

طراحی فنی و ارزیابی اقتصادی توسعه فناوری تزریق آب به آبخوان

روش چاه‌محور ASR - مطالعه موردی یکی از آبخوان‌های کشور

مهدی زینلی حسونند* (۱)، حمیدکاردان مقدم (۲)، محمدرضا شعبانی (۱)

(۱) پژوهشگاه صنعت نفت

(۲) موسسه تحقیقات آب

* 881006.put@gmail.com

چکیده

ایران سالانه ۴۰۰ میلیارد مترمکعب بارش دارد که ۷۰ درصد از آن در اثر تبخیرسطحی یا روان آبی از دست می‌رود. از حدود ۹۰ میلیارد متر مکعب مصرف آب کشور، بیش از ۵۰٪ از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. لذا مدیریت تامین آب از طریق مخازن (سفره‌های) آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. در روش‌های تغذیه مصنوعی با رویکرد پخش سیلاب اغلب پس از یک دوره ۳ تا ۵ ساله به دلیل حجم بالای رسوبات تبدیل به حوضچه‌های تبخیری شده‌اند و عملاً بجای نفوذ آب، باعث تبخیر و هدر رفت آب می‌گردند. روش پیشنهادی در این مقاله راهکاری است برای فایق آمدن بر دو موضوع سیلاب و تبخیر سطحی در تامین آب. در این روش در ایام پربارش سال آب رودخانه بعد از فرایند مهار و پالایش از طریق چاه‌های تزریقی به آبخوان اضافه می‌شود و در ایام گرم سال امکان بهره‌برداری از آن توسط چاه‌های تولید امکان‌پذیر خواهد بود.

در این مطالعه پیشینه فناوری به همراه مطالعه موردی طراحی فرایند در یکی از آبخوان‌های کشور انجام شد. ضمن تهیه مدل قابل اعتماد رایانه‌ای از رفتار مخزن و هیدرودینامیک آب در این محیط متخلخل، به ازای ۸ سناریو تزریق از ۱ تا ۲۰ میلیون متر مکعب، اثر تزریق در افزایش سطح آب موجود در آبخوان بررسی شد. با استفاده از نرم‌افزار پراسپر وضعیت افت فشار در ستون چاه و میزان دبی تزریقی بررسی شد. نتایج بخش فنی نشان داد در این آبخوان به ازای چاه‌های تعریف شده توان تزریق روزانه ۱۰ هزار بشکه آب بدون نیاز به فشار اضافی وجود دارد.

همچنین ارزیابی اقتصادی نیز از میزان سرمایه‌گذاری، هزینه نهایی و درآمدهای پروژه برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد این فناوری امکان افزایش بازده ذخیره‌سازی در طرح‌های ابخیزداری کشور را دارد همچنین هزینه نهایی ذخیره‌سازی و تامین آب نسبت به روش ساخت سد و شیرین‌سازی و انتقال آب به مراتب اقتصادی‌تر است. در روش سدسازی بخشی از منابع ذخیره شده در اثر تبخیر سطحی (تماس آب و هوا) از بین می‌رود، اجرای آن نیازمند عملیات عمرانی بزرگ و چندسال زمان است و همچنین تنها به مدت یک سال قابلیت مدیریت جریان سطحی وجود دارد. در حالی که در روش پیشنهادی این محدودیت‌ها وجود ندارد.

۱- مقدمه و ادبیات فناوری

فناوری تغذیه مصنوعی آبخوان از طریق ذخیره و برداشت چاه محور یکی از فناوری‌های موثر در کاهش تنش آبی است. از جمله مزیت‌های این روش قیمت مناسب نسبت به روش سد سازی، شیرین سازی یا انتقال آب از دریا و همچنین حجم بالا ذخیره سازی و طولانی بودن مدت بهره‌برداری از آب ذخیره شده در آبخوان است. طی سال‌های اخیر تحقیقات بسیار زیادی از پروژه‌های اجرایی روش ASR در نقاط مختلف دنیا مانند قطر، امارات، هند و ویتنام گزارش شده است (۱) (۲) (۳) (۴) (۵) (۶). رشد جمعیت، رشد اقتصادی و تغییرات آب و هوایی از جمله مسائلی است که نیاز همیشگی و پایدار به منابع آب را الزامی می‌کند. کمبود آب شیرین و قابل استفاده در مناطق ساحلی از جمله مشکلات اساسی در رشد و توسعه مناطق ساحلی است. بر این اساس در سال ۲۰۱۵ بحران آب به عنوان اصلی‌ترین خطر جهانی معرفی شد. ذخیره سازی آب شیرین در لایه‌های زیرزمینی روشی سازگار، موثر و اقتصادی برای مدیریت منابع آب است. این روش با عنوان ذخیره سازی و برداشت از آبخوان (ASR)^۱ در ادبیات مهندسی آب معرفی شده است که شامل ذخیره سازی آب شیرین در ایام پربارش از طریق چاه در یک آبخوان مناسب و بهره‌برداری از آن در دوره کمبود آب است. این روش برای تامین آب آشامیدنی و آب صنایع روشی کارآمد است. از جمله مزیت‌های روش ASR نیاز محدود به فضای روی زمین و حفظ کیفیت آب است. همچنین آب دچار تبخیر سطحی نمی‌شود و آب ذخیره شده از آلودگی‌های اتمسفریک، بیولوژیک و انسانی محفوظ خواهد بود. یکی از مناطق دارای اولویت در استفاده از روش ASR مناطق ساحلی است. مناطق ساحلی در جهان پرتراکم‌ترین و دارای بیشترین تولید اقتصادی هستند به طوری که در سال ۲۰۲۰ حدوداً نیمی از جمعیت جهان در فاصله‌ی ۲۰۰ کیلومتری از نوار ساحلی زندگی می‌کنند (۷).

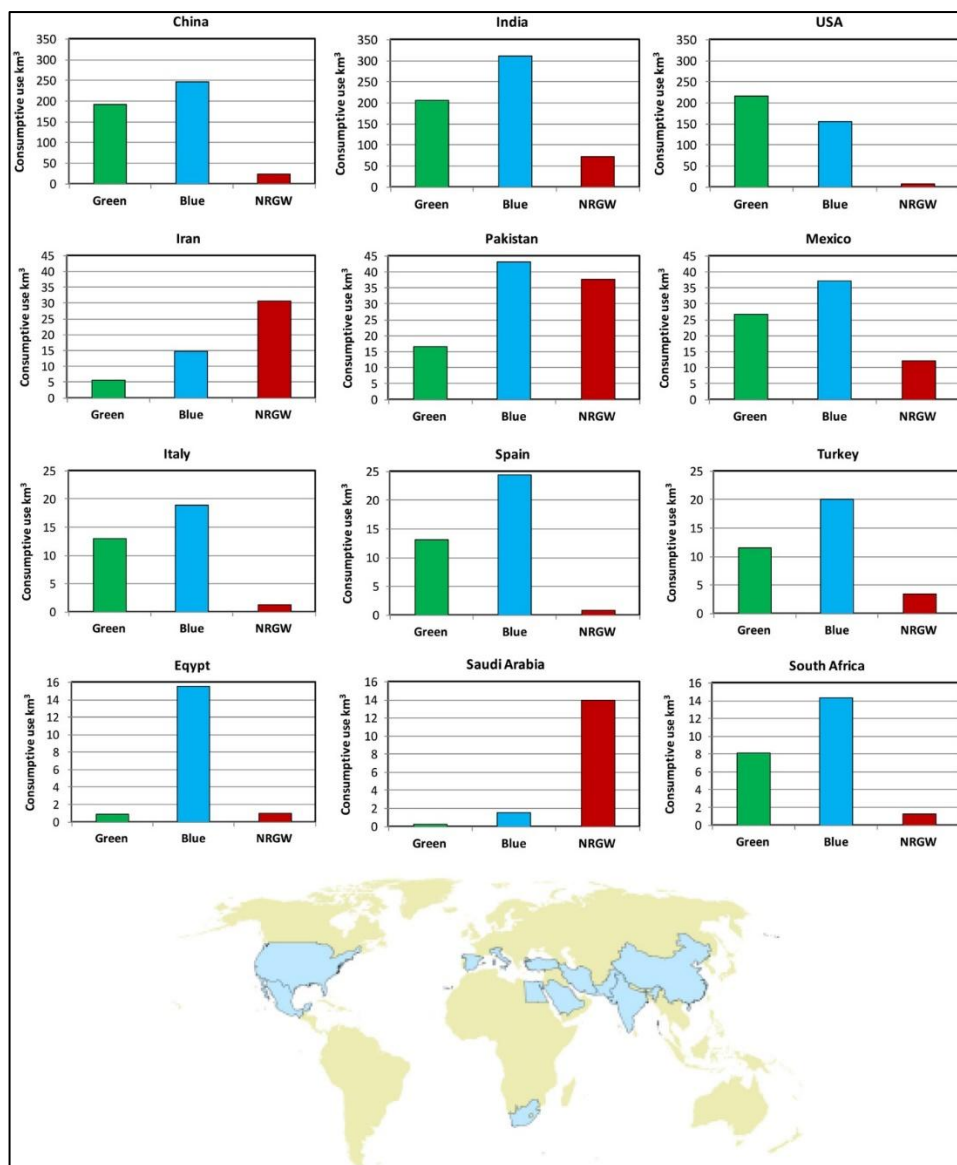
آبده یا آبخوان یک توده سنگ متراکم با محیط متخلخل مناسب برای ذخیره سازی سیال است. این توده سنگ تراوا در لایه های زمین اگر توسط یک لایه ناتراوا بالایی (پوش سنگ) محدود شود امکان ذخیره سازی حجم بالایی از سیالات سبک هیدروکربنی را پیدا می‌کند. این همان چیزی است که در مهندسی نفت به مخزن یا میدان نفتی و گازی معروف است. این توده سنگ اگر توسط یک لایه ناتراوای پایینی (کف سنگ) محدود شود امکان ذخیره سازی سیالات سنگین (آب شیرین) را تا میلیون‌ها سال فراهم می‌کند. این همانچیزی است که در مهندسی آب به عنوان آبخوان معروف است. مطالعات گسترده‌ای طی چنددهه اخیر برای فهم حرکت سیال و خواص سنگ و سیال در هر دو کلان رشته هیدرولوژی و مهندسی نفت انجام شده است. رابطه داری مهم‌ترین رابطه حرکت در محیط متخلخل سنگ است که در هر دو رشته برای تبیین حرکت نفت یا آب در لایه‌های زمین استفاده می‌شود (۸) (۹). موضوع تزریق آب به میداین نفتی یک حوزه علمی شناخته شده در مهندسی نفت است. از این دانش می‌توان جهت ذخیره سازی آب در لایه‌های زیر زمینی جهت تامین پایدار آن و مقابله با تنش آبی استفاده کرد (۱۰) (۱۱).

با توجه به مزیت بالای اقتصادی این مناطق، تامین آب آشامیدنی و آب مورد نیاز صنایع در این مناطق حائز اهمیت است. از سوی دیگر تنش آبی فصلی در این مناطق نیز بیشتر است. وجود آبخوان‌های شور و کم عمق و افزایش شوری دهانه رودخانه در فصول خشک از مشکلات اصلی مناطق ساحلی است. مطالعات نشان می‌دهد که حدود یک سوم از عملیات‌های ASR در آبخوان‌های آب شور ساحلی انجام شده است (۱۲). در کشور آمریکا یکی از روش‌های اصلی مدیریت آب در مناطق گرم و خشک، مانند ایالات تگزاس و آریزونا، استفاده از روش ASR در مقیاس بزرگ است. به عنوان مثال در سن آنتونیو با ساخت ۲۹ چاه ASR با ظرفیت تزریق روزانه ۲۵۰ هزار مترمکعب آب و ظرفیت تصفیه‌ی سالانه ۱۳۰ میلیون مترمکعب تاکنون بیش از ۲۰۰ میلیون

مترمکعب آب در این آبخوان ذخیره شده است. فاز اول این پروژه برای تامین ۳۷ میلیون مترمکعب آب مورد نیاز ۶۰ هزار خانواده با ۷/۵ میلیون دلار در سال ۲۰۰۱ اجرا شد. کل پروژه برای مدت ۵۰ سال حدود ۲۱۵ میلیون دلار تخمین زده شده است (۱۳).

یکی از مهمترین راهبردهای مقابله با کمبود آب شیرین در کشور ساحلی هلند، مستقل کردن مصرف کنندگان نهایی از آب شیرین خارجی به وسیله‌ی استفاده‌ی محلی و غیر متمرکز از آب شیرین اضافی در زمستان است. این هدف به وسیله‌ی فناوری ASR تحقق یافته است. در کشور ایران طی ۴ دهه‌ی اخیر جمعیت دو برابر شده است و این رشد جمعیت سبب افزایش سه برابری برداشت از منابع آب زیر زمینی شده است. میزان برداشت از آبخوان‌های کشور در سال ۱۳۵۰ معادل ۱۸ میلیارد مترمکعب بود که این رقم در سال ۱۳۹۴ به ۶۱ میلیارد مترمکعب یعنی بیش از ۵۰ درصد از کل آب مصرفی کشور افزایش یافته است. روش ASR با تامین منبع آب از محل روان آب‌ها و ذخیره‌ی آن در محلی با میزان تبخیر سطحی صفر، حائز اهمیت است. لازم به ذکر است که ایران در میان ۱۲ کشور با بیشترین استفاده از منابع آب زیرزمینی است؛ در حالیکه بخش اعظمی از منابع آب زیرزمینی مصرف شده از منابع تجدید ناپذیر استفاده شده است. منابع آب زیرزمینی با مبداء پوشش گیاهی و مبداء آب اضافی حاصل از آبیاری را به ترتیب آب سبز و آب آبی می‌نامند. این دو دسته از منابع آب، قابلیت تجدیدپذیری سالیانه دارند اما در مقابل منابع آب موجود در آبخوان‌های عمیق برای تجدیدپذیری نیاز به حداقل ۱۰۰ سال زمان دارند، که از این رو به منابع تجدیدناپذیر معروفند. در شکل ۱ توزیع مصرف ۱۲ کشور با بیشترین مصرف از منابع آب زیر زمینی ارایه شده است. وضعیت استفاده از منابع آب زیرزمینی در سه کشور ایران، عربستان و پاکستان وضعیت خطرناکتری نسبت به سایر کشورها دارد. از مهمترین کاربردهای فناوری ASR، امکان احیای آبخوان‌های قرمز رنگ (تجدیدناپذیر) است (۱۴).

در کشور ایران میزان بارش سالیانه ۴۰۰ میلیارد مترمکعب می‌باشد که به دلیل تبخیر سطحی و روان آبی، بیش از ۷۰ درصد از این بارش از دسترس خارج می‌شود. در یک نگاه مقایسه‌ای، اگرچه روش تغذیه مصنوعی از طریق ایجاد حوضچه‌های سطحی نسبت به روش ASR دارای هزینه‌ی کمتری است و عموماً از این روش در تغذیه‌ی مصنوعی استفاده می‌شود، اما این روش دارای معایب عمده‌ای است که استفاده از آن را با چالش جدی مواجه می‌سازد. در برخی مناطق ممکن است ساختار هیدرولوژی خاک به دلیل وجود لایه‌ی ضخیم رسی برای نفوذ آب مناسب نباشد، یا اینکه به دلیل بالا بودن سطح آب در مناطق نزدیک به نقطه‌ی تغذیه، آب به جریان سطحی مرتبط شود. همچنین به مرور زمان انسداد سطح تزریق در اثر وجود رس و جامدات همراه آب منجر به کاهش تزریق‌پذیری سطح می‌شود. علاوه بر این، در این روش مساحت قابل توجهی از زمین لازم است که موجب افزایش هزینه‌ی عملیاتی خواهد شد. همچنین میزان تبخیر سطحی در روش تغذیه مصنوعی نسبت به روش ASR قابل توجه است. در صورتی که در روش ASR مشکلات ذکر شده وجود ندارد.



