

# مدل‌سازی اثرات کف‌شکنی چاه‌های بهره‌برداری بر آبخوان باد-خالدآباد، جنوب کاشان

فاطمه شیرخانی<sup>۱</sup>، حمیدرضا ناصری<sup>۲(۳)</sup>، فرشاد علیجانی<sup>۳</sup> و زهره نجات جهرمی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران
۲. استاد، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران
۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران
۴. دانش‌آموخته دکتری، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

## چکیده

آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین نیاز آبی در منطقه باد-خالدآباد شهرستان کاشان به شمار می‌رود. با افزایش برداشت از آبخوان باد-خالدآباد فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر، پتانسیل برداشت از این آبخوان کاهش یافته است و نیاز به کف‌شکنی چاه‌ها احساس می‌شود. این پژوهش به بررسی تأثیر افزایش برداشت از چاه‌ها و کف‌شکنی آنها بر پتانسیل بهره‌برداری از آبخوان با استفاده از مدل پرداخته است. بدین منظور، ابتدا عوامل کمی و کیفی هیدروژئولوژیک مؤثر بر کف‌شکنی شناسایی شدند، سپس با تعیین وزن لایه‌ها به روش فرآیند تحلیلی سلسله مراتبی (AHP)، در محیط GIS با یکدیگر تلفیق و پنج منطقه به‌شرایط بهینه برای پیشنهاد کف‌شکنی چاه‌ها مشخص شد. پس از آن مدل‌سازی عددی شامل مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و پیش‌بینی با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW انجام شد. با استفاده از مدل ایجاد شده، اثرات افزایش برداشت ۲۰ درصدی چاه‌های بهره‌برداری با اجرای طرح کف‌شکنی در پنج منطقه پیشنهادی به‌صورت مرحله‌ای با بررسی تغییرات سطح ایستابی آبخوان در ۱۰ سال آینده پیش‌بینی گردید. نتایج مدل‌سازی به ترتیب افت متوسط ۱۲ و ۱۳ متر در بخش‌های جنوبی و شرقی آبخوان را نشان می‌دهد. در این آبخوان، کف‌شکنی بیش از ۹ متر، کیفیت و کمیت ذخیره آبخوان را به خطر می‌اندازد.

واژه‌های کلیدی: کف‌شکنی چاه، مدل‌سازی آبخوان، MODFLOW، دشت باد-خالدآباد.

## مقدمه

زیرزمینی در نقاط مختلف جهان شده است. در ایران، بیش از نیمی از دشت‌ها به وضعیت ممنوعه و بحرانی در زمینه منابع آب زیرزمینی رسیده‌اند (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹). افزایش جمعیت و توسعه صنعت و کشاورزی، به همراه تغییرات اقلیمی، منجر به عدم

در سال‌های اخیر افزایش برداشت از آبخوان‌ها برای تأمین نیازهای روزافزون انسانی منجر به کاهش قابل توجه منابع آب زیرزمینی در مناطق جمعیتی و کشاورزی شده است. این برداشت بی‌رویه باعث افت کمی و کیفی آب‌های

\* نویسنده مرتبط: h-nassery@sbu.ac.ir

Asimi, 1998). در منطقه Pleasant Valley در جنوب کالیفرنیا معمولاً بخش های عمیق تر آبخوان، حاوی آب شیرین و مناسب برای استخراج است، این در حالی است که گاهی برخلاف این دیدگاه، آب برخی از چاه ها برای مصرف کشاورزی یا شهری مناسب نبوده و کیفیت آن با گذشت زمان کاهش یافته است (Izbicki et al., 2005). در شمال شرقی عبادان (نیجریه)، تعداد کلیفرم، pH، سختی و غلظت برخی یون ها با افزایش عمق چاه آب افزایش یافته است، در حالی که نیترات و بی کربنات کاهش یافته اند (Ifabiyi, 2008). با این حال، مطالعات دیگری وجود دارند که ارتباط معنی داری بین عمق چاه و کیفیت آب پیدا نکرده اند. در استان گیونگ سانگ جنوبی (کره جنوبی)، هیچ همبستگی قابل توجهی بین عمق چاه و شیمی آب مشاهده نشده است، که احتمالاً به دلیل سیستم های هیدروژئولوژیک پیچیده است (Kim et al., 2007). همچنین، پژوهش های متعدد دیگری در مناطق شهری و روستایی اندونزی هیچ ارتباط معنی داری بین عمق چاه و غلظت آهن یا کلر را نشان نداده اند (Ronny et al., 2019). این یافته های متناقض نشان می دهند که تأثیر عمق چاه بر شیمی آب ممکن است بسته به عوامل زمین شناسی و محیطی محلی متفاوت باشد و باید بر اساس شرایط هیدروژئولوژیک محلی تعیین شود.

در منطقه باد-خالداآباد به دلیل بارش کم و توزیع زمانی نامناسب و کاهش و یا فقدان رواناب در فصل های مصرف، کشاورزان به طور عمده آب مورد نیاز خود را از آب های زیرزمینی تامین می کنند. برداشت بی رویه از چاه های این منطقه باعث افت تراز آب زیرزمینی و کاهش دبی چاه ها شده است. شاید با حفاری و کف شکنی چاه ها بتوان به دبی اولیه چاه ها دست پیدا کرد. چون کف شکنی بالاتر از حد مجاز ممکن است باعث فرونشست و کاهش ذخیره آب زیرزمینی شود، لذا تعیین عمق مناسب برای کف شکنی چاه های کشاورزی، برای افزایش دبی، بسیار مهم می باشد. به همین منظور در این پژوهش، عمق بهینه کف شکنی چاه های کشاورزی در آبخوان باد-خالداآباد با مدل سازی جریان آب زیرزمینی تعیین شده است.

تعداد در منابع و مصرف آب شده است (Vorosmarty et al., 2010). کشور ایران نیز با دارا بودن مناطق خشک و نیمه خشک از این قاعده مستثنا نیست. در این راستا، یکی از چالش های اصلی در مدیریت منابع آب زیرزمینی، کاهش راندمان چاه ها به دلیل برداشت های بی رویه و تأثیر آن بر کیفیت آب زیرزمینی است. وزارت نیرو در سال ۱۳۹۴ اقدام به اجرای طرح احیا و تعادل بخشی آبخوان های کشور کرده است که یکی از اهداف آن محدود کردن کف شکنی چاه های کشاورزی برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی می باشد.

