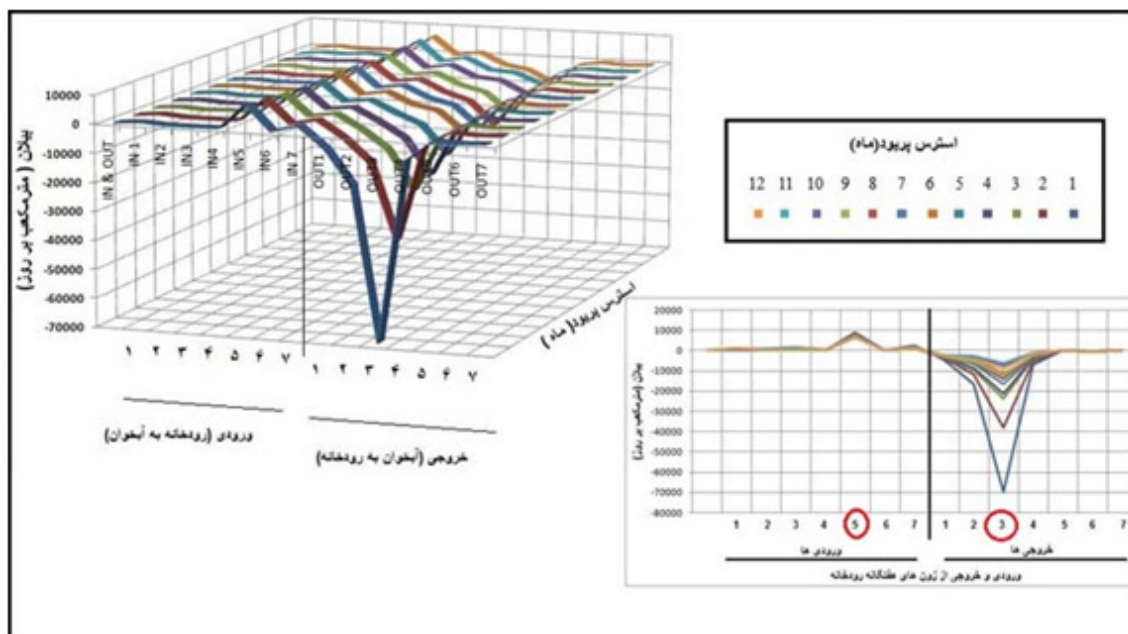
به علت نیاز روز افزون به استفاده از منابع زیر زمینی و روند رو به رشد افزایش حفر چاه به همراه وقوع پدیده خشکسالی و یا ترسالی، پیش‌بینی روابط متقابل آب‌های زیرزمینی با رودخانه‌ها باید در سناریوهای مختلف مدیریتی از جمله استفاده توأم آب‌های سطحی و زیرزمینی مدنظر قرار گیرد. با توجه به این موضوع، روابط متقابل آب‌های زیرزمینی دشت گتوند- عقیلی و رودخانه کارون تحت سه سناریو شامل افزایش سطح آب رودخانه بر اثر سیلاب و رهاسازی آب ناشی از تنظیم دو سد گتوند (علیا و تنظیمی)، کاهش سطح آب رودخانه بر اثر عملکرد و تنظیم سد و شرایط ترسالی پیش‌بینی گردید که مورد بررسی و مقایسه با نتایج سال مدل (۸۶-۸۷) قرار گرفت.