شکل ۱ - وضعیت مصرف منابع آب زیر زمینی در ۱۲ کشور با بیشترین مصرف منابع آب زیر زمینی

فرایند ذخیره‌سازی چاه محور و بهره‌برداری از آبخوان راهکاری مناسب برای حل مشکل روان آب‌ها در فصل‌های پربارش و تامین آب موردنیاز صنایع، کشاورزی و شرب در فصل‌های کم بارش است. این روش راهکاری مناسب برای حل مشکل مدیریت آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. ویژگی‌های فیزیکی محیط متخلخل سفره آب زیرزمینی سبب کاهش قابل ملاحظه هدر رفت آب در فرایند تبخیر سطحی می‌شود. از سوی دیگر منابع آب زیرزمینی به دلیل تغذیه مکرر در این فرایند تبدیل به منابعی تجدیدپذیر با اطمینان بالا خواهند شد. برای مدیریت هزینه‌ها می‌توان از چاه‌های موجود بهره‌برداری کننده از منابع آب زیرزمینی به عنوان چاه تغذیه کننده استفاده کرد که در این صورت هزینه‌های اجرای پروژه کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

در بند الف و ج ماده ۱۹ قانون آب ایران و نحوه ملی شدن آن^۱ به لزوم مهار کردن سیلاب‌ها و ذخیره نمودن آب رودخانه‌ها در مخازن سطحی و زیرزمینی اشاره شده است. اگرچه این وظیفه در سالیان اخیر با جدیت همراه بوده اما موضوع اصلی در اجرای این نوع پروژه‌ها عدم استفاده از ظرفیت قانونی، کارایی پایین فناوری بکار برده شده و عدم جذب سرمایه‌گذار است. در این طرح روش تغذیه مصنوعی و تولید چاه‌محور (ASR)^۲ بررسی شده است که این موضوع با توجه به حساسیت مسائل کیفی و رسوب بسیار چالش‌برانگیز بوده و تاکنون در کشور مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از طرفی با توجه به حجم بالای بهره‌برداری در بخش شرب و تولید فاضلاب، می‌توان در پائین دست تصفیه‌خانه نیز با توجه به حجم پساب تولید شده از این موضوع استفاده کرد. لذا این پژوهش بدنبال استفاده از چاه‌های مسلوب‌المنفعه، چاه‌های خشک، گالری قنات در مسیر جریان آب زیرزمینی برای تغذیه آبخوان با بهره‌گیری از رواناب‌های فصلی و پساب است. دو موضوع بسیار مهم در این شرایط بحث کیفیت پساب و میزان رسوب در رواناب‌های فصلی است که می‌تواند باعث تنش تصمیم‌گیری گردد. لذا در مطالعات پایلوت به ارزیابی این موضوع و تدوین یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره از نظر اقتصادی، کیفیت آب، میزان رسوب و بهره‌برداری پرداخته خواهد شد.

۲- سوابق پروژه‌های اجرایی ASR

اولین چاه ASR با شیر کنترل‌کننده داخل چاه در منطقه هایلندرانج کلرادو در ۱۹۹۲ به منظور ذخیره آب تصفیه شده فاضلاب احداث شد. پس از آن برای بیش از ۴۰ شهرداری چاه‌های مشابه با عمق ۳۰۰ تا ۹۰۰ متر با دبی تزریق ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ (مترمکعب در روز به ازای هر چاه) حفر شد. در ایالت فلوریدا به منظور حفظ سطح آب زیرزمینی منطقه نیمه خشک و کشاورزی اورگلیدز^۳ حدود ۳۳۳ چاه ASR با هدف ذخیره‌سازی و بهره‌برداری از آب‌های سطحی در فصول خشک حفر شده است. اولین چاه ASR با هدف استفاده کشاورزی در منطقه اورگان در سال ۲۰۰۶ در مدار تولید قرار گرفت. طی این پروژه در فصل‌های پاییز و زمستان ۳/۷ میلیون مترمکعب آب سطحی در یک سفره آب زیرزمینی بازالتی ذخیره‌سازی می‌شود. این آب ذخیره شده در تابستان و اوایل پاییز جهت آبیاری و کشاورزی دوباره تولید می‌شود. در این پروژه چاه‌ها تزریق‌کننده و تولیدکننده یکی هستند و با تغییر مسیر پمپ نقش آن‌ها عوض می‌شود. شهرهای سن آنتونیو و ال پاسو در ایالت تگزاس جزو کم‌آب‌ترین مناطق شهری ایالات متحده هستند. در سن آنتونیو با هدف تامین آب شرب تاسیسات ASR کاریزو با توان ذخیره‌سازی ۱۴۸ میلیون مترمکعب ساخته شده است که در حال حاضر ۱۱۰ میلیون مترمکعب آب در آن ذخیره شده است (۱۵).

در کشور آمریکا یکی از روش‌های اصلی برای مدیریت آب در مناطق گرم و خشک مانند ایالات تگزاس و آریزونا استفاده از روش ASR در مقیاس بزرگ است. به عنوان مثال در سن آنتونیو با ساخت ۲۹ چاه ASR با ظرفیت تزریق روزانه ۲۵۰ هزار مترمکعب آب و ظرفیت تصفیه سالانه ۱۳۰ میلیون مترمکعب، تاکنون بیش از ۲۰۰ میلیون مترمکعب آب در این آبخوان ذخیره شده است. در لاس‌وگاس بیش از ۴۳۰ میلیون مترمکعب آب از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۸ ذخیره‌سازی شده است. این کار با ایجاد ۷۸ چاه تزریقی و با تامین آب از رودخانه‌ی دائمی صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۳ روزانه حدود ۴۵۰ هزار مترمکعب آب از طریق

^۱ <https://rc.majlis.ir/fa/law/show/96242>

^۲ Aquifer Storage and Recovery (ASR)

^۳ Everglades

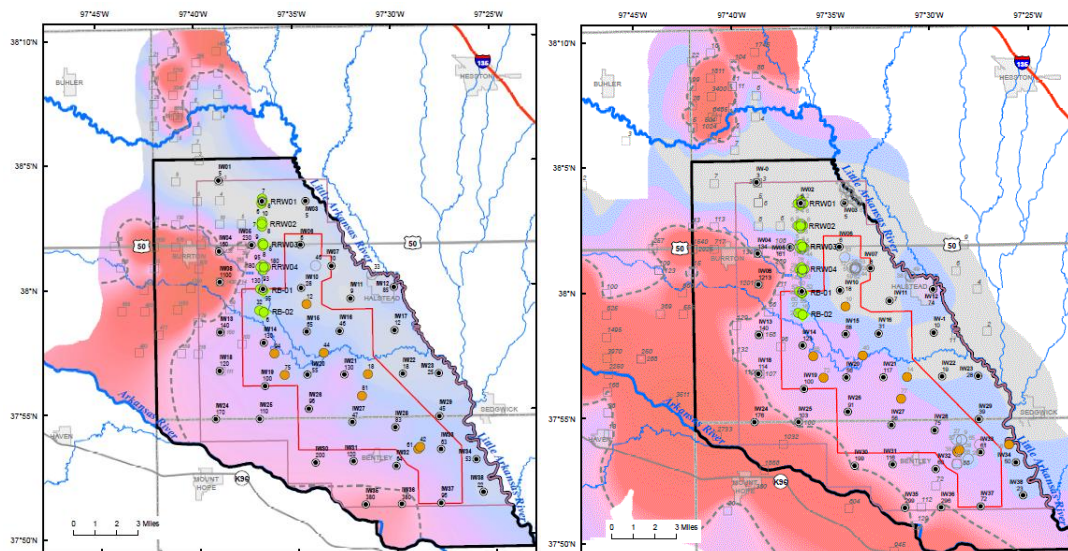
۵۳ چاه به آبخوان تزریق شده است در منطقه سنتینال و اتر کلورادو بیش از ۲۰ میلیون متر مکعب آب توسط ۱۹ چاه به آبخوانی با ظرفیت حدود ۸ میلیون متر مکعب از رودخانه سوزپالت^۱ تزریق شده است. بدیهی است بخشی از این آب تزریقی طی این مدت برداشت شده است. یکی از موارد جالب توجه، مقایسه هزینه اجرای عملیات ASR با احداث سد در منطقه‌ی لاس پاسوس^۲ است. که طی آن ۳۷۰ میلیون مترمکعب آب با هزینه‌ی ۷۰ میلیون دلار در آبخوان ذخیره شده است. در این پروژه از ۳۰ عدد چاه استفاده شده و از سال ۱۹۶۱ کار ذخیره و برداشت آغاز شده است. در مقابل سد Metropolitan's new dam east of Los Angeles با ظرفیت کمتر از یک میلیارد مترمکعب با هزینه ۲ میلیارد دلاری احداث شده است (۱۶). در شهرداری اسکودیل در آریزونا دولت با اختصاص بودجه ۱.۵ میلیون دلاری، چهار چاه ASR به منظور تامین سالانه ۴ تا ۵ میلیون مترمکعب آب برای شهروندان اجرا کرده است. منبع این آب از رودخانه‌ی کلورادو تامین می‌شود. عملیات تغذیه‌ی مصنوعی در این منطقه سابقه‌ای ۲۵ ساله دارد که تاکنون ۳۴۰ میلیون مترمکعب آب در آبخوان ذخیره شده است. در منبع زیر اسناد کامل قرارداد بین کارفرما و پیمانکار و طرح فنی پیمانکار به همراه تمامی استعلامات مربوط به سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به همراه قیمت تمامی تجهیزات و نیروی انسانی ارائه شده است که می‌تواند یک مرجع ارزشمند برای اجرای قراردادهای مشابه در کشور باشد. بر اساس این گزارش حفر ۴ چاه با ظرفیت ذخیره‌ی ۵ میلیون متر مکعب در طول ۹۰ روز با هزینه‌ی حدود ۱/۵ میلیون دلاری پیش‌بینی شده است. در شهر ویچا^۳ که روی آبخوان اکویس بد^۴ قرار دارد، استفاده از منابع آب زیرزمینی از سال ۱۹۴۰ آغاز شده است. در اثر برداشت بی‌رویه از این آبخوان تا سال ۱۹۹۳ سطح آب ۴۰ فوت افت کرده است. این افت یعنی معادل ۳۷۰ میلیون مترمکعب از حجم اولیه آبخوان مصرف شده است. اجرای همزمان تغذیه‌ی مصنوعی (از طریق حوضچه) و احداث چاه‌های ASR با تامین آب از رودخانه‌ی آرکانزاس سبب تغذیه‌ی سالانه ۱۳ میلیون مترمکعب آب به آبخوان شده است. این امر سبب بالا آمدن ۱۰ فوتی سطح آب در آبخوان نسبت به سال ۱۹۹۳ و ذخیره شدن ۶۲ میلیون مترمکعب آب تا سال ۲۰۱۳ شده است. تغییر دیگری که در آبخوان رخ داده است، تغییر غلظت کلر در آب آبخوان می‌باشد که تغییرات غلظت آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود. یکی از مسائل مهم در فرایند تزریق آب علاوه بر جبران تراز منفی آب، حفظ کیفیت و کاهش شوری آب است. این شکل به همین موضوع در یکی از پروژه‌های فعال آمریکا اشاره دارد.

1 South Platte River

2 Las Posas

3 Wichita

4 Equus Beds



شکل ۲ - تغییرات یون کلر در آبخوان اکویس بد پس از اجرای عملیات ASR - سمت راست مربوط به سال ۲۰۱۳، سمت چپ میانگین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۲ (۱۷)

یکی از مهم‌ترین مراکز فناوری ASR در دنیا، ایالت ساحلی فلوریدا است. در ۱۹۹۸ تنها ۶ تاسیسات ASR در این ایالت فعال بوده است که این تعداد در سال ۲۰۰۲ به ۲۶ تاسیسات افزایش یافته است. همچنین ۱۹ پروژه نیز مجوز ساخت دارد. بنا بر گزارش USGS بیش از ۱۰۰ تاسیسات ASR در دنیا وجود دارد. در فلوریدا جنوبی احداث حدود ۳۰۰ چاه ASR به منظور تزریق روزانه ۷ میلیون مترمکعب آب پیشنهاد شده است. در شهرهای مختلف این ایالت، عملیات ASR انجام شده است به عنوان مثال در تمپا^۱ با احداث ۸ چاه روزانه ۴۵ هزار مترمکعب آب را ذخیره می‌شود که برای این منظور یک خط لوله ۷/۲ کیلومتری کار انتقال آب را انجام می‌دهد. منبع آب این پروژه سیستم مخزنی رودخانه‌ی هیلزبورگ است^۲. چاه‌های این پروژه با قطر ۱۶ اینچ در عمق ۹۱ متری عملیات تزریق را انجام می‌دهند^۳.

این فناوری در سایر کشورهای جهان از جمله از جمله هلند و استرالیا نیز انجام شده است (۱۸) (۱۹) (۲۰). میانگین بارش در شش کشور عضو شورای همکاری‌های خلیج فارس بین ۷۰ تا ۱۳۰ میلی‌متر در سال است. از سوی دیگر رشد ۵ برابری جمعیت طی ۵۰ سال اخیر نیاز به تامین آب در این منطقه را افزون کرده است. براساس گزارش منیچ چاه پایلوت ASR در لیوا^۴ می‌تواند برای ۳ ماه آبی با حجم ۱۸۱ هزار مترمکعب در روز برای شهر ابوظبی تامین کند. همچنین در یک مطالعه موردی در ابوظبی توسط شرکت خدمات آب شلمبرگر مشخص شد بازده برداشت از آبخوان ۸۸ درصد است. همچنین آزمایش پایلوت ASR در منطقه نیزوا^۵ در امارات نشان داد آبخوان نامحدود این منطقه ظرفیت ذخیره‌سازی ۱/۸ میلیون مترمکعب آب را دارد. در آبخوان عمرادهام قطر پروژه ASR به عنوان ذخیره اضطراری آب مورد نیاز برای کشاورزی استفاده می‌شود. از آنجا که کارخانه‌های شیرین‌سازی

1 Tampa

2 Hillsborough River Reservoir system

۳ - به منظور آشنایی با حدود ۸۰ پروژه فعال ذبا در ایالات متحده به پیوست شماره‌ی ۱ در منبع شماره ۳ رجوع شود.