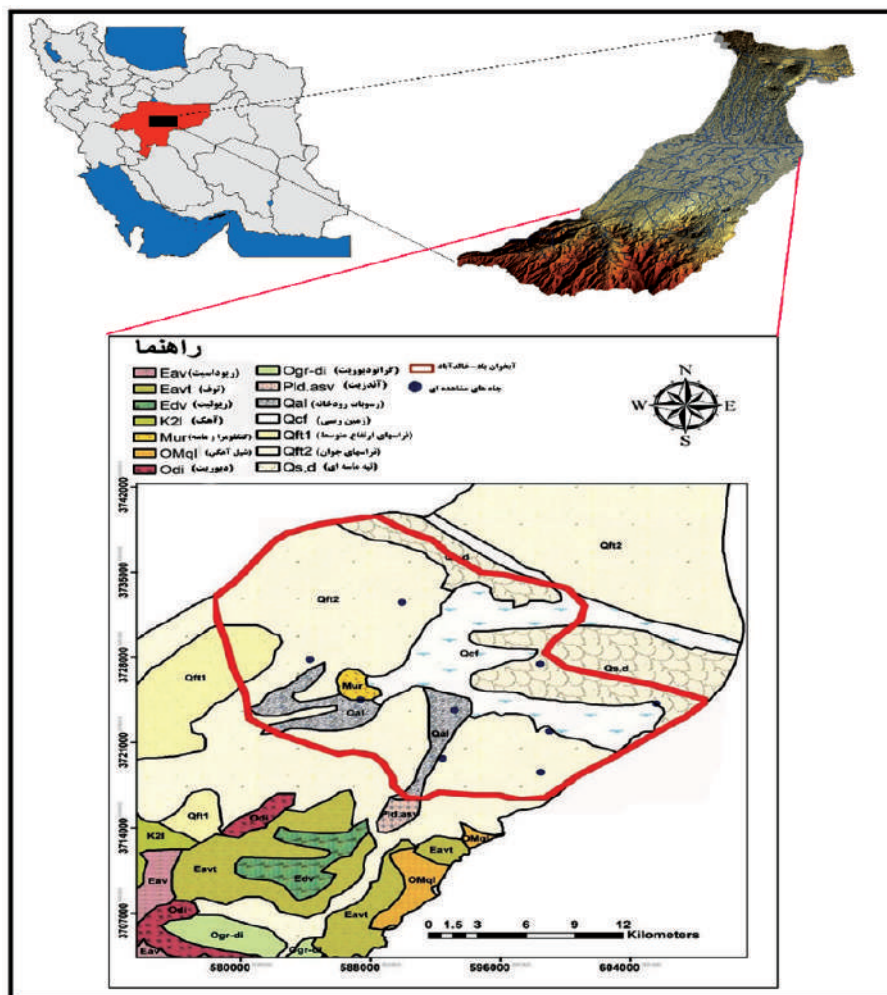
با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی و تامین آب از طریق حفر چاه های عمیق، ضرورت بهره برداری از چاه ها و رعایت اصول علمی و فنی در مراحل مختلف بهره برداری و نگهداری آن ها بسیار زیاد است. اکرامی و همکاران (Ekrami et al., 2013) در پژوهشی تأثیر خشکسالی اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی دشت اردکان را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد، علاوه بر برداشت بی رویه از آبخوان، رخداد خشکسالی نیز بر کاهش آبدی چاه ها، قنات ها و چشمه های دشت یزد-اردکان تأثیر داشته و زمان تأثیر آن دو سال پس از وقوع خشکسالی بوده است. بیژنی و همکاران (۱۳۹۵) عمق کف شکنی چاه ها در آبخوان علی آباد (قم) را با استفاده از مدل ریاضی تعیین کردند. در این پژوهش از کد GIS به علت پشتیبانی از نرم افزار ArcGIS استفاده شد. نتایج نشان داد در بخش های جنوب غربی و جنوب شرقی آبخوان علی آباد احتمال خشک شدن چاه ها بیشتر است. حداکثر عمق کف شکنی در بخش جنوبی آبخوان به مقدار ۸۰ متر تخمین زده شد. رضایی و همکاران (۱۳۹۸) عمق کف شکنی چاه های کشاورزی در آبخوان مهاباد را با استفاده از مدل عددی GIS تعیین کردند. در این پژوهش، عمق بحرانی کف شکنی در کل منطقه ۱۱۱ متر برآورد شد.

تاکنون پژوهش ها در مورد ارتباط کف شکنی و عمق چاه با کیفیت آب نتایج متفاوت و گاهی متناقضی را نشان داده است. بعضی مطالعات همبستگی بین عمق چاه و برخی از پارامترهای شیمیایی را نشان داده اند (Mahadeven and Krishaswamy, 1984; Perlinutter et al., 1964;

## مواد و روش‌ها موقعیت جغرافیایی

آذرین با مورفولوژی صخره‌ساز، واحدهای شیلی-ماسه‌سنگی ژوراسیک، ماسه‌سنگ‌های لالون و واحدهای آذرآواری و کربناته کرتاسه تشکیل شده‌اند (شکل ۱). آبخوان آبرفتی باد-خالدآباد با نهشته‌های آبرفتی کواترنری، عمدتاً از دره‌های بزرگ هنجن، ابیانه و اوره در بخش جنوبی تغذیه می‌شود. همچنین مخروط افکنه‌های وسیع موجود در دامنه ارتفاعات جنوب غربی در تغذیه آبخوان مؤثر می‌باشند.

آبخوان باد-خالدآباد با مساحت ۳۶۰ کیلومترمربع در گستره شهرستان نطنز، در استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). این آبخوان از جنوب به گستره طرق-ابیازن، از شمال به نطنز و از شرق به گستره دق سرخ محدود شده است (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹). ارتفاعات این گستره به‌طور عمده از سنگ‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه سنگ‌شناسی آبخوان باد-خالدآباد (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۱)

ساله (۱۳۶۰ تا ۱۳۹۹)، ۲۵۶ میلی‌متر است. متوسط تبخیر سالانه در گستره آبخوان ۱۲۹۵ میلی‌متر می‌باشد (شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹). گستره مطالعاتی باد-خالدآباد رودخانه دایمی ندارد. واحدهای آبرفتی با نفوذپذیری نسبی زیاد در گستره مورد مطالعه شامل رسوبات آبرفتی

حداکثر ارتفاع توپوگرافی در این گستره ۱۰۷۱ متر از سطح آب‌های آزاد در بخش شرقی و حداقل آن ۹۹۲ متر در جنوب گستره است. متوسط ارتفاع دشت در این گستره ۱۰۳۲ متر می‌باشد. متوسط دمای سالانه در این گستره ۱۹ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه برای دوره ۴۰

بستر رودخانه ها و مسیل ها و رسوبات بادرستی ماسه ای، مخروط افکنه ای و پادگانه ای می باشند که بافت درشت دانه و تخلخل مفید بالایی دارند. این واحدها در تغذیه آبخوان منطقه تاثیر مثبتی دارند. آبخوان آبرفتی باد- خالداآباد ادامه آبخوان آبرفتی اردستان است، که در بخش غربی آن قرار دارد (شرکت آب منطقه ای استان اصفهان، ۱۳۹۹).

## جمع آوری داده ها

داده های هیدروشیمی گستره مطالعاتی باد- خالداآباد در دوره ۲۲ ساله از سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۹۹ جمع آوری شده است. در گستره آبخوان باد- خالداآباد ۹ حلقه چاه مشاهده ای و ۱۷۳ حلقه چاه بهره برداری برای کشاورزی، شرب و صنعت موجود است. داده های سطح آب چاه های مشاهده ای، داده برداری سراسری مراحل سه گانه، پارامترهای هیدرودینامیک، ضخامت آبخوان و بارش از شرکت آب منطقه ای استان اصفهان دریافت شد. همچنین دقت و صحت آنها بررسی گردید و در مواردی بازسازی و تصحیح داده ها انجام شد.

## روش شناسی

بررسی اولیه منطقه مورد مطالعه از دیدگاه هیدروژئولوژی و هیدروشیمی به منظور شناسایی مناطق مناسب برای پیشنهاد کف شکنی و افزایش برداشت چاه های آب انجام شد. پژوهش زیادی در ارتباط با عوامل موثر بر کاهش سطح ایستابی و عواقب ناشی از آن در ایران و دیگر نقاط دنیا انجام شده است (پاکدل و همکاران، ۱۴۰۱). نقشه های هم تراز و هم عمق آب زیرزمینی تهیه و هیدروگراف چاه های مشاهده ای مورد تحلیل قرار گرفت. در بررسی اولیه کیفیت آب زیرزمینی، نمودارهای پایپر برای دوره نمونه برداری سال های آبی ۱۳۷۷ و ۱۳۹۹ در گستره مورد مطالعه آبخوان باد- خالداآباد با استفاده از نرم افزار AqQA رسم شد. با استفاده از این نمودارها، کیفیت آب های نمونه برداری شده در این گستره مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه با استفاده از داده های EC و یون کلراید (Cl<sup>-</sup>) در سال های ۱۳۷۷ و ۱۳۹۹ که درون یابی آن ها به روش Kriging انجام شد، اختلاف تغییرات زمانی و مکانی این دو پارامتر در دوره طولانی مدت

بررسی شد.

با توجه به آنکه تاکنون روش دقیق و مشخصی برای شناسایی مناطق مستعد کف شکنی ارائه نشده است، با شناسایی معیارهای مهم و وزن دهی و تلفیق آنها، نقشه پهنه بندی مناطق مناسب برای اجرای کف شکنی در آبخوان باد- خالداآباد تهیه شد. معیارهای افت آبخوان، قابلیت انتقال آبخوان، عمق چاه های بهره برداری، دبی، ضخامت آبرفت، شیب هیدرولیکی، غلظت کلراید، و هدایت الکتریکی از جمله مهم ترین عوامل تاثیرگذار به منظور تعیین چاه های بهره برداری کشاورزی برای کف شکنی شناسایی شدند. هر کدام از این معیارها اهمیت متفاوتی بر روی انتخاب مناطق پهنه کف شکنی چاه های آب دارند.