### نتایج و بحث

روابط بین سیستم آبخوان آبرفتی و رودخانه تحت تأثیر توزیع مکانی هیدروفاسیس‌ها واقع در مرز رودخانه و آبخوان زیرین می‌باشد (Woessner, 2000). در مطالعات مدل‌سازی روابط رودخانه-آبخوان، تأثیرات منطقه‌ای مدیریت منابع آب و استفاده‌های توأم از منابع آب باید مدنظر قرار گیرد (Reichard, 1995, Onta, 1991, Wang, 1995). ضخامت میانگین منطقه‌ای رسوبات بستر رودخانه و هدایت‌های هیدرولیکی مورد استفاده در مدل-های بزرگ مقیاس بر روابط رودخانه آبخوان تأثیر می‌گذارند (Anderson و Woessner (1992)). بررسی‌های اولیه نقشه‌های هم‌تراز آب زیرزمینی حاکی از جهت جریان آب زیرزمینی از آبخوان به رودخانه در بیشتر مناطق دشت می‌باشد. اما بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد که از نظر مکانی و زمانی رابطه رودخانه و آبخوان بستگی زیادی به سطح آب در رودخانه و سلول‌های مجاور دارد، به گونه‌ای که تغییر در هر یک از آنها جهت جریان را تغییر می‌دهد. براساس نتایج بدست آمده از مدل ساخته شده، بیلان آب زیرزمینی در سال تهیه مدل تغییرات منفی حجم مخزن در حدود ۱۷ میلیون متر مکعب را نشان می‌دهد (جدول ۱).

جدول ۱- اجزا و مقادیر بیلان دشت گتوند- عقیلی

بیلان حجمی مدل (میلیون متر مکعب)		
اجزاء بیلان	ورودی	خروجی
رودخانه	۲/۰۲	۸/۶۱
چاه‌ها	۰	۷/۹۰
تبخیر	۰	۲۰/۵۳
تغذیه	۳۹/۷۹	۰
جریان‌های زیرزمینی	۲۵/۶۳	۴۷/۵۹
مجموع	۶۷/۴۵	۸۴/۶۵
ورودی - خروجی	-۱۷/۲۰	



شکل ۵- سری زمانی مقادیر ورودی- خروجی برای مناطق بیلان هفتگانه

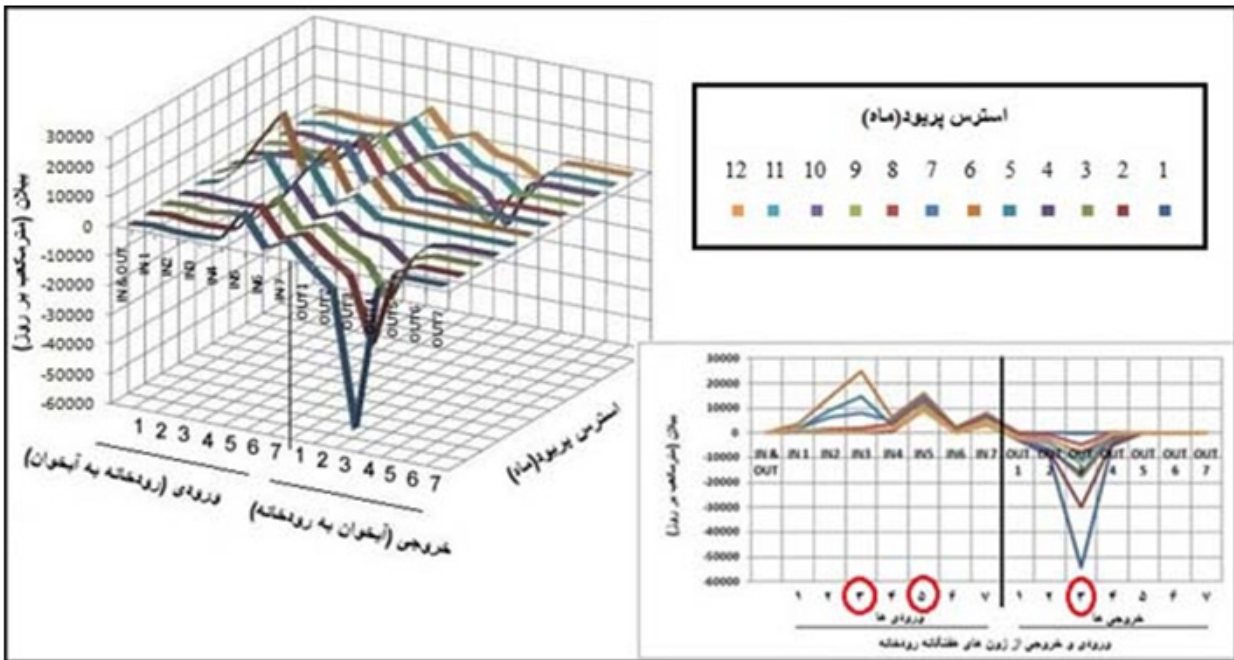
بیشترین محل تخلیه به رودخانه در دشت می‌باشد. این سناریو نشان می‌دهد ارتباط آبخوان و رودخانه بطور قابل توجهی با تغییرات بار هیدرولیکی میان رودخانه و آبخوان مرتبط است و با افزایش تراز آب رودخانه، جهت جریان کاملاً و یا در بعضی ماه‌ها تغییر می‌کند.