4 Liwa

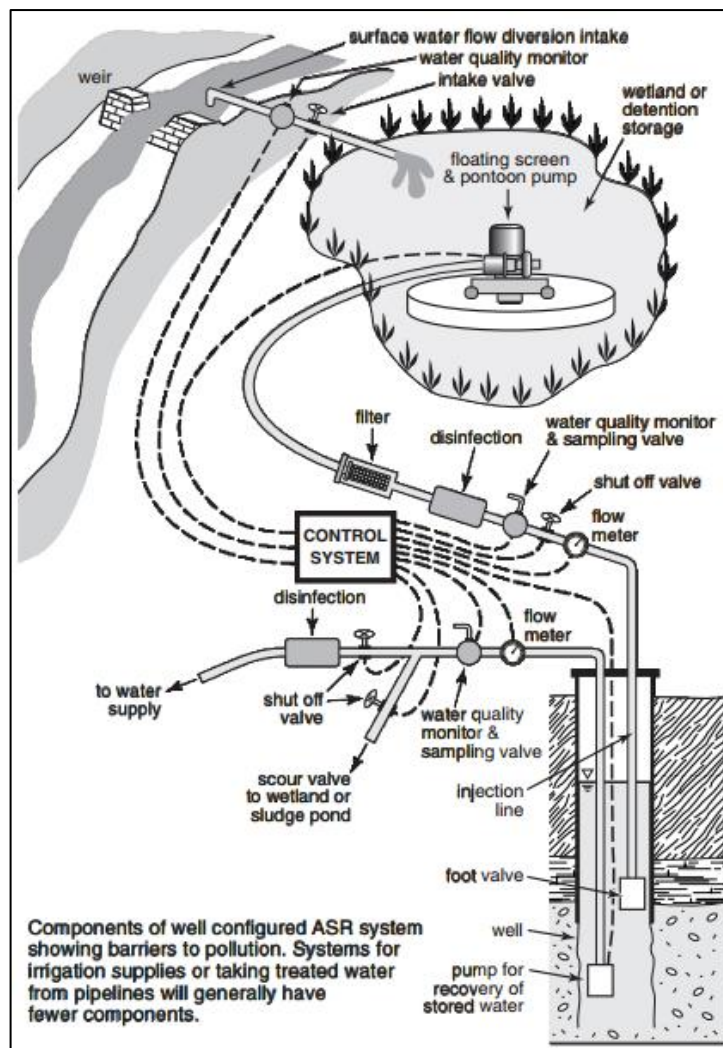
5 Nizwa

آب نقش عمده‌ای در تامین آب کشورهای این منطقه دارند و دبی تولیدی این کارخانه‌ها در طول سال ثابت است اما میزان مصرف متغیر است، لذا پروژه‌های ASR این منطقه نقش ذخیره‌سازی آب برای دوره پیک مصرف را دارند. منبع دیگر تامین آب پروژه‌های ASR، آب حاصل از تصفیه فاضلاب است. آبخوان آلوویال در وادی قیداد غربی در عربستان یکی از این پروژه‌هاست. در منطقه کباد کویت^۱ چاه‌های ASR ۹ ماه از سال را تزریق و ۳ ماه برداشت انجام می‌دهند. در این پروژه روزانه ۱۰۰ هزار مترمکعب آب توسط ۸ چاه با بازده برداشت ۷۷ درصد تولید می‌شود. میسر و همکاران در یک مطالعه به مقایسه هزینه تامین آب از طریق پساب به وسیله ASR و شیرین‌سازی پرداختند که در مورد اول هزینه هر مترمکعب بین ۰ تا ۰.۵ دلار و در مورد دوم بین ۲ تا ۵ دلار ارزیابی شد (۱۳). به منظور دسترسی به فهرستی از ۸۰ پروژه فعال ASR در امریکا و کانادا می‌توان به صفحات اولیه منبع (۳) مراجعه کرد.

۳- تجهیزات و اجزای فناوری تغذیه مصنوعی چاه محور

روش ASR بطور مفهومی دارای اجزا و مراحل زیر است: آب حاصل از سیلاب یا آب رودخانه در فصول سرد و پربارش توسط یک کانال انحرافی وارد یک حوضچه آرامش می‌شود. به دلیل نیروی گرانش و در اثر ماند دو تا سه روزه آب در این بند ذرات جامد و گل و لای موجود در آب ته نشین شده و آب با صافی مناسب قابلیت تزریق به آبخوان از طریق چاه را خواهد داشت. بنا به کیفیت آب آبخوان و هدف نهایی مصرف آب از واحدهای تصفیه مانند فیلتر ذرات یا گندزدا برای تصفیه آب تزریقی استفاده خواهد شد. آب جمع‌آوری شده و تصفیه شده توسط پمپ و با گذر از یک دبی سنج به چاه تزریقی وارد می‌شود. بنا به عمق چاه و فشار آبخوان تزریق می‌تواند تحت فشار یا براساس فشار ستون آب انجام شود. چاه تزریقی از نظر طراحی و تکمیل با توجه به جنس خاک منطقه می‌تواند سیمانکاری یا مشبک‌کاری شده باشد. در صورت تکمیل دوگانه همین چاه در ایام گرم سال قابلیت تولید آب را داراست. در این حالت از پمپ تزریق می‌توان به عنوان پمپ تولید نیز استفاده کرد. یک طراحی مفهومی از این فناوری در شکل ۳ ارائه شده است.

¹ Kabd area in Kuwait



شکل ۳ - الگوی تجهیزات و نحوه‌ی قرارگیری آنها در یک پروژه‌ی ASR (۱۳)

در طراحی عملیات ASR موارد زیر لازم است در نظر گرفته شود:

جنس لوله جداری چاه: طراحی اولیه‌ی لوله جداری یک چاه ASR مشابه چاه‌های تولیدی معمولی است. با این تفاوت که لوله‌های فولادی چاه‌های ASR به مرور در اثر وجود اکسیژن محلول در آب تزریقی و یون کلر موجود در آب برداشتی، دچار اکسایش و زنگ‌زدگی می‌شود. پتاسیل زنگ‌زدگی در آبخوان‌های ساحلی و شور بیشتر است. از سوی دیگر تجمع ذرات خوردگی فلز در ته چاه عامل انسداد جریان تزریقی خواهد بود. البته جامدات موجود در آب تزریقی نقش بسیار مهم‌تری در انسداد چاه دارند. موضوع انسداد در آبخوان‌های با تراوایی کم بیشتر رخ می‌دهد. یک راه حل برای حذف خوردگی فلزی، استفاده از لوله‌های با جنس پلیونیل کلراید (PVC) یا لوله‌های فایبرگلاس است. روش دیگر استفاده از پوشش اپوکسی یا فولاد ضد زنگ رده‌ی ۳۰۴ و ۳۱۶ در لوله جداری است.

قطر لوله چاه: لوله جداری چاه باید دارای قطر داخلی متناسب با دبی پیش‌بینی شده و میزان سرعت چرخش پمپ باشد. قطر چاه‌های ASR مشابه قطر چاه‌های تولیدی معمولی مشابه است مگر در شرایطی که در برنامه چاه تزریق چندگانه (چند لوله‌ی

اضافی) و نیاز به اضافه کردن تجهیزاتی مانند خط هوا، کابل‌های الکتریکی برای حسگر و پمپ درون چاهی باشد. اغلب چاه‌های ASR دارای قطر داخلی ۱۲ اینچ هستند (محدوده‌ی قطر متداول بین ۶ تا ۱۷ اینچ است). همچنین از نسبت قطر خارجی به ضخامت ۱۷ برای مدل PVC آن استفاده می‌شود. طراحی دیگر چاه مخصوصا در چاه‌های عمیق استفاده از دو قطر متفاوت با توجه به عملکرد و عمق چاه است. در این حالت از یک لوله با قطر کمتر در بخش پایینی چاه استفاده می‌شود. این بخش در ارتباط با سطح آبخوان قرار داد. در بالای این لوله از پمپ برای انتقال آب به سطح استفاده می‌شود. از لوله‌های PVC تا عمق ۱۵۲ متری بدون نگرانی از مچالگی (فشار ۲۲۴ پام^۱ در دمای اتاق) می‌توان استفاده کرد و تا عمق ۳۰۴ متری نیز مواردی از استفاده از آن وجود دارد. برای عمق‌های بیشتر توصیه می‌شود که از لوله‌های فولادی استفاده شود. همچنین پشت لوله‌ی جداری، فضای خالی برای سیمانکاری به قطر حداقل ۵ سانتی‌متر لازم است. لذا برای جای‌گذاری لوله‌ی جداری مشخص، قطر چاه حفاری شده (مته) باید ۱۵ سانتی‌متر بیشتر از قطر لوله‌ی جداری باشد. برای سیمان‌کاری اغلب از سیمان پوزولان یا مخلوط سیمان و بنتونیت به دلیل گرمای تولیدی کمتر، استفاده می‌شود.

عملکرد لوله و مقاومت در برابر فروپاشی^۲: صرف نظر از جنس لوله‌ی جداری بایستی بررسی شود که لوله‌ی انتخابی مقاومت کافی برای جلوگیری از مچالگی و گسیختگی را تحت تاثیر فشار سیمانکاری یا سازند یا کشش ناشی از وزن رشته‌ی درون چاهی را دارد. این بررسی‌ها در مورد لوله‌های PVC از اهمیت بیشتری برخوردار است. روش API 5C3 روشی برای اندازه‌گیری مقاومت در برابر فروپاشی عملکرد برای لوله‌های فولادی است که عددی بین ۰/۱۲ تا ۰/۳ پام بر متر^۳ است. دقت شود که ۰/۱۳ پام بر متر معادل فشار حاصل از ستون آب است. در صورتی که سازند متشکل از مواد تحکیم نیافته^۴ باشد، مقاومت در برابر فروپاشی حدود ۱ پام بر فوت است. با ضریب اطمینان ۵۰ درصد برای چاهی با عمق ۱۵۲ متر مقاومت در برابر مچالگی لوله حداقل باید ۷۵۰ پام باشد. البته وجود سیمان اطراف لوله جداری یک مقاومت اضافی برای جلوگیری از مچالگی ایجاد می‌کند.

سیمان‌کاری: سیمان‌کاری چاه‌های ASR همانند چاه‌های معمولی از ته چاه به سوی سطح ادامه می‌یابد. این کار برای اطمینان از انسداد جریان احتمالی سیال بیرون از لوله‌ی جداری است. در برخی از چاه‌ها از گراول پک در انتهای چاه استفاده می‌شود. در ناحیه‌ی فلوریدا برای بررسی عملکرد چاه‌های ASR از نوعی آزمایش دوره‌ای به نام آزمون یکپارچگی مکانیکی^۵ (MIT) استفاده می‌شود. هدف از این آزمایش، اطمینان از عدم وجود نشتی در لوله‌ی جداری که سبب نفوذ آب به لایه‌های غیر آبخوانی در زمان تزریق یا عدم جریان یافتن آب از آبخوان در زمان برداشت می‌شود. این آزمون بعد از انجام سیمان‌کاری و قبل از حفاری کردن پلاگ سیمانی نیز انجام می‌شود. روش انجام تست شامل پرکردن لوله‌ی جداری با مایع و ایجاد فشار ۵۰ پامی و بررسی تغییرات فشار برای ۳۰ دقیقه تا یک ساعت است. اگر تغییرات فشار در این مدت کمتر از ۱۰٪ باشد، نتایج آزمون رضایت بخش است. در صورت افت ناگهانی فشار چاه، آزمون نشان‌دهنده‌ی وجود نشتی در لوله‌ی جداری است و ادامه‌ی عملیات به تصمیم پیمانکار برای رفع نشتی یا ساخت چاه جدید منوط خواهد شد. در لوله‌های جداری که به‌صورت پیچ و رزوه یا جوشکاری

1 psi

2 Yield Strength and Collapse Resistance

3 Psi/ft

4 Unconsolidated

5 Mechanical integrity testing

به هم متصل شده‌اند اغلب این آزمون با موفقیت انجام می‌شود. در چاه‌های تکمیل شده با لوله‌ی PVC نیز ممکن است افت فشار اولیه در اثر انبساط کشسان ذاتی لوله باشد. در این صورت درصد قابل قبول تست فشار در این چاه‌ها بیشتر است.

صفحه مشبک: در سازندهای تحکیم نیافته یا سازندهای تحکیم یافته^۱ مستعد تولید ماسه، از توری^۲ برای کنترل تولید ماسه استفاده می‌شود. سه نوع مختلف توری مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از:

- صفحه‌ی سیم‌پیچ^۳ (که بیشتر در چاه‌های افقی استفاده می‌شود).
- صفحات پیش‌پک^۴ (که دارای دو صفحه‌ی توری با یک دالیز پر شده از گراول است)
- ایجاد درز در لوله‌ی ناحیه تولیدی

در صورت عدم استفاده از گراول پک، اندازه‌ی چاک‌های^۵ لوله به صورتی انتخاب می‌شود که امکان گذردادن ۶۰٪ از مواد آبخوان وجود داشته باشد. البته این مقدار در آبخوان‌های ناهمگن، که دارای لایه‌های کوچک دانه هستند، کمتر از ۲۰٪ است. در صورت وجود دانه‌های بسیار ریز اندازه‌ی چاک‌ها ممکن است تا ۰/۰۰۵ اینچ (۰/۱۲۷ میلی‌متر) انتخاب شود. در اغلب موارد اندازه‌ی چاک‌ها حدوداً ۰/۱ اینچ (۲/۵ میلی‌متر) می‌باشد. در صورت انتخاب چاک بزرگتر امکان کاهش مقاومت مچالگی لوله افزایش می‌یابد. وجود گراول پک یکی از ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌های کنترل تولید ماسه است. اندازه‌ی گراول‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که چاک‌های لوله امکان نگهداری ۹۰٪ آنها را داشته باشد. در مقایسه با یک چاه تولیدی معمولی، چاک‌های یک چاه ASR باید اندکی بزرگتر باشد. همچنین تا حد امکان از گراول پک نازک استفاده شود. در زمان انتخاب صفحه توری لوله، باید اثر چاک‌های ایجاد شده بر مقاومت مچالگی لوله در نظر گرفته شود. در چاه‌های افقی یا جهت‌دار قطر چاه کمتر در نظر گرفته می‌شود اما به دلیل طول زیاد آنها ظرفیت انتقال آب بیشتر است.

اثر آبخوان و سازند: اغلب چاه‌های ASR در آبخوان‌های آرتزین^۶ (محدود) احداث می‌شوند که سرعت آب زیرزمینی کم و انتقال آلودگی در آنها نیز کمتر است. آبخوان‌های عمیق با تغذیه‌ی طبیعی محدود، گزینه مناسب برای اجرای عملیات هستند. همچنین برخی عملیات‌های ASR در آبخوان‌های نامحدود^۷ نیز انجام می‌شود به خصوص در شرایطی که عمق تزریق تا سطح آب قابل توجه باشد. در این شرایط فشار تزریق کمتری برای اجرای پروژه نیاز است. در اغلب موارد آب تزریقی به آبخوان محدوده‌ای حبابی شکل در اطراف چاه ایجاد می‌کند. در سازندهای تحکیم یافته امکان تکمیل چاه به صورت حفره باز وجود دارد. این سازندها اغلب شامل ماسه سنگ، کارست یا سنگ آهک شکاف‌دار هستند. در صورت شکاف‌دار بودن، تخلخل شکاف بخش عمده‌ی ذخیره و حرکت آب در زمان برداشت و تزریق را انجام می‌دهد. در سازندهای تحکیم نیافته باید از گراول پک برای تکمیل چاه استفاده کرد. در صورتی که کیفیت آب تزریقی و درجا مشابه باشند و واکنش ژئوشیمیایی رخ ندهد، طراحی چاه ASR بسیار

-
- 1- Consolidated
 - 2- Screen
 - 3- Wire-wrap screen
 - 4- Pre-packed screens
 - 5- Slot size
 - 6- Artesian aquifers
 - 7- Water table aquifers

مشابه یک چاه تولیدی معمولی خواهد بود. اگر در چاه تولیدی منطقه از توری استفاده می‌شود یا به‌صورت حفره باز تکمیل می‌شود چاه ASR ی پیشنهادی نیز دارای چنین طراحی است. در آبخوان‌های شور، تزریق در لایه‌های باریک گزینه‌ی مناسبی خواهد بود. در این حالت اختلاط آب شیرین تزریقی و آب شور درجا حداقل خواهد شد. در صورت محدودیت در تراوایی، فضای روزمینی، عمق محدود، نگرانی از فرونشست و مخروطی شدن آب شور، استفاده از چاه افقی گزینه‌ی مناسب به نظر می‌رسد. در صورتی که ضخامت آبخوان زیاد باشد یا کیفیت آب درجا پایین باشد یا آبخوان نامحدود باشد لازم است برای ضریب برداشت مناسب عملیات در دبی بالا و زمان تزریق بالا انجام شود. در این حالت به دلیل حجم بالای تزریق، ضریب برداشت بالاتر و کیفیت آب تولیدی نیز بالاتر خواهد بود. در اکثر موارد، تزریق در آبخوان‌های شیرین دارای بازده برداشت ۱۰۰٪ خواهد بود. در آبخوان‌های شور به دلیل اختلاط و کاهش کیفیت آب این بازده کمتر خواهد بود و تحلیل اقتصادی براساس نتایج فنی باید صورت گیرد. علاوه بر کیفیت آب درجا، موضوع چالش ژئوشیمیایی عامل دوم در انتخاب آبخوان و محدوده‌ی تزریق می‌باشد. روند عمومی برای کسب اطلاعات لازم در این زمینه شامل نمونه‌گیری از سنگ آبخوان، آنالیز سنگ، نمودارگیری ژئوفیزیکی و آزمون کیفیت آب در محدوده‌ی انتخابی آبخوان است. اگرچه بدون این اطلاعات تصمیم‌گیری بسیار سخت بوده اما تحلیل عملکرد اولین چاه اطلاعات مناسبی برای طراحی چاه دوم و چاه‌های بعدی به دست می‌دهد.