- میزان افت آبخوان: معمولا چاه های بهره برداری که در محدوده افت شدید تراز سطح ایستابی قرار دارند، مستعد کف شکنی می باشند.
- قابلیت انتقال آبخوان: مناطقی از آبخوان که قابلیت انتقال بالاتری دارند، مستعد بهره برداری بیشتر می باشند.
- عمق چاه های بهره برداری: چاه های با عمق بیش از ۸۰ متر که چاه های عمیق محسوب می شوند، برای کف شکنی انتخاب شدند.
- دبی: چاه های بهره برداری در مناطقی که دبی زیاد است، برای کف شکنی انتخاب شدند.
- ضخامت آبرفت یا عمق برخورد به سنگ بستر: چاه های بهره برداری که در مناطقی با ضخامت آبرفت بیشتر قرار دارند، انتخاب شدند.
- شیب هیدرولیکی: شیب هیدرولیکی و افت تراز سطح ایستابی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند.
- کلر و هدایت الکتریکی: میزان کلر و هدایت الکتریکی با مناطق مستعد کف شکنی رابطه معکوس دارند. در بخش هایی که مقدار این دو پارامتر زیاد است، کیفیت مناسبی از آب زیرزمینی وجود ندارد و برای کف شکنی مناسب نمی باشد.
- نقشه های پهنه بندی هر یک از پارامترهای موثر در کف شکنی در محیط ArcGIS و Surfer به روش درون یابی

رابطه ۱ تلفیق در محیط GIS انجام شد.

$$WD\ index = (Q \times 32.8) + (B \times 22.9) + (T \times 19.3) + (E \times 10.3) + (D \times 6.1) + (EC \times 3.9) + (CI \times 2.7) + (G \times 2.0) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که  $WD\ index$  شاخص پتانسیل مناطق مستعد کف‌شکنی،  $Q$  دبی چاه،  $B$  ضخامت آبخوان،  $T$  قابلیت انتقال،  $E$  افت سطح آب زیرزمینی،  $D$  عمق چاه‌ها،  $EC$  هدایت الکتریکی،  $CI$  کلر، و  $G$  شیب هیدرولیکی می‌باشند. در نهایت نقشه پهنه‌بندی قابلیت کف‌شکنی چاه‌های آب در آبخوان باد-خالدآباد تهیه و پنج منطقه برای کف‌شکنی مرحله‌ای در آبخوان پیشنهاد شد.

Kriging تهیه شد. سپس لایه‌ها بر اساس اهمیت آنها بر کف‌شکنی چاه‌های آب نرخ بندی شدند. روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که بر مقایسه زوجی معیارها استوار است، برای تعیین وزن لایه‌های معیار استفاده شد. پس از وزن‌دهی با استفاده از روش AHP لایه‌ها با یکدیگر به روش هم‌پوشانی شاخص (Index overlay) تلفیق شدند. در روش AHP مبنای کار بر اساس محاسبات ماتریسی است. این روش کمک‌کننده برای مطالعه سلسله مراتبی مسائل پیچیده می‌باشد. در این روش نسبت ارجحیت هر یک از عوامل بر یکدیگر نسبت به هدف اصلی محاسبه می‌شود (شکل ۲). در نهایت پس از تعیین وزن لایه‌ها، بر اساس

(الف) Priorities

	Cat	Priority	Rank	(+)	(-)
دبی	1	Q	32.8%	1	12.6%
ضخامت آبخوان	2	B	22.9%	2	7.2%
قابلیت انتقال	3	T	19.3%	3	7.3%
افت تراز سطح آب زیرزمینی	4	E	10.3%	4	3.0%
عمق چاه‌ها	5	D	6.1%	5	1.5%
هدایت الکتریکی	6	EC	3.9%	6	1.2%
کلر	7	CI	2.7%	7	0.8%
شیب هیدرولیکی	8	G	2.0%	8	0.8%

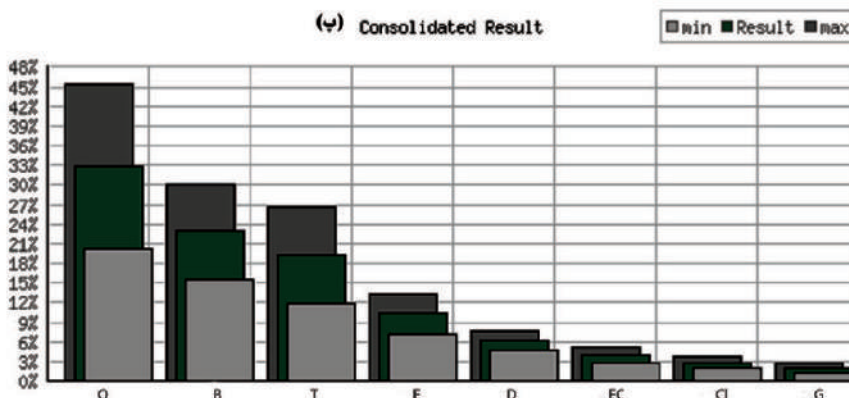
Number of comparisons = 28  
Consistency Ratio CR = 4.0%

(ب) Decision Matrix

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2.00	3.00	4.00	5.00	7.00	8.00	9.00
2	0.50	1	2.00	3.00	4.00	6.00	7.00	8.00
3	0.33	0.50	1	3.00	5.00	6.00	7.00	8.00
4	0.25	0.33	0.33	1	2.00	4.00	5.00	6.00
5	0.20	0.25	0.20	0.50	1	2.00	3.00	4.00
6	0.14	0.17	0.17	0.25	0.50	1	2.00	3.00
7	0.12	0.14	0.14	0.20	0.33	0.50	1	2.00
8	0.11	0.12	0.12	0.17	0.25	0.33	0.50	1

Principal eigen value = 8.387  
Eigenvector solution: 6 iterations, delta = 7.8E-9

(ب) Consolidated Result



شکل ۲. تقدم، الف) ماتریس تصمیم، ب) نتایج وزن‌دهی، پ) لایه‌های معیار موثر بر کف‌شکنی چاه‌های آب دشت باد-خالدآباد به روش AHP

در این پژوهش برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی از کد MODFLOW استفاده شده است. کدهای متعددی برای مدل سازی جریان آب های زیرزمینی تهیه و ارائه شده اند که در این بین، کد GMS به دلیل کارایی زیاد و دقت قابل قبول مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این کد با استفاده از روش تفاضل محدود اقدام به مدل سازی کمی و کیفی سیستم آب های زیرزمینی در محیط های دو بعدی و سه بعدی و همچنین تجزیه و تحلیل در شرایط ماندگار و غیرماندگار می کند. یکی از مهم ترین مزایای آن، قابلیت ترکیب با نرم افزار ArcGIS به منظور مدیریت داده ها در تمامی مراحل ورود و پردازش اطلاعات و خروجی های مورد نیاز است. خروجی های این کد شامل بار آبی (Head) در گام های زمانی، منحنی های تراز سطح ایستابی آبخوان، بیلان آبی در گستره مورد مطالعه و دبی جریان تخصیص یافته به هر سلول است. در کد GMS به دو روش مبتنی بر شبکه و مدل مفهومی می توان به مدل سازی آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW پرداخت. استفاده از روش مدل مفهومی به علت دقت زیاد در مدل سازی آبخوان ها توصیه می شود (Brewer et al., 2003). در این پژوهش از روش مدل مفهومی استفاده شد.

در این پژوهش برای مدل سازی جریان آب زیرزمینی از کد MODFLOW استفاده شده است. کدهای متعددی برای مدل سازی جریان آب های زیرزمینی تهیه و ارائه شده اند که در این بین، کد GMS به دلیل کارایی زیاد و دقت قابل قبول مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این کد با استفاده از روش تفاضل محدود اقدام به مدل سازی کمی و کیفی سیستم آب های زیرزمینی در محیط های دو بعدی و سه بعدی و همچنین تجزیه و تحلیل در شرایط ماندگار و غیرماندگار می کند. یکی از مهم ترین مزایای آن، قابلیت ترکیب با نرم افزار ArcGIS به منظور مدیریت داده ها در تمامی مراحل ورود و پردازش اطلاعات و خروجی های مورد نیاز است. خروجی های این کد شامل بار آبی (Head) در گام های زمانی، منحنی های تراز سطح ایستابی آبخوان، بیلان آبی در گستره مورد مطالعه و دبی جریان تخصیص یافته به هر سلول است. در کد GMS به دو روش مبتنی بر شبکه و مدل مفهومی می توان به مدل سازی آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW پرداخت. استفاده از روش مدل مفهومی به علت دقت زیاد در مدل سازی آبخوان ها توصیه می شود (Brewer et al., 2003). در این پژوهش از روش مدل مفهومی استفاده شد.