جدول ۳- پیش بینی بیلان بخشی حجمی مدل بر اثر افزایش سطح آب رودخانه

زون	بیلان مربوط به هر زون (مترمکعب $10^3$ * )	
	ورودی (رودخانه به آبخوان)	خروجی (آبخوان به رودخانه)
۱	۴۹۶/۴۴	۵۵۵/۲۰
۲	۹۶۲/۱۴	۱۳۲۹/۸۸
۳	۱۵۷۲/۵۶	۷۹۲۹/۱۷
۴	۸۰۵/۸۳	۴۴۰/۵۱
۵	۴۱۶۰/۲۸	۰
۶	۳۳۳/۳۶	۱۳/۰۹
۷	۱۷۴۳/۹۹	۰

### سناریو افزایش سطح آب رودخانه بر اثر سیلاب و رهاسازی آب ناشی از تنظیم سد گتوند

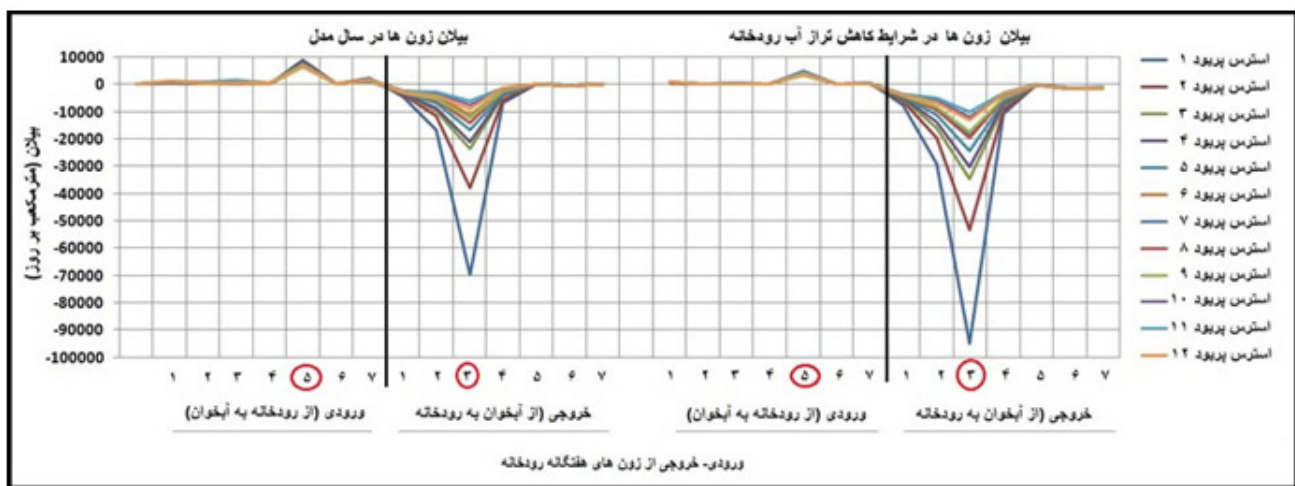
سطح آب رودخانه کارون طی سال‌های گذشته با احداث سد در بالادست متحمل تنش‌های مختلفی شده است. یکی از این تنش‌ها رهاسازی آب از سد جهت تنظیم حجم مخزن در زمان‌های سیلابی می‌باشد. در اثر این تنش سطح آب رودخانه بالا آمده و موجب تغییر در تبادلات آن با آبخوان می‌شود. مدل‌سازی ابزار مناسبی برای پیش‌بینی و میزان اثر این تنش‌ها می‌باشد. برای پیش‌بینی برهمکنش آبخوان و رودخانه در اثر افزایش سطح آب رودخانه، با استفاده از آمار تراز سطح آب رودخانه طی سال‌های آماری ۸۲ تا ۹۰، حداکثر تراز مربوط به سال آبی ۸۵-۸۴ در مدل استفاده شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). در این جدول مشاهده می‌شود که با افزایش تراز رودخانه، بیلان منفی مناطق تخلیه‌ای کمتر و بیلان مناطق تغذیه‌ای نیز مثبت‌تر شده است، که این ناشی از تغییر گرادیان هیدرولیکی بر اثر افزایش تراز آب رودخانه بوده است. چنانچه شکل (۶) نشان می‌دهد در اثر بالا آمدن سطح آب رودخانه، علاوه بر افزایش نقش تغذیه‌ای رودخانه در زون ۵ و ۷، زون ۴ و ۶ که نقش تخلیه‌ای داشتند نیز موجب تغذیه‌ی آبخوان شدند. زون‌های ۱، ۲ و ۳ نیز که زهکش بودند، در ماه‌هایی که سطح آب به حداکثر مقادیر رسید (استرس‌پریردهای ۵، ۶ و ۷)، نقش تغذیه‌کننده پیدا کردند. چنانچه مشاهده می‌شود زون ۳ در بهمن ماه (استرس‌پریرود ۵) حداکثر مقادیر تغذیه را به خود اختصاص داده است، اما همچنان