تاج چاه و تجهیزات درون چاهی: خصوصیات تاج چاه و تجهیزات درون چاهی نقش موثری بر کارایی، قیمت و زمان اجرای پروژه دارد. یکی از این خصوصیات انتخاب جنس مناسب تجهیزات است. استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی که سبب کاهش تولید و ورود ذرات خوردگی به درون چاه می‌شود، در اولویت است. همچنین لوله‌کشی صاف که سبب کاهش ماند ذرات جامد در مسیر جریان می‌شود حائز اهمیت است. توجه به این نکات سبب کاهش سرعت انسداد، دوره‌ی بازتوسعه و قوانین نظارتی مربوط به دفع آب در عملیات شست‌شوی چاه می‌شود. در تجهیزات سرچاهی و درون‌چاهی از لوله‌های گالوانیزه به دلیل PH کمتر از خنثی و خوردگی الکتروشیمیایی باید اجتناب شود. در انتخاب و طراحی تجهیزات درون چاهی باید به موضوع معکوس شدن جریان در دوره‌های تزریق و تولید دقت شود و ابزارها قابلیت کار در هر دو مسیر جریانی را داشته باشند. پکرها^۱ ارتجاعی^۱ پیشنهاد مناسبی برای انسداد جریان در ایجاد جریان معکوس است. نمونه‌ی این فناوری در کارولینای جنوبی^۲ به کار رفته است که چاه ASR چندین سال بدون مشکل با لوله‌ی PVC و پمپ ۲۵ اسب بخار موتور غرقابی^۳ در عمق ۴۹ متری دبی ۵۷۵ گالن بر دقیقه (۳۱۳۴ مترمکعب بر روز) را تامین می‌کند. موضوع مهم دیگر توجه به مقاومت اتصالات در رشته درون‌چاهی^۴ است. مقاومت اتصال^۴ حداقل ۴ برابر وزن تعلیق پیشنهاد می‌شود. برای عمق‌های بیش از ۱۵۲ متر استانداردهای API^۵ برای اتصالات باید در نظر گرفته شود و نه استانداردهای NPT^۶. طور کلی سرمایه‌گذاری روی فولاد ضد زنگ در تجهیزات درون‌چاهی چاه ASR منطقی است.

از دیگر خصوصیات تاج چاه و تجهیزات درون چاهی، توانایی برقراری جریان برگشتی به منظور خارج کردن جامدات احتمالی درون خطوط لوله است. دبی تخلیه در جریان برگشتی حداقل باید به اندازه‌ی بالاترین دبی تولیدی مورد انتظار چاه باشد. همچنین

- 1- Inflatable packers
- 2- Mt. Pleasant, South Carolina
- 3- 25 HP submersible motor
- 4- Joint Strength
- 5- American Petroleum Institute
- 6- National Pipe Taper

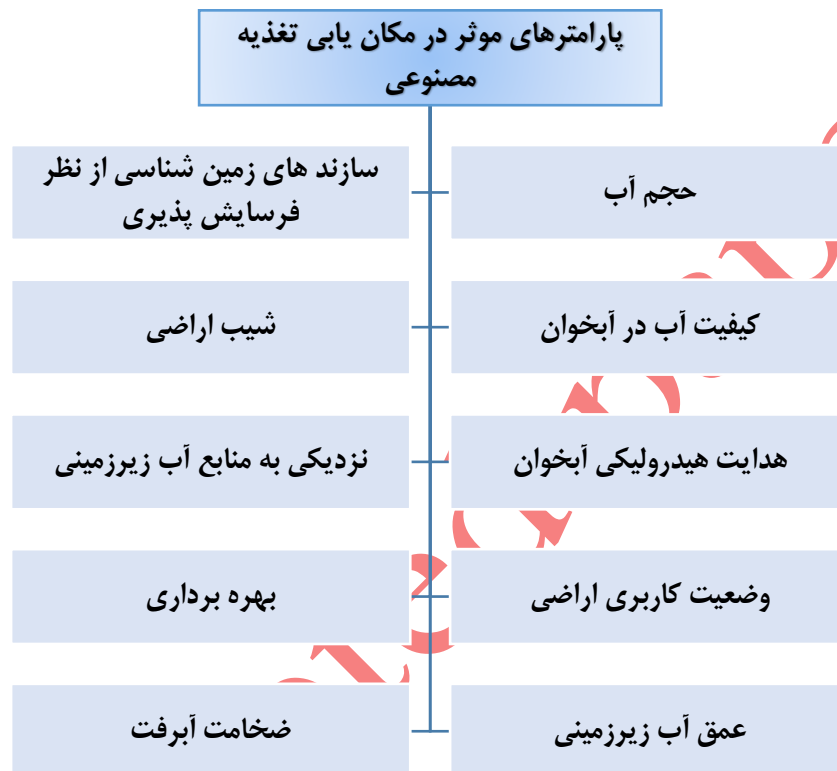
این آب تخلیه شده باید مسیری به یک گودال یا واحد تصفیه داشته باشد. مدت زمان تخلیه می‌تواند از ۱۰ دقیقه تا ۲ ساعت باتوجه به میزان مواد جامد و طول چاه متغیر باشد.

سایر تجهیزات ضروری: در همه‌ی چاه‌های ASR لوله‌ی جداری حداقل به ارتفاع یک فوت از سطح زمین (یا سطح سیل گیر) ادامه می‌یابد. اطراف تاج چاه یک اتاق چاه تعبیه شود. در برخی شرایط چاه در گودالی سیمانی قرار دارد. این نوع طراحی در مناطق شهری یا پارک‌ها مرسوم است. این نوع طراحی به دلیل دسترسی بهتر به تاج چاه توصیه می‌شود. استفاده از شیرهای کنترل کننده فشار در مسیر خط تزریق و تولید نیز از دیگر تجهیزات لازم است. هم‌چنین شیرهای کاهنده‌ی فشار برای تنظیم دبی تزریق و تولید استفاده می‌شود. یک نشانگر سطح آب نیز برای اندازه‌گیری سطح مایع نیاز است. منبع تغذیه‌ی برق به منظور تامین روشنایی، و برق مورد نیاز برای وسایل جانبی مانند ابزارهای نمونه‌گیری و رایانه‌ها لازم است. این منبع تغذیه متفاوت از تامین برق لازم برای تامین انرژی ابزارهای ثابت مانند پمپ‌ها است. از دیگر ملزومات یک پروژه‌ی ASR وجود تجهیزات مشاهده‌ای یا یک چاه مشاهده‌ای برای پایش وضعیت آب در آبخوان است. مسیر دسترسی مناسب، امکان ارتباط از راه دور نیز از دیگر ملزومات پروژه است. از جمله مهم‌ترین اطلاعاتی که باید به صورت برخط به مرکز کنترل ارسال شود عبارتند از: روشن یا خاموش بودن پمپ، اخطار توقف پمپ، وضعیت شیر کنترل کننده‌ی فشار تزریق و تولید، شاخص سطح آب، سطح کلر، دبی تزریق و تولید، کنترل شیرهای عملیاتی، حسگرهای دما، هدایت الکتریکی، فشار و کدورت سنجی. از دیگر تجهیزات قابل نصب، فیلتر گرانولی ماسه جهت جداسازی جامدهای احتمالی موجود در جریان آب است. این فیلتر غیر از واحد تصفیه‌ی اولیه است که کار جداسازی اصلی را این واحد انجام می‌دهد. جداکننده‌ی گاز^۱ تجهیز دیگری است که قابلیت نصب دارد اگرچه نصب آن اختیاری است اما برای دوام پروژه مفید است. این تجهیز از طریق کاهش اکسیژن محلول در آب تزریقی سبب کاهش خوردگی لوله‌ها و تجهیزات فلزی، کاهش واکنش‌های احتمالی ژئوشیمیایی و میکروبی و در نهایت بهبود تزریق‌پذیری سیال می‌شود. در برخی مناطق که شاخص pH آب تزریقی به صورت فصلی متغیر است در نظر گرفتن تجهیزات تنظیم کننده‌ی pH پیشنهاد می‌شود. مقدار pH پایین، خوردگی و واکنش‌های ژئوشیمیایی را تشدید می‌کند. در مقابل pH بالا خطر تشکیل رسوب کربنات کلسیم را در پی دارد. در صورت تایید استفاده از تنظیم کننده‌ی اسیدیت آب، باید فضای مناسب برای مخازن ذخیره‌ی مواد شیمیایی مرتبط در نظر گرفته شود (13).

۴- تهیه مدل رایانه‌ای و شبیه‌سازی فرایند در آبخوان مورد مطالعه

جهت بررسی و مکان‌یابی مناسب عرصه‌های تغذیه مصنوعی معیارهای موثر در یک مکان‌یابی می‌بایست شناسایی شود. مطالعات زیادی در خصوص مکان‌یابی و تعیین پارامترهای موثر بر مکان تغذیه مصنوعی انجام شده است که جمع‌بندی این مطالعات حاکی از این موضوع است که ذات و خصوصیات هر منطقه از دیدگاه‌های عرصه طبیعی در تعیین پارامترهای موثر بسیار مهم و حائز اهمیت است. هر منطقه از نظر خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی با سایر مناطق متفاوت بوده و تعیین یک الگو یک مجموعه‌ای از پارامترها برای مکان‌یابی نمی‌تواند دارای راندمان و بهره‌وری مناسبی باشد. براین اساس با توجه به مطالعات مختلف و ارزیابی طرح‌های مختلف تغذیه مصنوعی در داخل و خارج از کشور، هشت فاکتور اصلی جهت مکان‌یابی شناسایی شده که براساس این پارامترها و تهیه این پارامترها در محیط GIS و همپوشانی این لایه‌ها مکان مناسب جهت تغذیه مصنوعی انجام

می‌گیرد. همچنین در شرایطی که هدف استفاده از پساب تصفیه شده جهت تغذیه مصنوعی باشد معیارهای کیفی و غلظت پساب تصفیه شده و جنس خاک و محیط غیراشباع بسیار حساس است. جنس محیط غیراشباع آبخوان در فرآیند خودپالایی آلاینده‌ها و حذف پارامترهای کیفی نقش مهمی دارد لذا ضخامت آبرفت و جنس آبخوان جهت تدقیق انتقال آلاینده‌ها به پارامترهای موثر در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی می‌بایست افزوده گردد. جهت فلوچارت پارامترهای لازم در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی را در شرایط بهره‌برداری از منابع آب متعارف (سیلاب) نشان می‌دهد.



شکل ۴ - فلوچارت پارامترهای لازم برای مکان‌یابی تغذیه مصنوعی (۱۲)

مراحل مختلف تهیه مدل ریاضی تا حصول نتیجه مورد نظر در یک منطقه، به ترتیب خاص (پروتکل مدل‌سازی^۱) می‌بایست صورت پذیرد که شامل هدف‌گذاری انجام مدل، طراحی مدل مفهومی، انتخاب کد، واسنجی^۲، صحت‌سنجی و پیش‌بینی^۳ می‌شود. بنابراین در ابتدا لازم است وضعیت هندسه آبخوان، نوع سازند تشکیل‌دهنده آبخوان، وضعیت مرزهای هیدروژئولوژیک و پارامترهای مؤثر در آبخوان شناسایی گردد. ساده‌ترین راه جهت دسترسی به این هدف تهیه مدل مفهومی^۴ از آبخوان است. مدل مفهومی شامل گردآوری و تفسیر داده‌های صحرایی و شناخت سیستم طبیعی آبخوان می‌باشد. کیفیت شبیه‌سازی تا حدود زیادی به معتبر بودن فیزیک مدل و کیفیت داده‌های ورودی بستگی دارد. پارامترهای ورودی متعددی از مدل می‌بایست از داده‌های فیزیکی

-
- 1 - Modeling Protocol
 - 2 - Calibration
 - 3 - Prediction
 - 4 - Conceptual Model

آبخوان استخراج گردند. جهت طراحی و ساخت شرایط معادل ساده شده در کامپیوتر، اطلاعات زیادی از سیستم طبیعی مورد نیاز می‌باشد. خطاهای موجود در مدل مفهومی نمی‌توانند در طی واسنجی مدل یا در مراحل نهایی مدل بدون بازبینی کلی، تصحیح گردند. مدل مفهومی بایستی به گونه‌ای تهیه گردد که معرف وضعیت طبیعی سیستم باشد. به طور کلی مراحل ذیل را باید در تهیه یک مدل مفهومی در نظر گرفت:

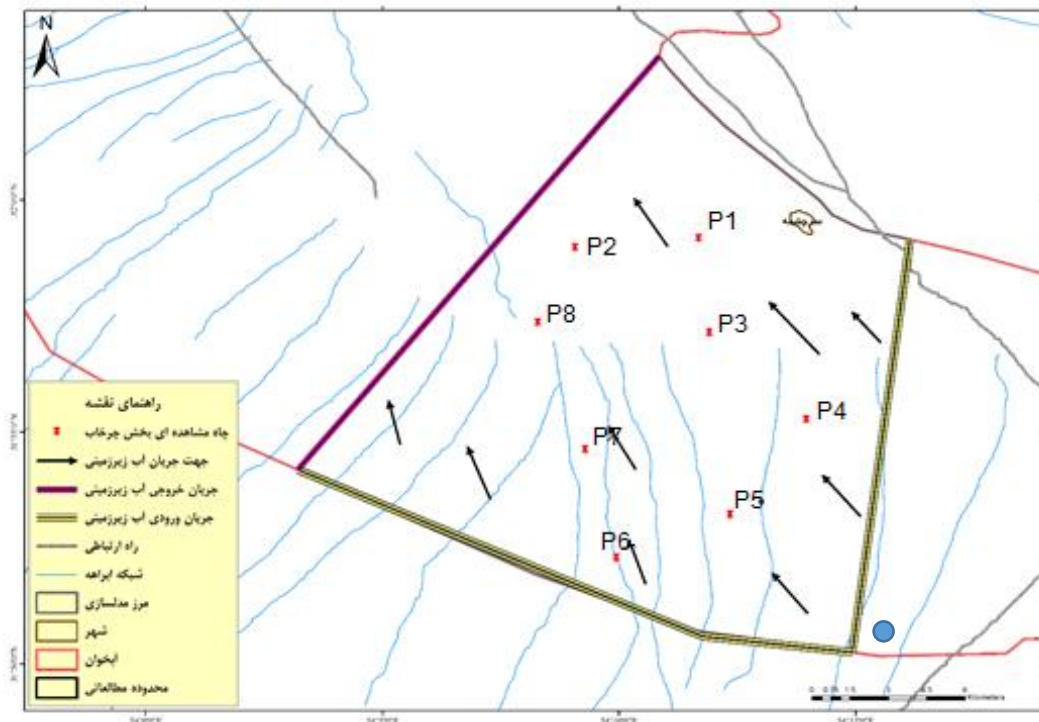
- بررسی هندسه آبخوان و تعیین محدوده مدل؛
- بررسی ویژگی‌های زمین شناسی محدوده مدل؛
- تعیین جریان حاکم بر آبخوان (یک بعدی - دو بعدی - سه بعدی)؛
- تعیین جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان؛
- تعیین شرایط اولیه مدل‌سازی؛
- مشخص نمودن شرایط مرزی و ارتباطی که آبخوان مورد نظر با خارج از محدوده دارد.