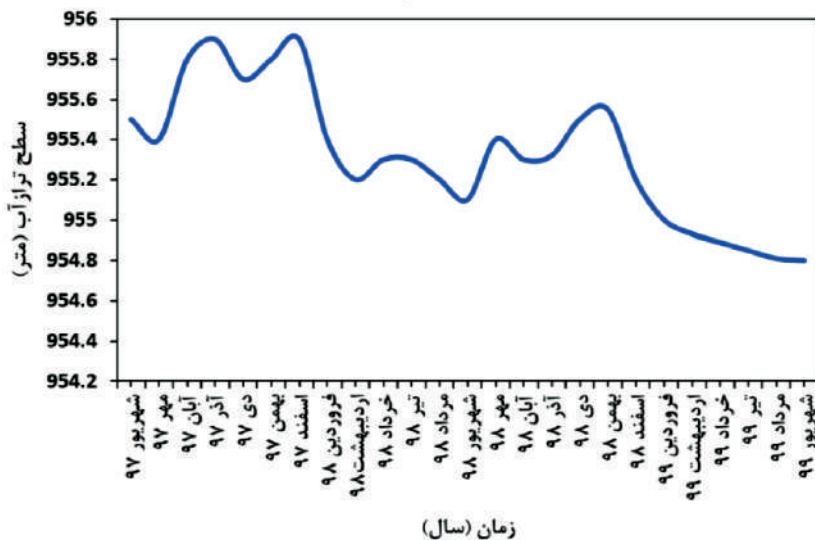
## بحث

### کمیت و کیفیت آب های زیرزمینی

با توجه به هیدروگراف معرف آبخوان باد- خالدا آباد (شکل ۳)، در بازه سال های آبی ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ تراز سطح آب زیرزمینی به طور کلی روند کاهشی داشته است، اما در بعضی ماه ها به علت رخداد های بارش، تراز سطح ایستابی به صورت مقطعی افزایش یافته است. سطح آب زیرزمینی دشت باد- خالدا آباد در دوره دو ساله مذکور ۱/۸ متر (سالانه ۰/۹ متر) افت نشان می دهد. هر چند تغذیه های موضعی از بارش به طور موقت با افزایش سطح آب زیرزمینی همراه بوده است. این افت حدود ۰/۹ متری سالانه بیانگر آن است که میزان بهره برداری در شرایط هیدرولوژیک فعلی نسبت به تغذیه آبخوان بیشتر است. افت سطح آب زیرزمینی با کاهش آبدی چاه های دشت همراه بوده است و نیاز به کف شکنی و افزایش عمق چاه ها را مشخص ساخته است.

کیفیت منابع آبی توسط املاح موجود در آن تعیین می شود. با توجه به مقادیر و تغییرات غلظت آن ها می توان به

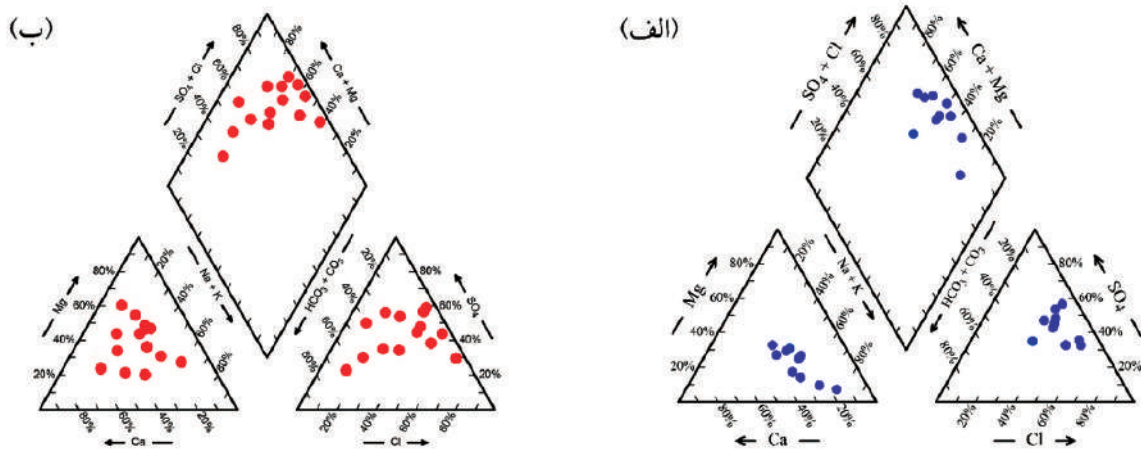
برای گستره مطالعاتی آبخوان باد- خالدا آباد به مساحت ۳۶۰/۲ کیلومتر مربع، شبکه ای با سلول هایی به ابعاد ۲۵۰×۲۵۰ متر در ۸۸ ستون و ۱۱۴ ردیف و به صورت یک لایه ای تعریف شد. برای توسعه مدل مفهومی با استفاده از مدول GIS و دیگر ابزار های موجود در نرم افزار GMS، هندسه آبخوان، مرز گستره مدل سازی، میزان تخلیه چاه های بهره برداری، مشخصات چاه های مشاهده ای، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، توپوگرافی سطحی و سنگ کف، تغذیه آبخوان و شرایط مرزی گستره ایجاد شد و ویژگی همه عوارض مشخص و در مدل تبیین گردید. ابتدا مدل در حالت پایدار اجرا و واسنجی شد. پس از آن در ابتدا دوره پیش بینی مدل، یک بازه پنج ساله در نظر گرفته شد و در این بازه، دو سناریو مطرح شد. در سناریوی اول، ۲۰ متر کف شکنی و افزایش ۱۰ درصد دبی بهره برداری و در سناریوی دوم، ۴۰ متر کف شکنی و افزایش ۲۰ درصد دبی بهره برداری



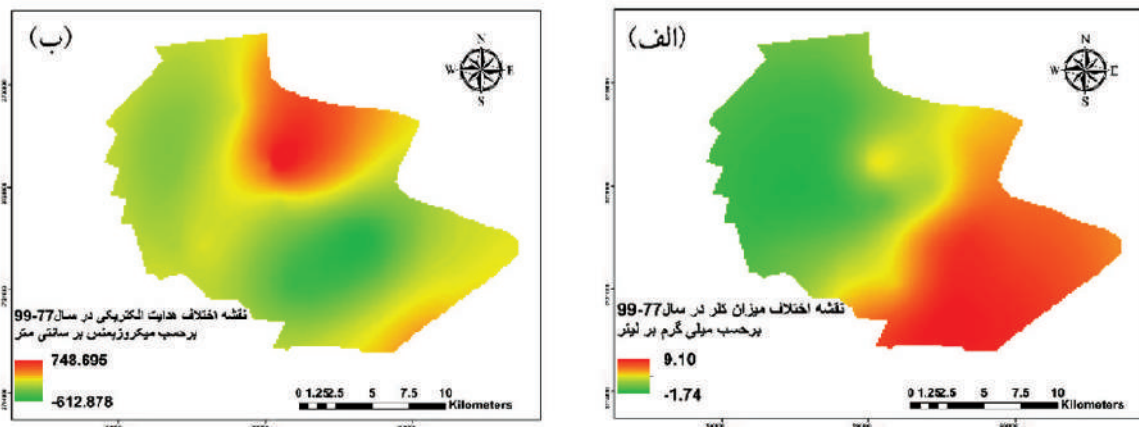
شکل ۳. هیدروگراف معرف ابخوان باد-خالدآباد در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹

آبخوان باد-خالدآباد در بازه زمانی سال ۱۳۷۷ تا سال ۱۳۹۹ تهیه شدند (شکل ۵). توزیع مکانی میزان هدایت الکتریکی و کلر نشان می‌دهد، بیشترین میزان تغییرات هدایت الکتریکی در گستره شمالی و شرقی آبخوان در حدود ۷۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌باشد. همچنین میزان تغییرات کلر در بخش شرقی آبخوان در حدود نه میلی‌گرم بر لیتر است. به‌طور کلی، ناهنجاری‌های موجود در مرکز گستره در سال ۱۳۹۹ (انتهایی بازه مطالعاتی) جای خود را به افزایش تدریجی غلظت پارامترها از غرب به شرق گستره می‌دهد. املاح محلول افزایش یافته و از کیفیت آب کاسته شده است. هیدروگراف معرف و کموگراف هدایت الکتریکی آبخوان در بازه ۲۲ ساله (۱۳۷۷-۱۳۹۹) به‌منظور بررسی روند تغییرات و اثرات متقابل تغییرات کمی و کیفی آبخوان مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶). روند افزایشی و کاهش‌ی هیدروگراف، به‌طور متناوب در تمامی سال‌های آبی (بدون اعمال تنش و روند تغییر شیب ناگهانی ناشی از آن) تکرار شده است. در بازه زمانی مورد مطالعه، تراز سطح ایستابی آبخوان باد-خالدآباد حدود ۱۷ متر افت داشته است. در این بازه زمانی، بیشترین مقدار EC در سال ۱۳۹۳ بوده که به بیش از ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر رسیده است. هر چند انتظار می‌رود کاهش تراز سطح ایستابی، همراه با افزایش مقدار EC باشد، اما تغییرات EC در برابر تغییرات افت آب زیرزمینی، نامحسوس است و روندی تناوبی را دنبال می‌کند.