شکل ۶- سری زمانی مقادیر ورودی- خروجی برای مناطق بیلان هفتگانه در اثر افزایش سطح رودخانه

شیب هیدرولیکی جریان از آبخوان به رودخانه می‌باشد (جدول ۴). به دلیل تشابه رفتاری کاملاً یکسان زون‌ها با سال مدل، در اثر این سناریو و سناریوی بعدی، به ترسیم سری زمانی مقایسه‌ای بصورت دوعده‌ای بسنده شد (شکل ۷). چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود در اثر کاهش تراز رودخانه رفتار زون‌های ورودی و خروجی تغییری نداشته، فقط میزان حجم ورودی و خروجی افزایش یافته است.

سناریو کاهش سطح آب رودخانه در اثر ذخیره و تنظیم در مخزن سد گتوند از دیگر تنش‌های وارده به رودخانه در اثر احداث سد، کاهش تراز آب رودخانه جهت تنظیم مخزن و ذخیره‌سازی آب می‌باشد. به منظور پیش‌بینی ارتباط آبخوان و رودخانه در شرایط کاهش تراز رودخانه، از آمار سطح آب کارون در سال‌های ۸۲-۹۰ استفاده گردید. نتایج بیلان هفت زون رودخانه نشانگر افزایش تخلیه از آبخوان، بدلیل افزایش



شکل ۷- سری زمانی مقادیر ورودی- خروجی برای مناطق بیلان هفتگانه بر اثر کاهش سطح رودخانه



جدول ۴- پیش‌بینی بیلان بخشی حجمی مدل بر اثر کاهش سطح آب رودخانه

بیلان مربوط به هر زون (مترمکعب $10^3$ * )			
زون	ورودی (رودخانه به آبخوان)	خروجی (آبخوان به رودخانه)	حجم تبادل
۱	۲۳۵/۹۸	۱۷۳۵/۷۹	-۱۴۹۹/۸۱
۲	۱۱/۶۷	۴۲۷۷/۲۰	-۴۲۶۵/۵۲
۳	۶۵/۴۳	۱۰۴۶۲/۷۹	-۱۰۳۹۷/۳۵
۴	۱/۲۱	۲۲۱۷/۸۰	-۲۲۱۶/۵۸
۵	۱۴۶۹/۵۲	۳۶/۶۰	۱۴۳۲/۹۱
۶	۰	۵۷۷/۲۶	-۵۷۷/۲۶
۷	۷۲/۴۹	۵۰۸/۰۵	-۴۳۵/۵۶