اساس کار مدل‌سازی آب زیرزمینی بر مبنای تهیه مدل مفهومی است. بدین منظور پیش از شروع مدل‌سازی ضروری است اطلاعاتی با جزییات کامل در خصوص هندسه و وضعیت آب زیرزمینی منطقه مورد بررسی قرار بگیرد. جهت نیل به این هدف، برای مدل بخش‌های مختلف آبخوان شامل حد مدل‌سازی، شبکه‌بندی مدل، مرزهای آبخوان و مدل، شرایط اولیه و دوره مدل‌سازی مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

۴-۱ - تهیه مدل رایانه‌ای آبخوان

به منظور مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه که یکی از آبخوان‌های جنوب شرق کشور است، از مدل MODFLOW استفاده شده است. دلیل انتخاب این منطقه در دسترس بودن مدل جریان آب زیرزمینی و داشتن هدف تغذیه مصنوعی واداری (ASR) در این منطقه در بخش جنوبی آبخوان است. لذا مراحل طی شده جهت راه اندازی مدل شامل، شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه، تعیین محدوده مدل، تقسیم‌بندی مکانی و زمانی، تعریف مرزهای مدل و چگونگی تخصیص مقادیر پارامترهای اولیه به گره‌های مختلف مدل می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که در مرحله مدل‌سازی حتی‌الامکان سعی شده که محدوده مدل آب زیرزمینی منطبق با محدوده بیلان باشد.

به منظور مطالعه آبخوان با روش مدل‌سازی عددی و روش تفاضل‌های محدود می‌بایست مرزبندی محدوده آن انجام گیرد. این مرزبندی شامل محدوده‌ای است که بایستی شبیه‌سازی شود و براساس اطلاعات آبخوان مرزبندی جبهه‌های ورودی و خروجی به آبخوان، منابع تغذیه و تخلیه مشخص گردد. در شکل ۵ مرزبندی منطقه جهت شبیه‌سازی پیشنهاد شده است. حد شمالی آبخوان از واحدهای نفوذناپذیر تشکیل شده است. مرز جنوبی آبخوان نیز منطبق بر مرز آبخوان دیگری است. دو مرز شرقی و غربی منطقه از نظر هیدرولیکی نفوذپذیر و مسیر جریان آب زیرزمینی است.



شکل ۵ - منطقه مورد مطالعه جهت مدل‌سازی (دایره آبی رنگ محل چاه‌های تزریقی است)

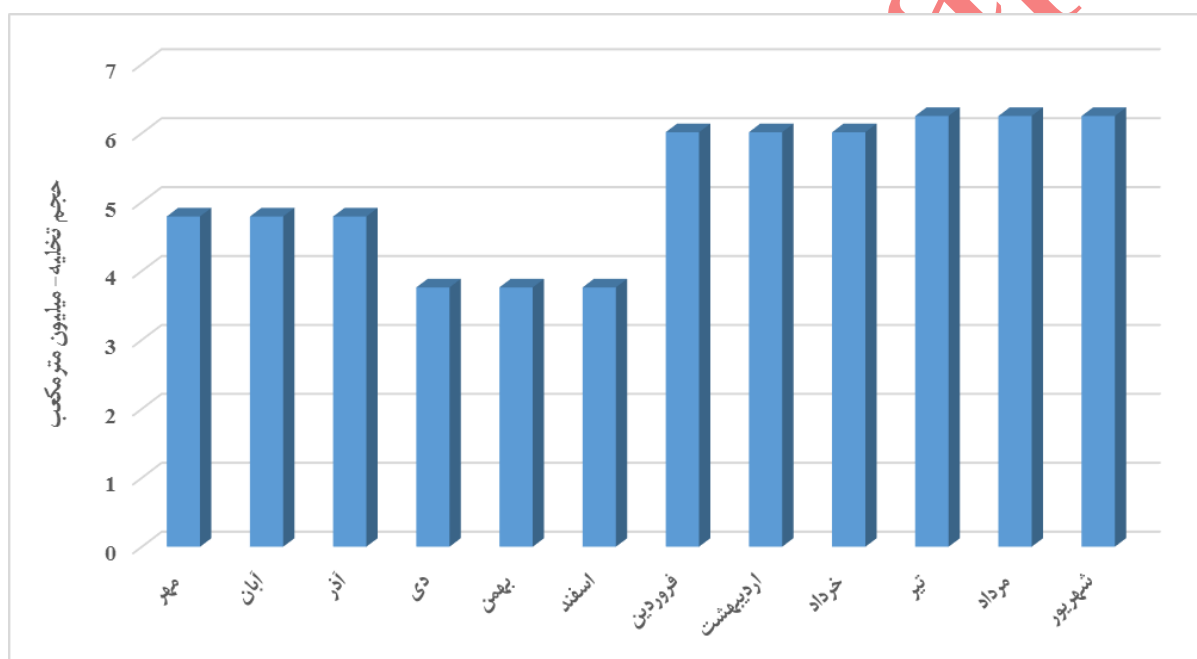
پس از مشخص شدن مرزبندی محدوده مدل‌سازی، تقسیم‌بندی مکانی منطقه به یکسری شبکه یا سلول مربعی و یا مستطیلی انجام شده است. با توجه به شرایط و وسعت آبخوان، سلولهایی با ابعاد ۲۵۰ در ۲۵۰ متر برای ساخت مدل شبه سه‌بعدی جریان در نظر گرفته شده است. تعیین ابعاد سلولی برای مطالعه هر آبخوان به شدت وابسته به اطلاعات موجود آبخوان، وسعت آن و هدف مطالعه است. مدت شبیه‌سازی برای یک دوره ۲ ساله یا ۲۴ ماهه منتهی به سال آبی ۹۶-۹۷ واستجی و صحت‌سنجی می‌گردد اولین گام زمانی جهت شبیه‌سازی مدل مهرماه ۱۳۹۵ انتخاب شد و از زمان مذکور تا شهریور ماه ۱۳۹۷ به عنوان بازه مدل‌سازی اختصاص یافت. تعداد ۸ حلقه چاه مشاهده‌ای جهت مدل‌سازی مطابق شکل ۵ انتخاب شدند. با توجه به تراز آب زیرزمینی در ۸ چاه مشاهده‌ای منطقه، منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی ترسیم و با تحلیل نتایج آن جبهه‌های زیرزمینی ورودی و خروجی تعریف می‌شود. بخش جنوبی و بخشی از شرق آبخوان محل جریان آب زیرزمینی ورودی و بخش غربی منطقه محل خروجی آب زیرزمینی است.

به منظور تعیین دقیق منابع تغذیه و تخلیه در آبخوان جهت شبیه‌سازی براساس آخرین نتایج آماربرداری سراسری (مرحله سوم)، بیلان آبخوان محاسبه گردید. در جدول ۱ بیلان کوتاه مدت مربوط به سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ ارائه شده است.

جدول ۱ - بیلان کوتاه مدت آبخوان مورد مطالعه

مؤلفه‌های بیلان	تغذیه - MCM	تخلیه - MCM
ورودی زیرزمینی به آبخوان	۴۸/۱	
تغذیه ناشی از بارش	۰/۴	
تغذیه ناشی از آب برگشتی	۱۰/۲	
خروجی زیرزمینی از آبخوان	-	۱۰/۳
برداشت از آبخوان	-	۶۲/۵
تبخیر از آب زیرزمینی	-	۰
جمع کل	۵۹	۷۳
تغییرات حجم ذخیره آبخوان - MCM	-۱۴	

یکی از مهمترین اجزای تخلیه آبخوان، بهره‌برداری از چاه‌های بهره‌برداری است. میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری آبخوان براساس آماربرداری مرحله سوم که منتهی به سال ۱۳۹۷ می‌گردد در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به برآورد فصلی انجام شده در این آماربرداری میزان برداشت بصورت ماهانه تبدیل گردید (شکل ۶).



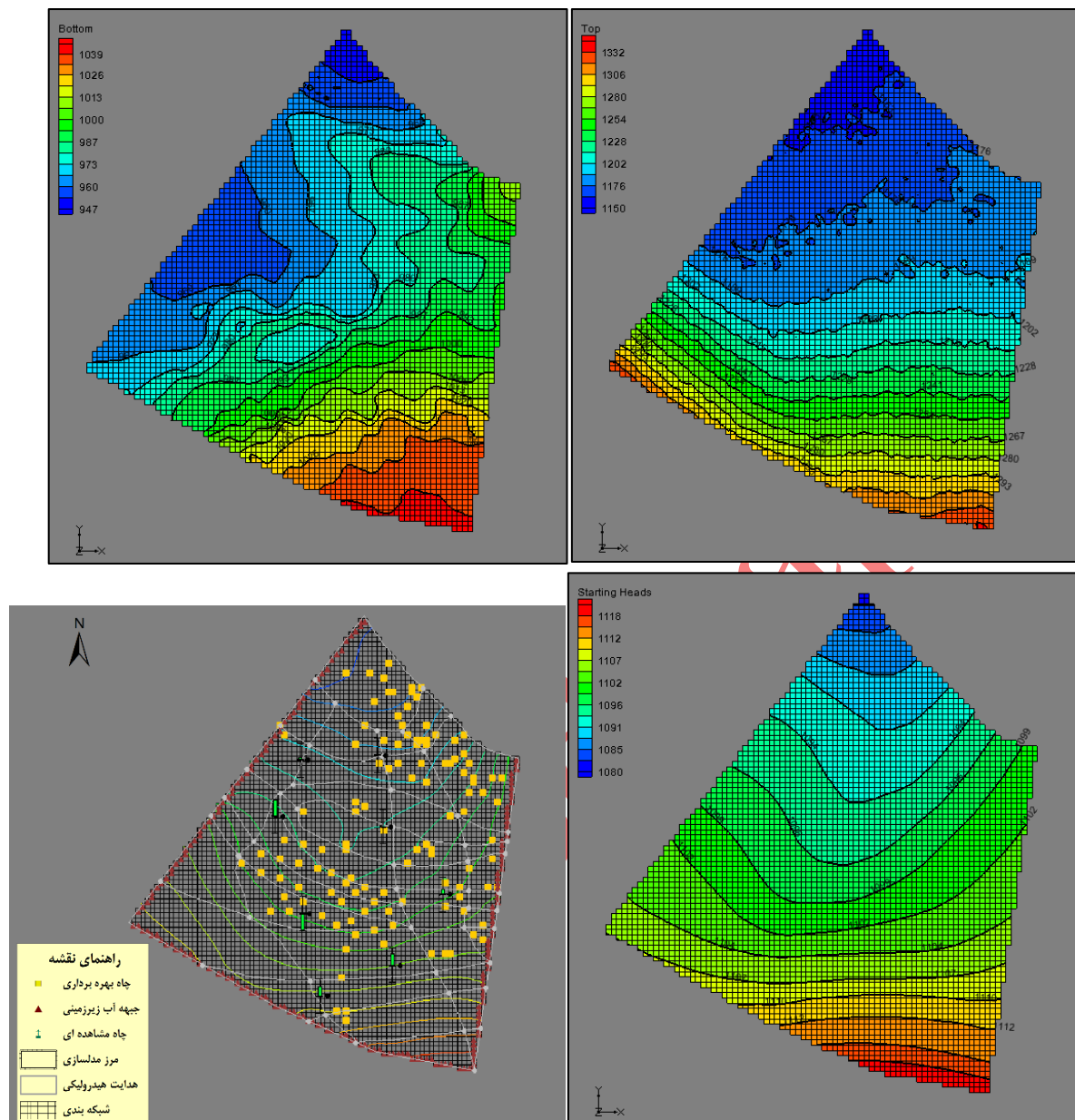
شکل ۶ - تحلیل ماهانه میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه دارای ۱۲۱ حلقه چاه بهره‌برداری است که از این میان، ۷ حلقه چاه برای مصارف خدمات عمومی، ۴۱ حلقه چاه برای مصارف شرب، ۲۳ حلقه چاه برای مصارف صنعت، ۳ حلقه چاه برای فضای سبز و ۴۷ حلقه چاه برای مصارف کشاورزی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. طبق آخرین آماربرداری، کل تخلیه چاه‌های بهره‌برداری این منطقه حدود ۶۲/۵ میلیون مترمکعب ثبت شده است.

نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی دو پارامتر تشکیل دهنده تغذیه از سطح آبخوان را تشکیل می‌دهند. براین اساس با توجه به مقدار پایین نفوذ حاصل از بارش (۰/۴ میلیون مترمکعب در سال)، قسمت عمده ی تغذیه آبخوان از آب برگشتی در نظر گرفته

شد. با توجه به این موضوع، میزان آب برگشتی به عنوان لایه پوششی برای منطقه تعریف گردید. میزان آب برگشتی با ضریب ۱۵ درصد برای بخش کشاورزی و ۷۰ درصد برای شرب در نظر گرفته شده است.

به منظور مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان، پس از راه‌اندازی مدل، شامل شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه، تعیین محدوده مدل، تقسیم‌بندی مکانی و زمانی، تعریف مرزهای مدل و چگونگی تخصیص مقادیر پارامترهای اولیه به گره‌های مختلف مدل، تعریف ساختار آبخوان صورت پذیرفت که این ساختار شامل توپوگرافی، سنگ بستر و تراز آب زیرزمینی اولیه است. یکی از پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی آبخوان توپوگرافی سطح آبخوان بوده که در این مطالعات از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) جهت وارد نمودن این پارامتر به مدل استفاده شده است. البته توپوگرافی یا مقادیر سطح زمین نقش چندانی در کالیبراسیون مدل ریاضی نداشته و مدل MODFLOW تنها برای تعیین میزان ضخامت آبخوان از این پارامتر استفاده می‌کند. در شکل ۷ نحوه تغییرات تراز آب زیرزمینی مشخص شد. ضخامت آبرفت با استفاده از بررسی‌های زمین‌شناسی به ویژه حفاری‌ها و لاگ‌های اکتشافی و مطالعات ژئوفیزیک در نقاط مختلف دشت تعیین می‌گردد. همچنین در تعیین سنگ بستر از اطلاعات موجود در گزارشات قبلی نیز استفاده شده است. براساس اطلاعات موجود و استفاده از عمق چاه‌های حفر شده و لاگ‌های حفاری و برخی اطلاعات پراکنده ، ماتریس سنگ کف اولیه آبخوان تهیه گردید (شکل ۷). با توجه به شروع دوره‌ی مدل‌سازی از مهرماه سال ۱۳۹۵، داده‌های تراز آب زیرزمینی این ماه جهت تعیین تراز آب زیرزمینی اولیه انتخاب گردید. با استفاده از ابزارهای درون‌یابی در محیط GIS نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی اولیه برای مدل‌سازی تهیه و وارد مدل مفهومی آبخوان گردید. شکل ۷ توپوگرافی، نقشه سنگ بستر آبخوان و تراز آب زیرزمینی اولیه را در محیط نرم‌افزار GMS را نشان می‌دهد.