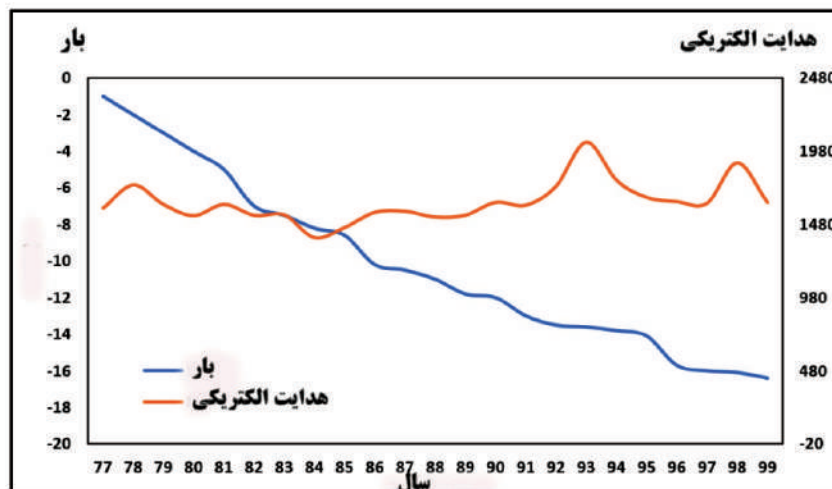
مواردی همچون ساختارهای زمین‌شناسی، شرایط اقلیمی، نفوذ و اختلاط آب‌های مختلف پی برد (قره محمودلو و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های متداول در تعیین تیپ و رخساره هیدروشمیمی آب استفاده از نمودار پایپر است. تحلیل‌های هیدروشمیمی براساس نتایج سنجش شیمیایی ۱۳ و ۱۰ حلقه چاه انتخابی بهره‌برداری به ترتیب برای سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۹۹ انجام شد. به‌طور کلی روند خطی مشاهده شده در نمودارهای پایپر مربوط به سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۹۹، بیانگر تکامل هیدروژئوشیمی ناکامل از بی‌کربناته به سولفاته (کلروه) در آبخوان باد-خالدآباد است (شکل ۴). هر چند ناهنجارهایی به‌واسطه اختلاط به علت تغذیه از گسل‌های متعدد و انحلال نمک‌ها در منطقه بر روی آبخوان رخ داده است. توزیع پراکنده نمونه‌ها در نمودار پایپر سال ۱۳۷۷ (شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های آب از نظر کیفی از بی‌کربناته-منیزیک تا سولفاته (کلروه)-منیزیک متغیر می‌باشند و اغلب دارای تیپ و رخساره مشخصی نیستند که بیانگر اختلاط آب‌ها با منشاهای متفاوت است. در نمودار پایپر سال ۱۳۹۹ (شکل ۴-الف) تیپ و رخساره آب زیرزمینی به‌صورت غالب، سولفاته-سدیک می‌باشد ولی در بعضی بخش‌ها دارای تیپ و رخساره سولفاته (کلروه)-سدیک است. بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی برای تعیین عمق بهینه کف‌شکنی موثر است. برای تعیین روند توزیع مکانی یون‌ها، نقشه‌های هم‌هدایت الکتریکی و هم‌کلر برای گستره



شکل ۴. نمودار پایپر برای تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی گستره مطالعاتی باد-خالداآباد در سال، الف) ۱۳۹۹، ب) ۱۳۷۷



شکل ۵. مقدار تغییرات پارامترهای کلر، الف) هدایت الکتریکی، ب) نمونه های آب زیرزمینی گستره مطالعاتی باد-خالداآباد در بازه زمانی ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۹



شکل ۶. نمودار تغییرات EC (برحسب میکروزیمنس بر سانتی متر) و تغییرات افت سطح تراز چاه های مشاهده ای (برحسب متر) در گستره مطالعاتی باد-خالداآباد در بازه زمانی ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۹

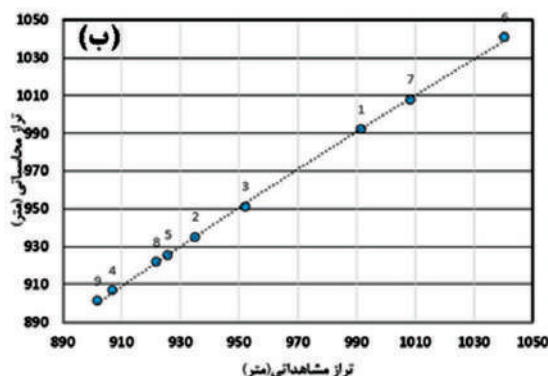
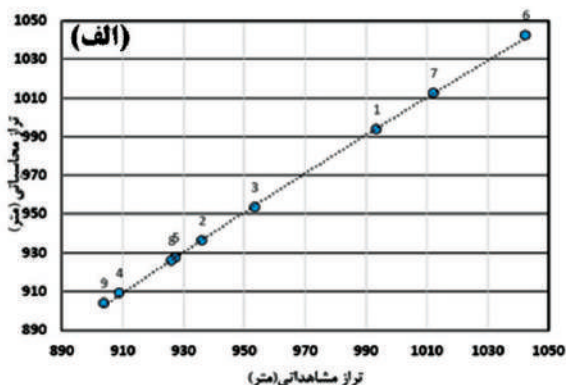


## مدل سازی جریان آب زیرزمینی

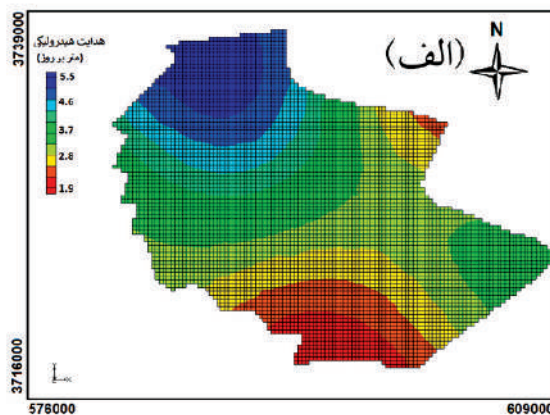
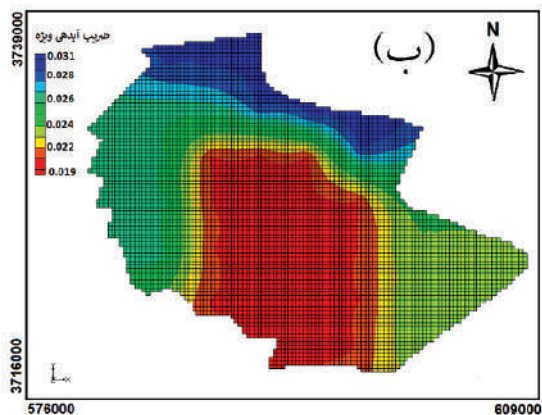
مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان باد-خالدآباد در محیط GMS با استفاده از بسته MODFLOW با اعمال شرایط مرزی، پارامترهای هیدرودینامیک اولیه و مولفه های تغذیه و تخلیه برای دوره ماندگار یک ماهه و دوره ناماندگار ۱۵ ماهه طراحی و اجرا شد. در اولین اجرای مدل در حالت پایدار، انطباق خوبی بین منحنی های هم تراز مشاهده ای و محاسبه ای وجود نداشت (شکل ۷ الف). علت این مساله می تواند عدم دقت در داده های هدایت هیدرولیکی و عدم قطعیت در شرایط مرزی و میزان تغذیه باشد. برای بررسی روند تغییرات آب زیرزمینی در مدت یک سال و سه ماه آماری و بررسی تاثیر بهره برداری از چاه های کشاورزی بر آبخوان دشت باد-خالدآباد، پارامترهای مربوط به شرایط ناپایدار برای آذر ۱۳۹۷ تا اسفند ۱۳۹۸ به مدل وارد و واسنجی شد (شکل ۷ ب). صحت سنجی مدل، با استفاده از داده های

تراز سطح آب چاه های مشاهده ای در بازه زمانی فروردین ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۳۹۹ انجام شد.