جدول ۵- پیش‌بینی بیلان بخشی حجمی مدل در دوره ترسالی

بیلان مربوط به هر زون (مترمکعب $10^3$ * )			
زون	ورودی (رودخانه به آبخوان)	خروجی (آبخوان به رودخانه)	حجم تبادل
۱	۲۸۲/۳۰	۱۲۱۰/۰۲	-۹۲۷/۷۱
۲	۳۹/۰۳	۲۷۶۱/۸۲	-۲۷۲۲/۷۸
۳	۱۲۶/۰۸	۷۵۹۰/۲۹	-۷۴۶۴/۲۱
۴	۸۶/۲۷	۱۱۹۳/۷۴	-۱۱۰۷/۴۷
۵	۲۶۲۰/۷۵	۰	۲۶۲۰/۷۵
۶	۶/۱۴	۱۸۴/۹۴	-۱۷۸/۸۰
۷	۵۱۵/۴۲	۵۱۰۰۲	۵۱۰/۴۲

### نتیجه‌گیری

درصد نتایج بیلان در سال مدل (جدول ۱) نشان می‌دهد که نفوذ بیشترین سهم (۵۹٪) را در بیلان منطقه دارد. پس از آن جریان ورودی از مرز (۳۸٪) و در نهایت ورودی از رودخانه (۳٪) جریان‌های ورودی را تشکیل می‌دهند. از بین عوامل خروجی، جریان‌های خروجی مرزی بیشترین سهم (۵۶٪) را دارد. پس از آن تبخیر با (۲۴٪) که بیشتر در نواحی شرقی رودخانه رخ می‌دهد. خروجی از رودخانه و تخلیه توسط چاه‌ها هر کدام (۱۰٪) در جریان‌های خروجی از آبخوان سهم دارند. سهم کمتر رودخانه نسبت به دیگر عوامل در بیلان منطقه با توجه به خشکسالی‌های اخیر، همچنین وجود سدهای مختلف در بالادست، بخصوص سدتنظیمی گتوند و گتوند علیا و در نتیجه کاهش سطح آب رودخانه می‌باشد. نتایج مدل تهیه شده و بررسی بیلان رودخانه در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که رودخانه کارون در نواحی شمالی و بخصوص مرکزی دشت گتوند- عقیلی موجب تخلیه آبخوان می‌شود. در حالی که در نواحی جنوبی و بخش‌های جنوب شرقی دشت، باعث تغذیه آبخوان می‌گردد. طبق این تحقیق زون‌های ۱ تا ۴ و ۶ رودخانه را زهکش و زون‌های ۵ و ۷ آن را تغذیه می‌کنند. در اثر سناریوهای مختلف، وابستگی تبدلات این سیستم به بار هیدرولیکی رودخانه و آبخوان دیده شد. بیشترین اثرگذاری با تداوم سیلاب و افزایش تراز آب رودخانه مشاهده گردید. در این حالت زون‌های مشخص شده در مرکز و شمال دشت (خصوصاً زون ۳) که نقش تخلیه‌ای داشتند، در ماه‌های پربارش عملکرد متفاوت داشته و حتی باعث تغذیه آبخوان می‌شوند. در شرایط کاهش تراز رودخانه نیز، تمامی زون‌ها بجز زون ۵ موجب تخلیه می‌شوند. در این حالت فقط بیلان زون ۵ مثبت بوده است. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر سازه‌های آبی مختلف همچون سدهای گتوند بر تبادل جریان میان آبخوان دشت گتوند- عقیلی و رودخانه کارون، بیش از عوامل اقلیمی می‌باشد. عوامل انسانی با تنش‌های آبی سریع‌تر از عوامل اقلیمی بر روی سیستم طبیعی آبخوان-