شکل ۷ - نقشه توپوگرافی (بالا سمت راست)، سنگ بستر (بالا سمت چپ)، تراز آب زیرزمینی (پایین سمت راست) و مدل نهایی با تعریف چاه (پایین سمت چپ) آبخوان تعریف شده در مدل رایانه‌ای

در مدل ماندگار (پایا) جریان آب زیرزمینی براساس معادله جریان اختلاف ورود و خروج صفر می‌باشد. به منظور اجرای صحیح و دقیق مدل ماندگار در آبخوان، ورود پارامترهای بیان آب زیرزمینی از نظر تغذیه و تخلیه بسیار حائز اهمیت است. با توجه به رابطه جریان آب زیرزمینی در آبخوان و آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف در محیط MODFLOW پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان به عنوان مهمترین پارامتر جهت واسنجی مدل در حالت ماندگار انتخاب شد. براین اساس با توجه به مطالعات میدانی و آزمایشات پمپاژ مقادیر اولیه برای هدایت هیدرولیکی در آبخوان مشخص و وارد مدل شد. مقداردهی اولیه نشان داد که هر چه به پائین دست آبخوان نزدیک شویم، میزان هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. واسنجی مدل ماندگار آب زیرزمینی با تغییر در مقادیر هدایت هیدرولیکی بگونه‌ای انجام پذیرفت که حداقل خطای ممکن بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و شبیه‌سازی

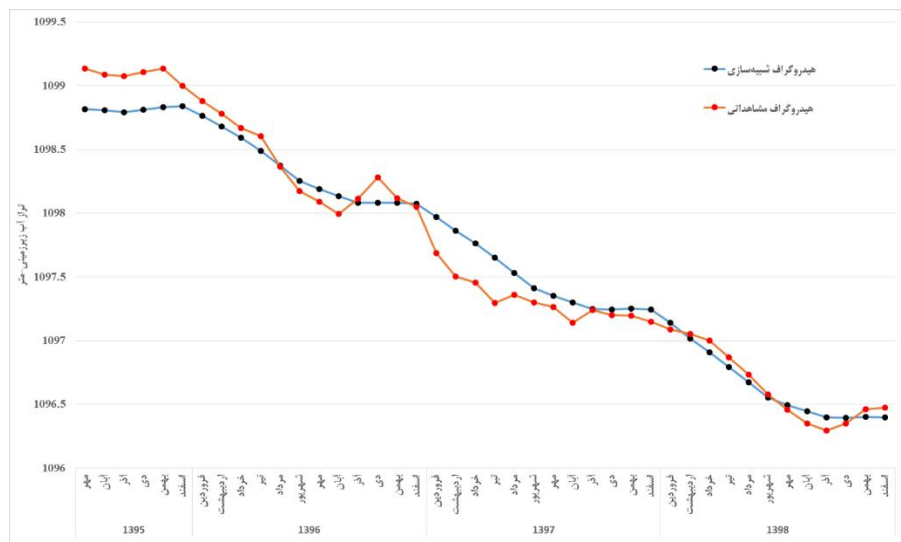
شده برقرار باشد. مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی در طول دوره مدل‌سازی اختلاف کمتر از ۵۰ سانتیمتر بین تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد که در مجموع خطای مدل کمتر از ۱ درصد است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین مجذور خطا یعنی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده با تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در کلیه ۸ چاه مشاهده‌ای مدل کمتر از ۲۰ سانتیمتر است. در جدول ۲ آنالیز خطای مدل ماندگار جریان آب زیرزمینی ارائه شده است.

جدول ۲ - تحلیل تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی در حالت ماندگار (متر از سطح دریا)

ردیف	نام چاه مشاهده‌ای	تراز آب زیرزمینی مشاهده شده	تراز آب زیرزمینی شده شبیه سازی	اختلاف تراز آب
۱	P1	1091.1	1090.85	-0.25
۲	P2	1093.3	1093.5	0.2
۳	P3	1095	1095.06	0.06
۴	P4	1102	1101.95	-0.05
۵	P5	1106.2	1106.26	0.06
۶	P6	1111.5	1111.4	-0.1
۷	P7	1100	1100.05	0.05
۸	P8	1096.51	1096.69	0.18

در مدل غیرماندگار جریان آب زیرزمینی با توجه به محدود بودن آمار و تعریف شرایط اولیه در محدوده آبخوان یک دوره آماری ۲ ساله از بازه زمانی سال آبی ۱۳۹۵-۹۶ تا ۱۳۹۶-۹۷ به مدت ۲۴ گام زمانی ماهانه جهت مدل‌سازی آبخوان در نظر گرفته شد. پس از شبیه‌سازی اولیه پارامتر آبدهی ویژه مورد واسنجی قرار گرفت که نتایج ارائه شده از مقدار ضریب آبدهی ویژه نشان داد که تغییرات این ضریب، بین ۵ تا ۹ درصد در آبخوان است. بررسی تغییرات این پارامتر و هدایت هیدرولیکی آبخوان حاکی از برقراری یک همبستگی بالا بین این مقادیر است. مقدار آبدهی ویژه در بخش جنوبی منطقه افزایش و بطرف خروجی آبخوان کاهش می‌یابد که هدایت هیدرولیکی نیز از همین روند تبعیت می‌نماید.

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان، پیش‌بینی برای مدت ۱۸ ماه با ادامه شرایط موجود انجام گرفت. پس از شبیه‌سازی و در نظر گرفتن یک دوره ۳/۵ ساله که نتایج و دقت مناسب بدست آمد، هیدروگراف آبخوان برای این دوره مطابق شکل ۸ ترسیم گردید.



شکل ۸ - هیدروگراف شبیه‌سازی شده آبخوان مورد مطالعه

نتایج هیدروگراف شبیه‌سازی آبخوان نشان می‌دهد که با توجه به حجم بهره‌برداری، افت آبخوان افزایش داشته و در طی ۳/۵ سال دوره شبیه‌سازی به میزان ۲/۴۲ متر می‌رسد. میزان افت سالانه بطور متوسط ۶۹ سانتیمتر خواهد بود. همچنین نتایج مدل شبیه‌سازی با داده‌های میدانی تطابق بالایی دارد و این مدل رایانه‌ای برای پیش‌بینی فرایند تزریق آب به آب‌خوان مناسب است.

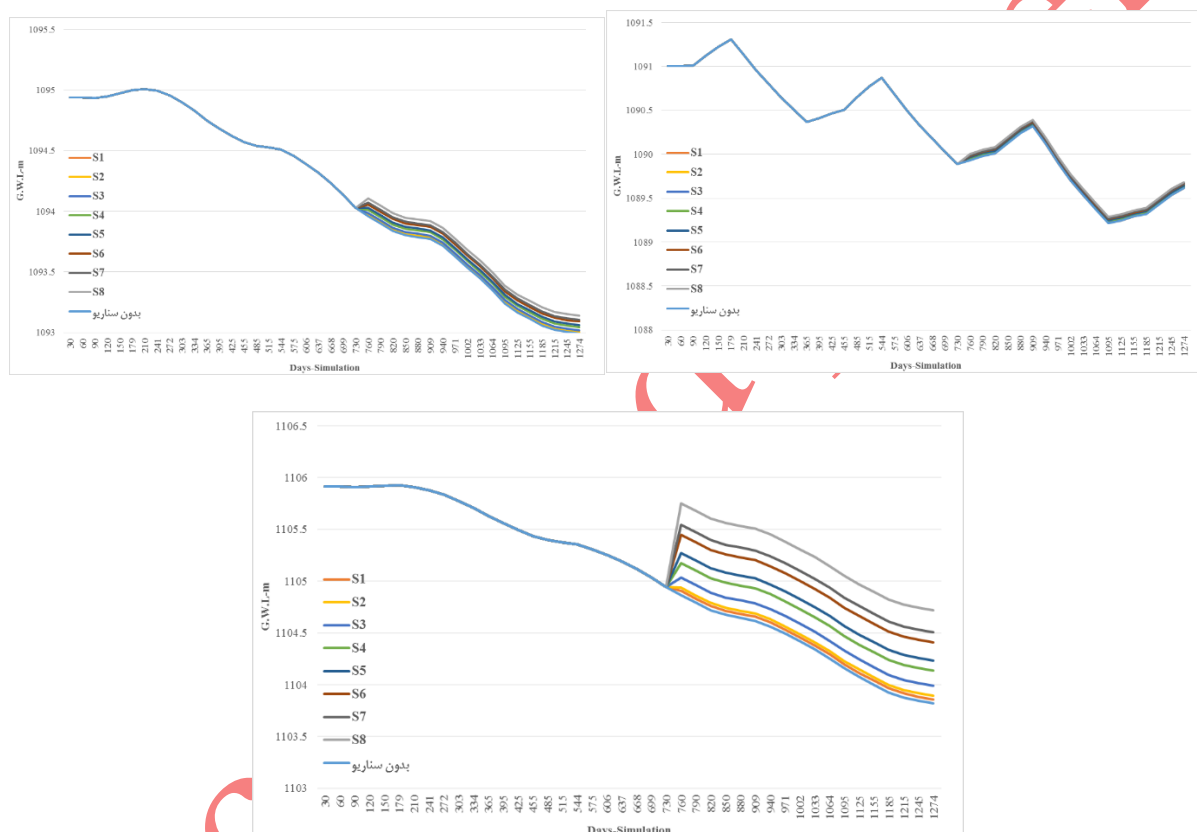
۴-۲ - بررسی اثربخشی میزان تغذیه مصنوعی با روش ASR

با توجه به نتایج شبیه‌سازی آبخوان و افت منابع آب زیرزمینی در این منطقه، عملیات تغذیه مصنوعی چاه محور (ASR) در بخش جنوبی آبخوان در چندین سناریو تعریف گردید. هدف از تعریف این سناریوها بررسی اثربخشی و بهبود وضعیت کمی آبخوان است. سناریوهای تعریف شده در این مرحله بصورت جدول ۳ تعریف شده است. سناریوهای تعریف شده براساس حداکثر میزان تزریق در هر چاه به میزان ۰/۵ میلیون مترمکعب در سال دیده شده و از تغذیه ۱ میلیون مترمکعب تا ۲۰ میلیون مترمکعب آب در سال در این منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

جدول ۳ - سناریوهای عملیات تغذیه مصنوعی چاه محور

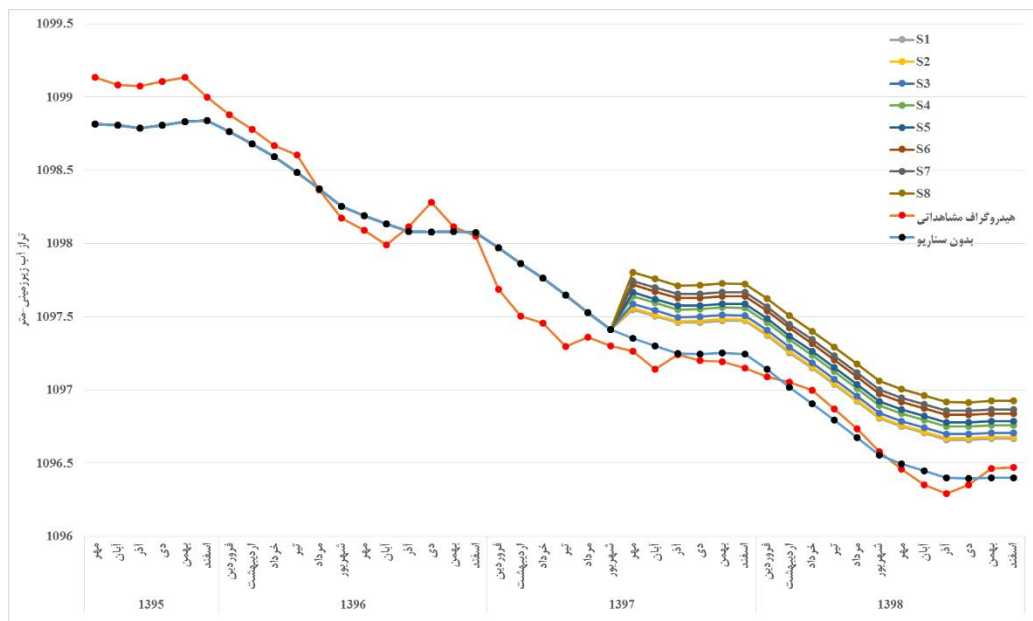
ردیف	نام سناریو	تشریح
۱	S1	تغذیه ۱ MCM آب از طریق ۲ چاه تزریق
۲	S2	تغذیه ۲ MCM آب از طریق ۴ چاه تزریق
۳	S3	تغذیه ۵ MCM آب از طریق ۱۰ چاه تزریق
۴	S4	تغذیه ۷/۵ MCM آب از طریق ۱۵ چاه تزریق
۵	S5	تغذیه ۱۰ MCM آب از طریق ۲۰ چاه تزریق
۶	S6	تغذیه ۱۲/۵ MCM آب از طریق ۲۵ چاه تزریق
۷	S7	تغذیه ۱۵ MCM آب از طریق ۳۰ چاه تزریق

با توجه به سناریوهای در نظر گرفته شده، شبیه‌سازی آبخوان انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی آبخوان با اعمال ۸ سناریوی تغذیه مصنوعی با روش واداری حاکی از این موضوع است که با توجه به انتخاب منطقه جنوب‌شرقی آبخوان به عنوان منطقه هدف، بیشترین تاثیر در کمیت آب در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به این منطقه مشاهده شد. بطوریکه چاه مشاهده‌ای P5 بیشترین بهبود وضعیت کمی را در طی ۱۸ ماه دوره پیش‌بینی را نشان داد. نتایج کلی شبیه‌سازی با اعمال حالات مختلف سناریوی تغذیه مصنوعی حاکی از ادامه روند افت آب زیرزمینی در این منطقه است اما اعمال این سناریوها شدت میزان نزول تراز آب زیرزمینی را بهبود می‌بخشد. در شکل (۳-۲۶) تا (۳-۳۳) هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای منطقه ارائه شده است.



شکل ۹ - هیدروگراف چاه مشاهده‌ای P1 (بالا سمت راست)، P3 (بالا سمت چپ) و P5 (پایین) بعد از اعمال سناریوهای تغذیه مصنوعی

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با توجه به کسری مخزن آبخوان، اعمال سناریوهای مختلف تغذیه مصنوعی تنها در ۴ چاه مشاهده‌ای P4، P5، P6 و P7 نسبت به ۴ چاه دیگر بهبود بهتری را نشان می‌دهد. بیشترین میزان بهبود تراز آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای P5 است که در پائین‌دست محدوده تغذیه مصنوعی قرار دارد. لذا استفاده از رویکرد تغذیه مصنوعی چاه محور می‌تواند میزان تراز آب زیرزمینی را بهبود بخشد. نتایج هیدروگراف آبخوان در طی اعمال سناریوی تغذیه مصنوعی نیز بصورت شکل ۱۰ ارائه شده است که افزایش حجم تغذیه بهبودی وضعیت کمی آبخوان را آن هم در عرض یک سال نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - هیدروگراف آبخوان با اعمال سناریوی تغذیه مصنوعی

با توجه به شکل ۱۰ تنها این فرایند در یک سال قابلیت جبران بخشی از تراز منفی آبخوان مورد مطالعه را دارد. تعیین دقیق دبی بهینه برای جبران کامل سطح تراز آب خوان نیازمند تکرار این سناریو در سال‌های مختلف و هم زمان کنترل مصرف است. هدف از این مطالعه صرفاً امکان‌پذیری اجرای فرایند برای یک دوره یک ساله و انجام محاسبات اقتصادی مرتبط با آن بود. این نتایج نشان می‌دهد در فرایند تغذیه مصنوعی پیشنهاد شده تا ۷۵ درصد از افت تراز کلی آبخوان در یک سال جبران شده است. تکرار این عملیات در سال‌های مختلف می‌تواند نقش مهمی در کنترل تراز در سال‌های آتی داشته باشد.