انطباق مقادیر تراز آب زیرزمینی محاسبه ای و مشاهده ای مهم ترین نتایج واسنجی است (نبی زاده چمازکتی و جعفری، ۱۳۹۸). پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار، مقدار هدایت هیدرولیکی ثابت در نظر گرفته شد و واسنجی براساس شرایط مرزی و آبدهی ویژه تعیین شد. مقدار آبدهی ویژه بین یک تا سه درصد به دست آمد. نقشه های هم هدایت هیدرولیکی و هم آبدهی ویژه آبخوان پس از واسنجی مدل نشان می دهد که هر دو پارامتر از یک الگو پیروی می کنند و در بخش جنوبی به کمترین مقدار خود می رسند (شکل ۸). مقدار هدایت هیدرولیکی قبل از واسنجی مدل بین یک تا پنج متر بر روز در نظر گرفته شد ولی پس از واسنجی، مقدار هدایت هیدرولیکی واسنجی شده بین ۱/۹ تا ۴/۴ متر بر روز و آبدهی ویژه بین ۰/۱۹ تا ۰/۳۲ متغیر می باشد.

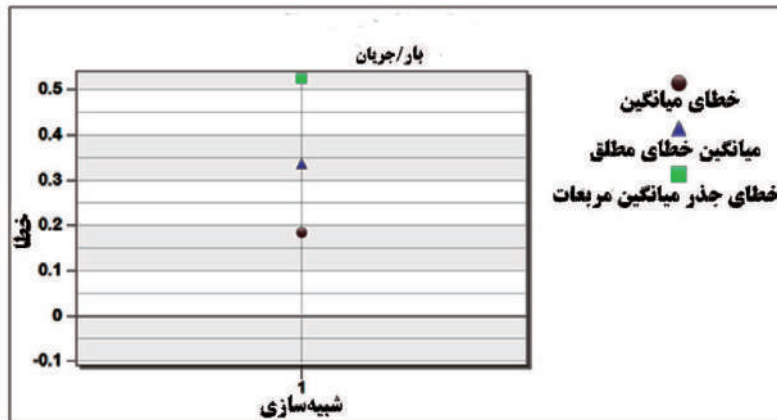


شکل ۷. نتایج تراز سطح ایستابی محاسبه ای در مقابل مشاهده ای برای دوره پایدار، (الف) مهر ۱۳۹۷، (ب) در پایان دوره ناپایدار فروردین ۱۳۹۹



شکل ۸. نقشه های، (الف) هم هدایت هیدرولیکی، (ب) هم آبدهی ویژه در پایان دوره واسنجی

نتایج حاصل از واسنجی مدل نشان می دهد که خطای میانگین (ME) برای شرایط ناپایدار بین ۰/۱۵ تا ۰/۲ متر است. خطای میانگین از آنجایی که اختلاف میانگین های مثبت و منفی را با هم جمع جبری می کند و باعث می شود تا تأثیر آن ها خنثی شوند، معیار مناسبی برای ارزیابی مدل نیست. بنابراین، مقدار کم ME به صورت قطعی نشان دهنده واسنجی خوب نیست. میانگین خطای مطلق (MAE) در مدل مورد مطالعه، بین ۰/۳ تا ۰/۳۵ متر و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) بین ۰/۵ تا ۰/۵۵ متر به دست آمد (شکل ۹).



شکل ۹. مقادیر خطا برحسب شاخص RMSE

تمامی چاه های آبخوان باد-خالداآباد، افزایش ۲۰ درصدی دبی در نظر گرفته شد. در سناریو دوم روند کنونی آبخوان در نظر گرفته شد.

نتایج مدل سازی نشان می دهد که در سناریو اول، در پنج سال اول افت سطح آب زیرزمینی بیشتر از پنج سال دوم است. به طور کلی در این سناریو، افت سطح آب زیرزمینی بیشتری نسبت به سناریو دوم مشاهده شد (شکل ۱۲). سناریو اول، در ابتدای پنج سال اول در پهنه های ۱ و ۳ افت سطح آب بیشتری را دارد. همچنین در انتهای دوره ده ساله، کاهش بیشتری در بخش های شمالی آبخوان و پهنه های ۲ و ۵ به ثبت رسیده است.

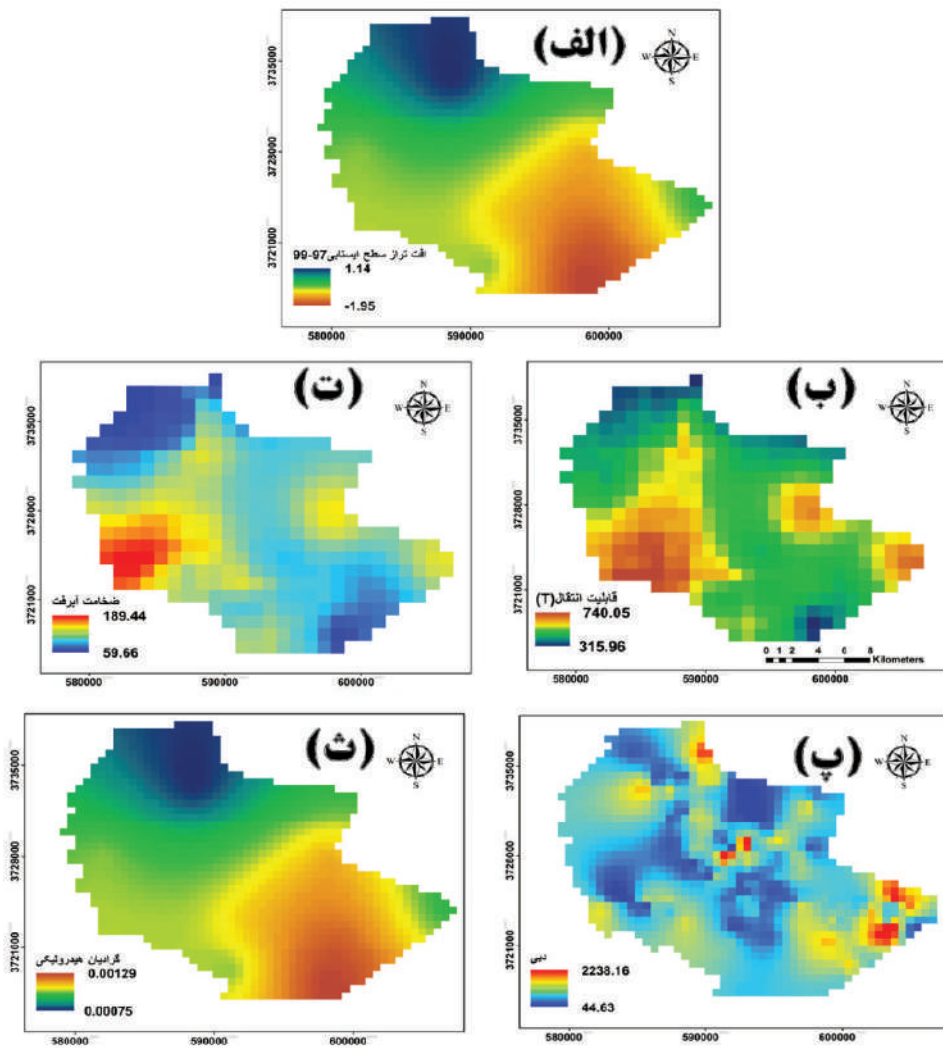
برای نمایش بهتر نتایج مدل سازی جدول ۱ تهیه شد. در این جدول، میزان تغییرات برداشت از چاه های بهره برداری بر اساس پهنه های مشخص شده نمایش داده شد. پهنه ۵ به طور میانگین با افزایش سه میلیون متر مکعب میزان تخلیه چاه ها در دوره ۱۰ ساله، بیشترین افزایش دبی چاه ها را دارد. همچنین در پهنه یک کمترین تغییرات تخلیه آب چاه ها در حدود ۰/۶ میلیون متر مکعب نشان داده شد.