### سناریو افزایش تغذیه آبخوان بر اثر ترسالی و تأثیر آن بر تبادل رودخانه و آبخوان

برای بررسی وضعیت آبخوان در شرایط ترسالی، مدل دشت گتوند - عقیلی با توجه به مقدار بیشینه بارندگی سالانه در دوره ۳۸ ساله ۱۳۸۸-۱۳۵۰ (برابر ۸۵۴ میلی‌متر در سال آبی ۱۳۵۵-۱۳۵۴) اجرا گردید. نتیجه بیلان بخشی مدل در اثر اعمال این سناریو در جدول (۵) نشان داده شده است. ترسیم مقایسه‌ای سری زمانی برای سناریوی ترسالی با سال مدل، نمودار یکسانی را نشان می‌دهد، که جهت جلوگیری از تکرار، از رسم آن خودداری شد. هرچند که دو حالت حجم‌های تبدلاتی متفاوتی دارند، اما رفتار و شکل‌های مشابهی را ارائه دادند. با این حال اختلاف مقادیر ورودی و خروجی در جداول بیلان آن دو حالت قابل ردیابی است (جداول ۲ و ۵). مقایسه جدول (۲) و (۵) نشان می‌دهد که بر اثر ترسالی و افزایش سطح آب زیرزمینی، تخلیه از زون‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۶ بیشتر شده، و تغذیه آبخوان از رودخانه در زون‌های ۵ و ۷ کاهش پیدا کرده است. بطور کلی با وقوع ترسالی و افزایش تراز سطح آبخوان، در زون‌های تخلیه‌ای گرادیان هیدرولیکی بین آبخوان و رودخانه به سمت رودخانه افزایش یافته که موجب منفی‌تر شدن بیلان و می‌شود. در زون‌های تغذیه‌ای گرادیان هیدرولیکی بین آبخوان و رودخانه به سمت آبخوان کاهش می‌یابد، که موجب کاهش تغذیه از رودخانه و کاهش بیلان می‌گردد. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) کاهش جریان خروجی از رودخانه با افزایش سطح آب و تغییر نقش آن به تغذیه‌ای آبخوان بخوبی مشاهده می‌شود. که بیانگر حساسیت بالای ارتباط آبخوان گتوند- عقیلی و رودخانه کارون نسبت به بار هیدرولیکی رودخانه می‌باشد. این در حالی است که با وقوع ترسالی تغییرات یکنواخت بوده و اختلافی در نمودار آن نسبت به سال مدل به چشم نمی‌خورد و تغییرات این سناریو فقط در جداول بیلان آن قابل ردیابی است.

- ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۱. نون کرسیک، ترجمه چیت سازان، م. کشکولی، ح. ع. (۱۳۸۱)، مدل سازی آب های زیرزمینی، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ص. ۵۸۱-۵۹۰.
  12. Anderson, M. P. & Woessner, W. W. (1992). Applied Groundwater Modeling. San Diego: Academic Press.
  13. Haitjema, H.M., Kelson, V.A., de Lange, W., 2001. Selecting MODFLOW Cell Sizes for Accurate Flow Fields. Ground Water 938-931, (6) 39.
  14. Kennedy, C.D., Genereux, D.P., Mitasova, H., Corbett, D.R., Leahy, S., 2008. Effect of sampling density and design on estimation of streambed attributes. Journal of Hydrology 164180, 355.
  15. Konikow, L.F., Bredehoeft, J.D., 1992. Groundwater models cannot be validated. Advances in Water Resources 83-75, 15.
  16. Nemeth, M.S., Solo-Gabriele, H.M., 2002. Evaluation of the reach transmissivity to quantify exchange between groundwater and surface water. Journal of Hydrology 159-145, 274.
  17. Onta, P. R., A. Dasgupta and R. Harboe 1991. Multistep Planning Model For Conjunctive Use of Surface-Water and Ground-Water Resources. Journal of Water Resources Planning and Management 117, no. 662678 :6.
  18. Rushton, K.R., 2007. Representation in regional models of saturated river-aquifer interaction for gaining/losing rivers. Journal of Hydrology, (12) 334 281-262.
  19. Rushton, K.R., Tomlinson, L.M., 1979. Possible mechanisms for leakage between aquifers and rivers. Journal of Hydrology 65-49, 40.
  20. Reichard, E. G. 1995. Groundwater-Surface Water Management with Stochastic Surface Water Supplies - a Simulation Optimization Approach. Water Resources Research 31, no. 2865-2845 :11.
  21. Stephens, D.B. (1996) Vadose zone hydrology, CRC Press-Lewis Publishers, Boca Raton.
  22. Wang, C. C., B. Mortazavi, W. K. Liang, N. Z. Sun and W. W. G. Yeh 1995. Model Development For Conjunctive Use Study of the San Jacinto Basin, California. Water Resources Bulletin 31, no. 24-227 :2.
  23. Woessner, W.W., 2000. Stream and fluvial plain groundwater interactions: Rescaling hydrogeological thought. Ground Water, 42-423 : (3)38.