۳-۴ - بررسی وضعیت تزریق‌پذیری چاه

با توجه به نتایج شبیه‌سازی آبخوان در نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان در ستون چاه وضعیت جریان تزریقی در چاه بررسی شد. برای این کار از نرم‌افزار شبیه‌ساز جریان چندفازی Prosper متعلق به شرکت IPM استفاده شد. در این شبیه‌سازی دو چاه عمودی به عمق متوسط ۸۰ و ۲۰۰ متر با توجه به فاصله سطح زمین تا عمق تراز آب در نقاط مختلف آبخوان در نظر گرفته شد. همچنین یک ضخامت ۱۰ متری برای ارتباط چاه و مخزن در نظر گرفته شد. سیال تزریقی آب بدون شوری و بدون گاز همراه لحاظ شد. با توجه به ضریب هدایت هیدرولیکی، متوسط تراوایی مخزن بین ۱۴ تا ۲۲ داری در نظر گرفته شد. با توجه به جغرافیای آبخوان مساحت و ضریب شکلی (دایترز) توسط نرم‌افزار محاسبه شد. قطر چاه معادل ۱۲ اینچ تعریف شد و محدوده دبی چاه از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مترمکعب در روز بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که فشار سیال در چاه رابطه موثر با قطر چاه دارد با افزایش قطر چاه میزان افت فشار اصطکاکی کم می‌گردد. با این وجود تغییرات فشار از قطر پنج اینچ به بعد ملموس نمی‌باشد. از طرف دیگر میزان تزریق‌پذیری چاه رابطه معکوس با تراوایی آبخوان دارد در تراوایی‌های پایین‌تر از یک داری فشار تزریق بیشتر از فشار ته‌چاه است. اما در تراوایی‌های آبخوان مورد مطالعه (۱۴ تا ۲۲ داری) فشار حاصل از ستون آب بیش از فشار تزریق است و عملیات تزریق تا دبی ۱۰ مترمکعب در روز بصورت طبیعی رخ می‌دهد. موضوع مورد مطالعه بعدی تغییرات فشار تزریق در دهانه چاه نسبت به دبی است. که با افزایش دبی از هزار بشکه به ۱۰ هزار بشکه فشار تزریق حداکثر بین ۱۵ تا ۴۰ پام تغییر می‌کند. در

چاه با عمق ۲۰۰ متر فشار جریانی ته چاه به ۲۷۰ پام^۱ و فشار تزریق به ۶۵ پام می‌رسد. در چاه با عمق ۸۰ متر فشار جریانی به ۹۰ پام و فشار لازم برای تزریق به ۳۰ پام می‌رسد.

با توجه به این نتایج در آبخوان مشکلی از بابت تزریق‌پذیری با توجه به اطلاعات فنی شبیه‌سازی وجود ندارد. همچنین به دلیل اختلاف بالای فشار ستون سیال با فشار تزریق امکان استفاده از چاه‌های تولیدی موجود به عنوان چاه تزریق وجود دارد. با این رویکرد هزینه‌های عملیاتی نیز کاهش خواهد یافت.

۵- ارزیابی اقتصادی

از آنجا که عملیات ASR در کشور سابقه اجرایی ندارد باید از منابع معتبر خارجی یا نمونه عملیات‌های مشابه با این عملیات در داخل کشور و به‌طور خاص عملیات تزریق آب در صنعت نفت کشور استفاده شود. البته امکان مقایسه‌ی اقتصادی با روش‌های مشابه تامین آب مانند شیرین‌سازی و سد سازی در داخل کشور وجود دارد. در ادامه به ذکر چند نمونه از منابع قیمتی اشاره می‌شود.

۱-۵ - برآورد هزینه در بازارهای جهانی

در عملیات ASR هزینه‌ی ساخت چاه کمتر از نیمی از مجموع هزینه‌ی نصب چاه، تاج چاه و تاسیسات همراه آن است. سرمایه‌گذاری بیشتر در لوله‌ی جداری چاه می‌تواند بهره‌ی اقتصادی طولانی مدت قابل توجهی را در عملکرد و بهره‌وری ایجاد کند. انتخاب لوله‌ی جداری و طراحی مناسب می‌تواند سبب کاهش قابل توجه هزینه‌ی بهره‌برداری به دلیل کاهش دوره‌ی تخلیه‌ی آنی و تولید ذرات جامد شود. در سن آنتونیو با ساخت ۲۹ چاه ASR با ظرفیت تزریق روزانه ۲۵۰ هزار مترمکعب آب و ظرفیت تصفیه سالانه ۱۳۰ میلیون مترمکعب تاکنون بیش از ۲۰۰ میلیون مترمکعب آب در این آبخوان ذخیره شده است. فاز اول این پروژه برای تامین ۳۷ میلیون مترمکعب آب برای نیاز ۶۰ هزار خانواده با ۷/۵ میلیون دلار در سال ۲۰۰۱ اجرا شده است. کل پروژه برای مدت ۵۰ سال حدود ۲۱۵ میلیون دلار تخمین زده می‌شود. در شهرداری اسکودیل در آریزونا، دولت با اختصاص بودجه‌ی ۱/۵ میلیون دلاری، چهار چاه ASR به منظور تامین سالیانه‌ی ۴ تا ۵ میلیون مترمکعب آب برای شهروندان اجرا کرده است. منبع این آب از رودخانه کلورادو تامین می‌شود. عملیات تغذیه‌ی مصنوعی در این منطقه سابقه‌ای ۲۵ ساله دارد که تاکنون ۳۴۰ میلیون مترمکعب آب در آبخوان ذخیره شده است.

در منطقه کباد کویت^۲ چاه‌های ASR ۹ ماه از سال را تزریق و ۳ ماه برداشت انجام می‌دهند. در این پروژه روزانه ۱۰۰ هزار مترمکعب آب توسط ۸ چاه با بازده برداشت ۷۷ درصد تولید می‌شود. میسر و همکاران در یک مطالعه به مقایسه هزینه تامین آب از طریق پساب به وسیله ASR و شیرین‌سازی پرداختند که در مورد اول هزینه هر مترمکعب بین ۰ تا ۰/۵ دلار و در مورد دوم بین ۲ تا ۵ دلار ارزیابی شد.

¹ Psig

2- Kabd area in Kuwait

در مطالعه‌ی زوبیر در سال ۲۰۱۶ در کشور هلند در مقایسه‌ی ارزش‌گذاری اقتصادی، دو روش تکمیل چندگانه و تکمیل یکپارچه، هزینه‌ی هر چاه ASR ۶۵ هزار دلار گزارش شده است. این هزینه شامل پلاگ رسی، لوله‌ی جداری، لوله‌ی مکش، شیرها، تاج چاه، سنسور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، دبی سنج و پمپ با دبی متغیر است. در صورت تکمیل چندگانه، ۶ دبی سنج و لاین تزریق به این مجموعه اضافه می‌شود که معادل ۵ هزار دلار است. در حالی که با توجه به افزایش بازده برداشت، هزینه‌ی هر متر مکعب آب تولیدی ۹ دلار خواهد بود که نسبت به تکمیل یکپارچه‌ی چاه (۲۷ دلار بر بشکه) اقتصادی‌تر است. این اعداد به ازای برداشت ۵۵۰۰ مترمکعب آب در چرخه‌ی اول تزریق محاسبه شده است. که در چرخه‌های بعد هزینه‌های عملیات به هزینه نگهداری و انرژی تقلیل می‌یابد. البته باید دقت شود که این مطالعه مربوط به یک پروژه کوچک مقیاس است با حجم ذخیره‌سازی پایین است. همچنین اعداد ۹ و ۲۷ دلار هزینه‌های سرمایه‌ای پروژه^۱ است و نباید معیار قیمت‌گذاری نهایی پروژه قرار گیرد. لازم به ذکر است که هزینه‌ی هر مترمکعب آب کشاورزی در فرانسه بین ۰/۲۳ تا ۱/۵ یورو بر مترمکعب گزارش شده است.

در مورد اقتصاد پروژه‌های ASR در استرالیا مطالعه‌ی مناسبی انجام شده است. قیمت تمام شده برای تامین هر متر مکعب آب در استرالیا تابعی از موقعیت جغرافیای آن منطقه است. در برخی از نقاط خشک و نیمه خشک این کشور آب بین ۳/۵ تا ۴/۷ دلار به ازای هر مترمکعب متغیر است. در ایر پنیسا^۲ این عدد به ۵/۵ تا ۷/۲ می‌رسد. از این رو اجرای ASR در این مناطق جذابیت اقتصادی بیشتری دارد. در آدلاید هزینه هر مترمکعب آب بین ۲۰ تا ۵۰ سنت است. هزینه‌های نوعی پروژه‌ی ASR در مقیاس خانگی و شهری در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول هزینه‌های نگهداری، پایش و استهلاک به عنوان هزینه‌ی ثابت سالیانه و هزینه‌ی انرژی لازم برای پمپ (۵ سنت به ازای متر مکعب برای هر پمپ) به عنوان هزینه‌ی متغیر در نظر گرفته شده است.

جدول ۴ - مقایسه هزینه‌ی تخمینی پروژه ASR در مقیاس خانگی و شهری (۲۱)

Costs	Domestic (500 KL)	Municipal (100 ML)
Initial costs	\$2 400	\$200 000
Annual cost - fixed	\$200	\$10 000
- variable	\$25	\$10 000
Total annualised cost (15yrs, 7% discount rate)	\$489	\$42,000
Cost per kilolitre (\$/KL)	0.98	0.42
'Break even' time c/f. mainswater @ 90 c/KL (years)	-	3.3

(after Dillon, 1996)

براین اساس، هزینه هر مترمکعب آب به روش ASR ۴۲ سنت در پروژه‌ی شهری و حدود ۱ دلار در پروژه‌های خانگی (کوچک مقیاس) است. منظور از پروژه‌ی شهری، پروژه‌ای با ظرفیت ذخیره‌سازی حداقل ۱۰۰ هزار مترمکعب در سال و دارای چاه با دبی تولید بین ۱ تا ۲ هزار مترمکعب در روز است. در صورتی که طول عمر پروژه افزایش یابد یا ظرفیت ذخیره‌سازی بیشتر باشد، قیمت تمام شده کاهش خواهد یافت. اساس مطالعات پاین و همکاران هزینه‌ی هر واحد تاسیسات ASR در آمریکا بین ۷۷ تا ۲۳۰ هزار دلار به ازای ظرفیت ۱۰۰۰ مترمکعب آب در روز در زمان انجام عملیات است (اطلاعات سال ۱۹۹۶). این ظرفیت

1- Capital Expenditure

2- Eyre Peninsula

سبب ذخیره سازی چندصد هزار تا چند میلیون مترمکعب آب در طول سال می شود. این درحالی است که در استرالیا پروژه های با ظرفیت ۸۰ تا ۱۵۰ هزار مترمکعب در سال با قیمت ۳۸ هزار تا ۱۵۰ هزار دلار با توان تولید ۱۰۰۰ بشکه در روز است.

۵-۲- هزینه های عملیاتی اجرای پروژه

داده های جهانی می تواند شاخصی برای مقایسه هزینه های یک فناوری نسبت به فناوری دیگر باشد اما با توجه به نظام اقتصاد یارانه ای کشور لازم است بصورت خاص این محاسبات براساس فهرست بهای داخلی نیز تکرار شود. به این منظور با توجه به داده های فنی حاصل از شبیه سازی سناریوهای مخلف و براساس فهرست بهای اعلامی سازمان برنامه و بودجه کشور در سال ۱۴۰۰ یک ارزیابی اقتصادی انجام شد.

در آبخوان مورد مطالعه با توجه به داده های موجود در شکل ۷ فاصله سطح زمین تا سطح تراز آب در آبخوان بین ۸۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است. با توجه به نقشه جغرافیایی منطقه آبخوان دارای مساحتی حدود ۲۰ کیلومتر در ۲۵ کیلومتر است. با فرض تامین آب از رودخانه ها و سیلاب های روستایی منطقه برای اجرای پروژه نیازمند وجود یک خط لوله بین ۲۰ تا ۵۴ اینچی جهت تامین و انتقال آب از منبع به چاه ها به همراه خاکبرداری و لوله گذاری است.

از آنجا که سناریوهای فنی شامل ۸ روش تزریق از یک میلیون تا ۲۰ میلیون مترمکعب به ازای ۲ تا ۴۰ عدد چاه بود برای بررسی محدوده اقتصادی عملیات ساده ترین سناریو (S1) و پیچیده ترین سناریو (S8) بررسی می شود. فرض می شود، در سناریو یک از یک خط لوله ۲۰ اینچی و در سناریو هشت از یک خط لوله ۵۴ اینچی برای انتقال آب به طول ۲۰ کیلومتر استفاده می شود. جنس لوله ها با توجه به نمونه های مشابه خارجی از فولاد ضد زنگ انتخاب شده است.

با توجه به فهرست کدهای گزارش فهرست بهای عملیات عمرانی مصوب سازمان برنامه و بودجه^۱ (کدهای عملیاتی جدول ۵) و با اطلاعات حاصل از شبیه سازی فنی و به ازای بدترین شرایط عملیات جزئیات مقدار هزینه کل عملیات حفاری یک حلقه چاه در جدول ۵ ارایه شده است.

جدول ۵- جدول هزینه های عملیات احداث هر چاه در پروژه

کد عملیات	عملیات اصلی	واحد	بها، ریال	مقدار	هزینه، ریال
۰۱۰۱۰۱	تجهیز و برچیدن	مقطوع تا ۱۰۰۰ متر	۹۶,۳۶۶,۰۰۰	۱	۹۶,۳۶۶,۰۰۰
۰۱۰۱۰۳	کارگاه	مقطوع تا ۶۰۰۰ متر	۲۸۹,۱۰۰,۰۰۰	۱	۲۸۹,۱۰۰,۰۰۰
۰۴۰۱۰۴	حفاری به روش دورانی	متر طول حفاری اولیه	۲,۶۳۳,۰۰۰	۲۰۰	۵۲۶,۶۰۰,۰۰۰
۰۴۱۹۰۴		متر طول برقوزدن	۳,۱۳۴,۰۰۰	۲۰۰	۶۲۶,۸۰۰,۰۰۰
۰۵۰۵۰۷	تهیه و نصب لوله	متر طول	۵,۵۹۵,۰۰۰	۲۰۰	۱,۱۱۹,۰۰۰,۰۰۰
۰۶۰۱۰۴		متر طول	۲,۱۴۳,۰۰۰	۱۰	۲۱,۴۳۰,۰۰۰

^۱ فهرست بهای واحد پایه رشته خطوط انتقال آب سال ۱۳۹۹، مصوب ۱۳۹۸/۱۲/۲۷، شماره ۹۸/۷۵۸۴۳۴

۰۶۰۷۰۳	آزمایش و عملیات	متر مکعب	۲۵,۶۳۷,۰۰۰	۶	۱۵۳,۸۲۲,۰۰۰
۰۶۰۸۱۰	صحرائی	حلقه چاه	۹۸,۲۶۹,۰۰۰	۱	۹۸,۲۶۹,۰۰۰
۰۶۱۰۰۵		ساعت	۳,۱۴۲,۰۰۰	۵	۱۵,۷۱۰,۰۰۰
۰۶۱۱۰۱		حلقه چاه	۶۸,۷۵۱,۰۰۰	۱	۶۸,۷۵۱,۰۰۰
۰۸۰۲۰۵	کارهای دستمزدی	متر طول	۳۷۰,۰۰۰	۱۰	۳,۷۰۰,۰۰۰
جمع کل به همراه ۳۰ درصد بالا سری					
۳,۷۳۱,۱۹۲,۴۰۰					

با توجه به اطلاعات حاصل از شبیه سازی فنی و به ازای دو سناریو حداقلی و حداکثری ذخیره سازی جزئیات مقدار هزینه کل عملیات انتقال آب در جدول ۶ تا جدول ۸ ارایه شده است.