## پهنه بندی مناطق مناسب برای کف شکنی چاه های آب

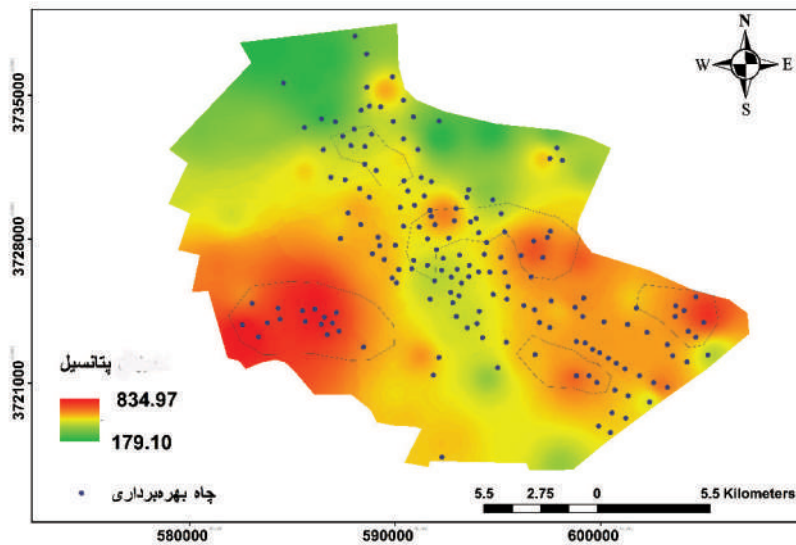
نقشه های معیار برای تهیه مدل پهنه بندی کف شکنی چاه های آب در آبخوان باد خالدا-آباد شامل تغییرات سطح ایستابی یا هم افت و خیز آبخوان، قابلیت انتقال، عمق چاه های بهره برداری، دبی چاه، ضخامت آبرفت، و شیب هیدرولیکی، به عنوان مهم ترین عوامل تاثیرگذار به منظور تعیین چاه های بهره برداری کشاورزی، تهیه شده است (شکل ۱۰).

## پیش بینی اثرات اجرای کف شکنی چاه های آب با استفاده از مدل جریان آب زیرزمینی

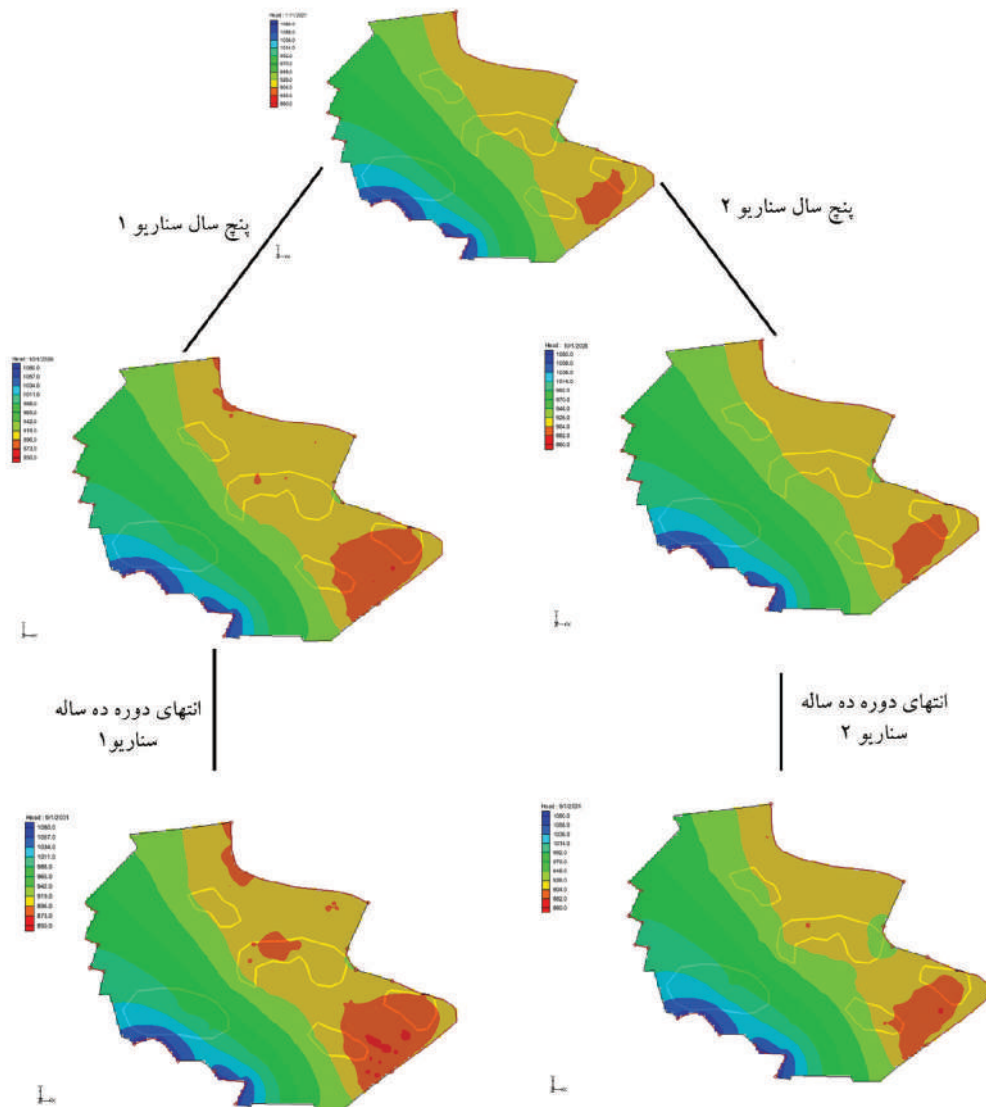
به منظور ارزیابی روند افت سطح آب زیرزمینی و تعیین عمق بهینه کف شکنی در دوره پیش بینی ۱۰ ساله، دو سناریو مطرح شد. در سناریو اول در طی دوره ۱۰ ساله به صورت پلکانی پیش بینی انجام شد که در پنج سال اول در پهنه های نمایش داده شده (شکل ۱۱) به صورت پلکانی افزایش ۲۰ درصدی دبی چاه های بهره برداری و در پنج سال دوم برای



شکل ۱۰. نقشه‌های لایه‌های معیار برای پهنه‌بندی مناطق مناسب کف‌شکنی چاه‌های آب شامل، الف) افت تراز سطح ایستابی، ب) قابلیت انتقال آبخوان، پ، دبی، ت) ضخامت آبرفت، ث) شیب هیدرولیکی در آبخوان باد-خالد آباد



شکل ۱۱. نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل مکان‌های مستعد کف‌شکنی چاه‌های آب در آبخوان باد-خالدآباد



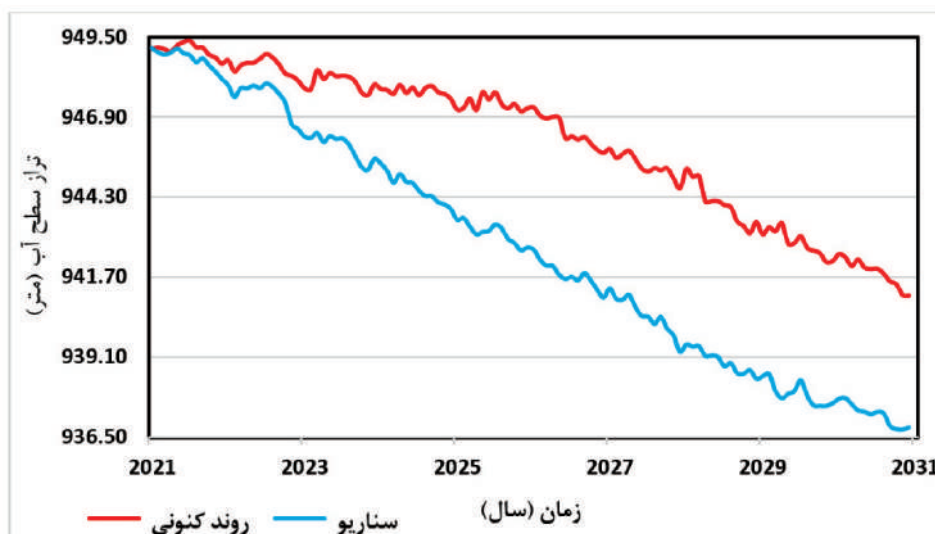
شکل ۱۲. نتایج سناریوهای اعمال شده در دوره ۱۰ ساله

جدول ۱. مقایسه میزان افزایش تخلیه از چاه های بهره برداری مناطق کف شکنی در هر دو سناریو پیشنهادی (برحسب میلیون متر مکعب در سال)

میزان تخلیه از چاه های بهره برداری				پهنه پیشنهادی برای کف شکنی
۱۰ سال بعد از اجرای سناریو افزایش پلکانی	بعد از ۱۰ سال مشابه روند کنونی	پنج سال بعد از اجرای سناریو افزایش پلکانی	بعد از پنج سال مشابه روند کنونی	
۱/۹۵	۱/۶۳	۱/۵۵	۱/۳۰	۱
۱/۹۱	۱/۵۹	۱/۵۲	۱/۳۹	۲
۳/۶۰	۳	۲/۸۶	۲/۳۸	۳
۳/۵۶	۲/۹۷	۲/۸۳	۲/۳۶	۴
۹/۳۴	۷/۷۸	۷/۲۲	۶/۰۲	۵

همبستگی بین عمق چاه‌ها و برخی از پارامترهای شیمیایی را نشان داده‌اند (Nair and Indu, 2021; Panda and Wahr, 2016; Kianoush et al., 2024; Alizadeh et al., 2017). با توجه به نتایج این پژوهش، برای تعیین عمق بهینه کفشکنی باید عوامل کیفی نیز در کنار عوامل کمی بررسی شوند. در گستره آبخوان باد-خالدآباد، افزایش عمق چاه‌ها ارتباط مستقیم با کیفیت آب آن‌ها دارد.