رودخانه اثر می گذارد و موجب تغییر جهت جریان در آن می شود. با توجه به نتایج تحقیق، پیشنهاد می شود جهت توسعه پایدار منابع آب منطقه، مدیریت یکپارچه و هماهنگ منابع آب با بخش های دیگر خصوصاً کشاورزی برای این منطقه در نظر گرفته شود. ارتباط رودخانه کارون و آبخوان گتوند- عقیلی می تواند نشانگر جهت حرکت آلودگی های احتمالی در شرایط مختلف باشد. مواردی چون ورود سموم و آلودگی های کشاورزی در ماه های کاهش ترافیک رودخانه، خشکسالی ها و برعکس، ورود آلاینده ها از رودخانه به آبخوان و تأثیر بر خاک منطقه را می توان ذکر نمود.

### باورقی

1. MODFLOW
2. Zone Budget
3. Food And Agriculture Organization Of The United Nations
4. Groundwater Modelling System
5. River Conductance

### منابع مورد استفاده

۱. آقایی، س. ع. (۱۳۸۵)، زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی.
۲. احمدی افزادی، ع. چیت سازان، م. (۱۳۸۱)، مدل آب زیرزمینی دشت کرمان با تأکید بر راه حل های مدیریتی جهت مقابله با بالآمدگی سطح آب زیرزمینی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. احمدی، ا. چیت سازان، م. ارزیابی شرایط مرزی خارجی حاصل از شبیه سازی جریان در شرایط پایدار و ناپایدار. ششمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. کرمان
۴. توسلی، م. چیت سازان، م. (۱۳۷۷). مدیریت منابع آب دشت مهیار شمالی با استفاده از مدل ریاضی. دومین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران.
۵. سازمان آب و برق خوزستان، (۱۳۸۹)، مطالعات شناخت آب های زیرزمینی در محدوده های گتوند- عقیلی، فصل اول. ص ۲۳.
۶. عبدالهی پور حقیقی، ج. پیری، ج. (۱۳۸۸) برهمکنش آب سطحی- آب زیرزمینی و مدل سازی آن. نخستین کنفرانس سراسری آب های زیرزمینی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان.
۷. عطارزاده، ع. ا. (۱۳۶۰). مدل ریاضی منابع آب زیرزمینی به کمک روش تفاضل های محدود وزارت نیرو، دفتر بررسی های منابع آب، ۹۲ ص.
۸. کاظمی، ر. (۱۳۸۱). ارزیابی هیدروژئولوژیکی و مدیریت آبخوان دشت قوچان- شیروان با استفاده از مدل عددی MODFLOW2000. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.
۹. مظفری، ج. (۱۳۸۵). مدیریت بهینه منابع آب دشت گتوند با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۰. نجاتی جهرمی، ز. (۱۳۸۸). شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت عقیلی با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود. پایان نامه کارشناسی