به منظور مقایسه افت سطح آب زیرزمینی تحت سناریو‌ها، هیدروگراف براساس میانگین تراز سطح آب چاه‌ها در دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی برای آبخوان باد-خالدآباد رسم شد (شکل ۱۳). افت سطح آب زیرزمینی تحت سناریو ۱ نسبت به سناریو ادامه روند کنونی حدود سه متر بیشتر است. پژوهش‌ها در مورد ارتباط عمق چاه‌های بهره‌برداری و هیدروژئوشیمی نتایج متفاوتی را نشان داده‌اند. بعضی



شکل ۱۳. میزان افت سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای اعمال شده در دوره ۱۰ ساله

## نتیجه‌گیری

شدید تراز سطح آب را به همراه خواهد داشت. بیشترین افت در ناحیه شرقی آبخوان است. بررسی کمی و زمانی EC و Cl نشان‌دهنده تغییرات کیفیت و افزایش EC در بخش شمالی آبخوان است. با توجه به این که جریان آب زیرزمینی از طرفین به مرکز دشت می‌باشد و در این بخش تراکم چاه‌های عمیق زیاد است، با فاصله گرفتن از مناطق تغذیه و حرکت به سمت بخش‌های تخلیه انتظار می‌رود کیفیت آب در این مناطق نامناسب باشد. این موضوع با نقشه موقعیت چاه‌های مستعد کفشکنی همخوانی دارد. افزایش عمق چاه‌های بهره‌برداری نیز باعث کاهش کیفیت و شوری آب می‌شود.

در این پژوهش، مدل عددی آب زیرزمینی آبخوان دشت باد-خالدآباد در بازه سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ تهیه شد. در مناطقی که بیشترین پتانسیل برای کفشکنی را دارند، پنج پهنه مشخص شد. بنا بر احتیاط سناریویی پلکانی برای پنج سال اول طراحی شد. در سال اول در مجموع چاه‌های پهنه ۱، ۲۰ درصد افزایش بهره‌برداری و در سال دوم، پهنه ۲ هم به مرحله قبلی اضافه می‌شود. به همین ترتیب تا سال پنجم و پهنه پنجم ادامه پیدا می‌کند. سپس پنج سال دوم به صورت گسترده در مجموع چاه بهره‌برداری با افزایش ۲۰ درصدی اعمال می‌شود. طبق نتایج، تا عمق ۹ متر کفشکنی مجاز است. عمق کفشکنی بیش از ۹ متر، افت

## منابع

- Brewer, K., Fogle, T., Stieve, A. and Barr, C., 2003. Uncertainty analysis with site-specific groundwater models: experiences and observations. US Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information, P.O. Box 62, Oak Ridge, TN: 37831-0062
- Ekrami, M., Ekhtesasi, M.R. and Malekinezhad, H., 2013. The Effects and Consequences of Climatic Drought on Time Delay and the Change in Water Discharge of Springs and Qanats (Case study: Yazd-Ardakan Plain). *Iran-Water Resources Research*, 9(2), 19-26.
- Ifabiyi, I.P., 2008. Depth of hand dug wells and water chemistry: Example from ibadan northeast local government area (L. G. A.), oyo-state, Nigeria. *Journal of Social Sciences*, 17(3), 261-266.
- Izbicki, J.A., Christensen, A.H., Newhouse, M.W., Smith, G.A. and Hanson, R.T., 2005. Temporal changes in the vertical distribution of flow and chloride in deep wells. *Groundwater*, 43(4), 531-544.
- Kianoush, P., Mahvi, M.R., Khah, N.K.F., Kadkhodaie, A., Shokri, B.J. and Varkouhi, S., 2024. Hydrogeological studies of the Sepidan basin to supply required water from exploiting water wells of the Chadormalu mine utilizing reverse osmosis (RO) method. *Results in Earth Sciences*, 2, 100012.
- Kim, J., Park, S., Kang, M., Choo, C.O. and Jeong, G., 2007. Analysis on Statistical Relationship between Groundwater Quality and Geology. *Journal of engineering geology*, 17(3), 445-453.
- Mahadeven, A. and Krishaswamy, S., 1984. Impact of Different Surface Sources of pollution on the Quality of Groundwater. *Applied Geography*, 15(3), 21-25.
- Nair, A.S. and Indu, J., 2021. Assessment of groundwater sustainability and identi-
- آقائباتی، علی، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- بیژنی، م.، مریدی، ع. و مجدزاده طباطبایی، م.، ۱۳۹۵. بررسی تاثیرات کف‌شکنی چاه‌ها بر پتانسیل برداشت آبخوان با استفاده از مدل ریاضی. پژوهش‌ات منابع آب ایران، ۱۲(۴)، ۸۳-۹۲.
- پاکدل، م.، قره محمودلو، م.، جندقی، ن.، فتح آبادی، آ. و نیک قوجق، ی.، ۱۴۰۱. تاثیر برداشت از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق بر روی افت سطح ایستابی و پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در دشت گرگان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۶(۶۴)، ۶۵-۸۴.
- رضایی، الف.، زینالزاده، ک. و نابغی، ج.، ۱۳۹۸. تعیین حداکثر عمق کف‌شکنی چاه‌های کشاورزی با تلفیق مدل‌های ریاضی. اولین کنگره بین‌المللی و چهارمین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی کاشان در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰.
- شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان، ۱۳۹۹. گزارش اندازه‌گیری منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی باد-خالدآباد (۴۸۰۳). معاونت حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان.
- قره محمودلو، م.، جندقی، ن. و صیادی، م.، ۱۳۹۸. تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴(۵۵)، ۱۲۹-۱۴۵.
- نبی‌زاده چمازکتی، ن. و جعفری، ه.، ۱۳۹۸. تخمین تغذیه به آبخوان مرزی سرخس با استفاده از مدل عددی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵(۵۷)، ۱۵-۲۷.
- Alizadeh, M.R., Nikoo, M.R. and Rakhshandehroo, G.R., 2017. Hydro-environmental management of groundwater resources: a fuzzy-based multi-objective compromise approach. *Journal of Hydrology*, 551, 540-554.
- Asimi, M.A., 1998. Effects of Liquid Waste on Surface and Underground Water in Ipada and Baboko Slaughtering Slab. Doctoral dissertation, B. Sc. Dissertation: Unpublished, Department of Agric Engineering, University of Ilorin, Nigeria.

- ifying factors inducing groundwater depletion in India. *Geophysical Research Letters*, 48(3), p.e2020GL087255.
- Panda, D.K. and Wahr, J., 2016. Spatiotemporal evolution of water storage changes in India from the updated GRACE-derived gravity records. *Water Resources Research*, 52(1), 135-149.
  - Perlinutter, N.M., Lieber, M. and Frawenthal, H.L., 1964. Contamination of Groundwater by Detergents in a Suburban Environment, South Farmingdale. Area, Long Island New York. U.S. Geological Survey Prof. Paper, 501C: 170-175.
  - Ronny, A., Erlani, N. and Jasman, N.H., 2019. Level of correlation in the depth of groundwater wells: Iron and chloride. *Indian Journal of Environmental Protection*, 39(8), 746-751.
  - Vorosmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P. and Davies, P., 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *nature*, 467 (7315), 555-561.