جدول ۶ - جدول هزینه های عملیات انتقال آب

کد عملیات	عملیات اصلی	واحد	بها، ریال	سناریو یک	سناریو هشت	مقدار در S1	مقدار در S8
-	خرید لوله	متر	۴۱۵۲۰۰۰	۸۳,۰۴۰,۰۰۰,۰۰۰	-	۲۰,۰۰۰	-
-		متر	۲۶۰۴۰۰۰۰	-	۵۲۰,۸۰۰,۰۰۰,۰۰۰	-	۲۰,۰۰۰
۳۰۱۱۰	عملیات لوله گذاری	متر	۷۶۲۰۰۰	۱۵,۲۴۰,۰۰۰,۰۰۰	-	۲۰,۰۰۰	-
۳۰۱۱۹		متر	۲۴۱۱۰۰۰	-	۴۸,۲۲۰,۰۰۰,۰۰۰	-	۲۰,۰۰۰
۸۰۲۰۳	نصب شیر	عدد	۲۹۸۳۰۰۰	۸,۹۴۹,۰۰۰	-	۳	-
۸۰۲۰۶		عدد	۱۲۷۷۰۰۰۰	-	۱۹۱,۵۵۰,۰۰۰	-	۱۵
جمع کل با ۳۰ درصد بالاسری (ریال)							
۱۰۸,۶۱۱,۰۳۳,۷۰۰							
۶۲۹,۰۱۶,۱۱۵,۰۰۰							

جدول ۷ - جدول هزینه های احداث استخر ذخیره آب

کد عملیات	عملیات اصلی	واحد	بها، ریال	سناریو یک	سناریو هشت
۹۰۱۰۵	احداث استخر پلیمری	مترمکعب	۱,۳۰۱,۸۷۵	۴۱۹,۰۸۵,۰۰۰,	-
۱۳۰۱۰۵		مترمربع	۷,۴۰۰,۰۰۰	-	۲۳,۴۳۸,۱۶۵,۰۰۰
جمع کل با ۳۰ درصد بالاسری (ریال)					
				۳,۱۱۴,۸۱۰,۵۰۰	۳۰,۴۶۹,۶۱۴,۵۰۰

جدول ۸ - جدول هزینه های تصفیه سیلاب

عملیات اصلی	واحد	بها، ریال	سناریو یک	سناریو هشت
پکیج تصفیه، با گارانتی ۵ ساله و ظرفیت ۱۵۰۰ مترمکعب در روز	عدد	۳۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۶۶,۶۶۰,۰۰۰,۰۰۰	-
	عدد	۳۰,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	-	۳,۳۳۳,۳۲۰,۰۰۰,۰۰۰
جمع کل با ۳۰ درصد بالاسری (ریال)				
۲۱۶,۶۵۸,۰۰۰,۰۰۰				
۴,۳۳۳,۳۱۶,۰۰۰,۰۰۰				

در بخش تصفیه آب از یک سیستم اسمز معکوس که قابلیت حذف کدورت آب سیلاب و تبدیل آن به آب قابل شرب را دارد استفاده شده است. با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۵ تا جدول ۸ می‌توان به طور خلاصه میزان سرمایه گذاری اولیه برای اجرای طرح را در قالب دو سناریو حداقل (S1) و حداکثری (S8) به طور خلاصه در جدول زیر ارائه داد.

جدول ۹ - جدول هزینه‌های سرمایه‌گذاری عملیات اجرای ASR در دو سناریو حداقلی و حداکثری (Capex)، ریال

نام سناریو	تعداد چاه	حجم آب تزریقی، مترمکعب	با لوله گذاری و مصرف شرب	بدون لوله گذاری مصرف شرب به همراه تصفیه خانه	تصفیه سیلاب اولیه و از محل پساب مصرف صنعتی
S1	۲	۱ میلیون	۳۳۵,۵۱۳,۰۰۹,۰۰۰	۲۲۶,۹۰۱,۹۷۵,۳۰۰	۱۰,۲۴۳,۹۷۵,۳۰۰
S8	۴۰	۲۰ میلیون	۵,۱۴۴,۸۰۷,۱۹۳,۵۰۰	۴,۵۱۵,۷۹۱,۰۷۸,۵۰۰	۱۸۲,۴۷۵,۰۷۸,۵۰۰

لازم به ذکر است بین ۸۰ تا ۹۰ درصد از رقم هزینه مربوط به بخش انتقال آب است و در صورت آنالیز حساسیت مدل زمین‌شناسی و انتخاب مکان‌های نزدیک به منبع تامین آب (رودخانه یا واحد پساب) امکان صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌ها وجود دارد. موضوع دیگر که در هزینه‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد تعرفه پرداختی به وزارت نیرو بابت آب مورد نیاز جهت ذخیره سازی است. براساس مصوبه ۱۰۰/۳۱/۱۴۹۷۱/۹۹ وزارت نیرو تعرفه آب برداشتی از منابع سطحی تنظیم نشده (مهارنشده) به ازای هر مترمکعب معادل ۳۵۲۹ ریال است. که این رقم به همراه هزینه‌های مربوط به برق مصرفی جهت برداشت آب و نیروی انسانی و استهلاک پروژه جزو هزینه‌های عملیاتی خواهد بود. به عنوان هزینه‌های عملیاتی برای یک الکتروموتور میانگین با آب‌دهی متوسط ۲۵ لیتر برثانیه^۱ (معادل ۲۱۶۰ مترمکعب در روز) جهت تامین قدرت ۳۰ اسب بخار، به ازای هر مترمکعب ۰.۲۵ کیلووات ساعت انرژی الکتریکی مصرف می‌شود. هزینه هر کیلووات ساعت برق بصورت میان بار جهت پمپاژ کشاورزی معادل ۱۲۱ ریال نرخ گذاری شده است^۲. همچنین برای هر یک از سناریوهای سرمایه‌گذاری موجود در جدول ۹ معادل ۱۰ درصد از سرمایه‌گذاری برای نگهداشت تاسیسات در نظر گرفته شده است. این عدد با توجه به Capex متفاوت خواهد بود. این مقدار صرف امور مانند خوردگی، تعمیرات دوره ای، جایگزینی کالاهای مصرفی و ... خواهد بود.

جدول ۱۰ - جدول هزینه‌های عملیات اجرای ASR در دو سناریو حداقلی و حداکثری (Opex)، ریال

نام سناریو	تعداد چاه	حجم آب تولیدی، مترمکعب	هزینه تعرفه آب	هزینه برق چاه‌ها	هزینه نیروی انسانی	نگهداشت تاسیسات
S1	۲	۱ میلیون	۳,۵۲۹,۰۰۰,۰۰۰	۱۲۱,۰۰۰,۰۰۰	۶۰۰,۰۰۰,۰۰۰	10% Capex
S8	۴۰	۲۰ میلیون	۷۰,۵۸۰,۰۰۰,۰۰۰	۲,۴۲۰,۰۰۰,۰۰۰	۶,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰	10% Capex

^۱ Energyinformation.ir

^۲ پایگاه اطلاع رسانی برق نیوز

۵-۳- بخش درآمدی پروژه

در این بخش مهمترین محصول قابل عرضه پروژه همان آب تولیدی قابل استفاده در صنعت، کشاورزی و شرب است. در کشور به دلیل نظام یارانه‌ای بهای آب توسط دولت با قیمت پایین به دست مصرف‌کننده نهایی می‌رسد. در این بخش یک سناریو قیمت حداقلی برای فروش آب براساس ارقام مصرف‌کننده تعیین شد و یک سناریو حداکثری به ازای قیمت فروش هر مترمکعب از آب حاصل از کارخانه شیرین‌سازی آب که دولت متعهد به خرید آن است تعریف گردید. طی مطالعات انجام شده قیمت مصوبی برای فروش آب یافت نشد اما براساس گفته‌های مسئولان قیمت هر مترمکعب آب شیرین‌سازی شده بین ۱۶ تا ۲۰ هزار تومان^۱ تخمین زده می‌شود. از سوی دیگر فهرست بهای اعلامی وزارت نیرو برای مصرف‌کنندگان آب صنعتی و خانگی و کشاورزی بین ۵۰۰۰ تا ۱۰۰ هزار ریال اعلام شده است. با توجه به موارد زیر به ازای سه سناریو قیمتی ۱۰ هزار ریال، ۱۰۰ هزار ریال (کارخانه آب آشامیدنی) و ۲۰۰ هزار ریال (کارخانه آب شیرین‌کن) درآمدهای پروژه در جدول زیر مشخص می‌شود.

جدول ۱۱ - جدول درآمدی عملیات اجرای ASR در سه سناریو قیمتی

سناریو درآمدی	قیمت هر مترمکعب (ریال)	درآمد سناریو S1 (میلیارد ریال)	درآمد سناریو S8 (میلیارد ریال)
اول	۱۰۰۰۰	۱۰	۲۰۰
دوم	۱۰۰۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰
سوم	۲۰۰۰۰۰	۲۰۰	۲۰۰۰

۵-۴- ارزیابی اقتصادی

به منظور تحلیل اقتصادی پروژه با استفاده از اطلاعات موجود در بخش هزینه و درآمد پروژه و نرم افزار کامفار به بررسی پروژه پرداخته شد. در این زمینه فرضیات براساس جدول زیر در نظر گرفته شد.

جدول ۱۲ - جدول فرضیات ارزیابی اقتصادی پروژه

ردیف	عنوان	توضیحات
۱	نام خدمات	بررسی اقتصادی طرح آبخوان
۲	شروع فاز ساخت	۱۴۰۱
۳	مدت زمان فاز ساخت	۱ سال
۴	شروع فاز تولید	۱۴۰۲
۵	مدت زمان فاز تولید	۱۰ سال
۶	زمان کارکرد واحد تزریق در سال	۱۲۰ روز
۷	مالیات	۲۵٪
۹	نرخ استهلاک	۱۰ ساله خطی با ارزش اسقاطی ۱۵٪

^۱ به نقل از استاندارد بوشهر

۱۰	تامین منابع مالی	۱۰۰٪ آورده سهامدار
۱۱	نرخ تنزیل	برای کل سرمایه ۲۲٪

با توجه به اطلاعات جدول ۹ تا جدول ۱۱ تعداد ۱۸ سناریو قیمتی به ازای ۳ گروه هزینه‌ای و ۳ گروه درآمدی و دو سناریو تولید مختلف قابل ارزیابی و بررسی است. نتایج نهایی هر یک از این سناریوها که خروجی نرم افزار کامفار است در جدول زیر ارایه شده است.

جدول ۱۳- جدول نتایج ارزیابی اقتصادی سناریوهای مختلف پروژه

سناریو	capex	opex	sales	IRR	NPV	سال برگشت سرمایه
۱-۱	۳۳/۵	۴/۸۴	۱	-۷۶	-۴۸	-
۲-۱	۳۳/۵	۴/۸۴	۱۰	۸	-۱۵	-
۳-۱	۳۳/۵	۴/۸۴	۲۰	۳۴	۱۵	۴/۷۵
۴-۱	۲۲/۶	۳/۴۳	۱	-۷۲	-۳۲	-
۵-۱	۲۲/۶	۳/۴۳	۱۰	۲۱	-۱	-
۶-۱	۲۲/۶	۳/۴۳	۲۰	۵۷	۲۹	۲/۴۷
۷-۱	۱	۰/۶۲	۱	۲۸	۰/۲۲	۶/۴۰
۸-۱	۱	۰/۶۲	۱۰	۷۰۵	۲۷	۰/۱۷
۹-۱	۱	۰/۶۲	۲۰	۱۴۵۵	۵۶	۰/۰۸
۱-۸	۵۱۴/۴	۷۶/۴	۲۰	-۷۳	-۷۲۵	-
۲-۸	۵۱۴/۴	۷۶/۴	۲۰۰	۱۶	-۹۷	-
۳-۸	۵۱۴/۴	۷۶/۴	۴۰۰	۴۶	۴۹۱	۲/۹۷
۴-۸	۴۵۱/۵	۶۸/۲	۲۰	-۷۱	-۶۳۱	-
۵-۸	۴۵۱/۵	۶۸/۲	۲۰۰	۲۱	-۱۷	-
۶-۸	۴۵۱/۵	۶۸/۲	۴۰۰	۵۷	۵۷۲	۲/۴۶
۷-۸	۱۸/۲۵	۱۱/۹	۲۰	۳۴	۷	۴/۸۹
۸-۸	۱۸/۲۵	۱۱/۹	۲۰۰	۷۷۵	۵۳۷	۰/۱۶
۹-۸	۱۸/۲۵	۱۱/۹	۴۰۰	۱۵۹۷	۱۱۲۶	۰/۰۸

همانطور که در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود سناریوهای ۳-۱، ۶-۱ تا ۹-۱ و ۳-۸، ۶-۸ تا ۹-۸ از نظر سرمایه گذاری مثبت و قابلیت اجرا دارد. نکته مهم در این محاسبات امکان میانبایی نتایج و تعیین نقطه سر به سر برای پروژه‌های غیر اقتصادی است. در این زمینه می‌توان با ترسیم نمودار ارزش فعلی خالص (NPV) نسبت به درآمد (Sale) این مقدار را محاسبه کرد. به عنوان مثال در گروه پروژه‌های نیازمند لوله‌گذاری (۱-۱ تا ۳-۱) کوچک مقیاس حداقل قیمت لازم برای اقتصادی بودن پروژه حدود ۱۵ هزار تومان به ازای هر مترمکعب است. برای سایر سناریوهای قیمتی نیز می‌توان با دقت مناسبی از این روش میان‌یابی استفاده کرد. و برای سناریو لوله‌گذاری (۱-۱ تا ۳-۱) بزرگ مقیاس حداقل قیمت لازم برای اقتصادی بودن پروژه حدود ۸

هزار تومان به ازای هر مترمکعب است. نظر به محاسبات نقطه سربه سری، حداقل قیمت اقتصادی برای دو سناریو کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس با فرض مصرف شرب، صنعتی و لوله گذاری در جدول ۱۴ زیر ارائه شده است.

جدول ۱۴ - جدول نقطه سربه سر قیمتی مترمکعب آب برای اجرای ASR در دو سناریو حداقلی و حداکثری، هزار ریال

نام سناریو	تعداد چاه	حجم آب تزریقی، مترمکعب در سال	با لوله گذاری و مصرف شرب	بدون لوله گذاری مصرف شرب به همراه تصفیه خانه	تصفیه سیلاب اولیه و مصرف صنعتی
S1	۲	۱ میلیون	۱۵۰	۱۰۵	۱۰
S8	۴۰	۲۰ میلیون	۱۵۰	۱۰۵	۱۰

لذا اجرای پروژه با توجه به جزئیات، مصرف و نوع بهره‌برداری در بازه‌ای بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ تومان اقتصادی و قابل مذاکره خواهد بود. از مزایای این روش نسبت به روش تامین آب از طریق شیرین‌سازی آب دریا و ژرفاب مقدار حداقل هزینه اقتصادی آن است که نسبت به این روش‌ها کاملاً رقابتی و جذاب است.

در پروژه شیرین‌سازی آب دریا بندر عباس که سال ۱۴۰۰ افتتاح شد هزینه تمام شده هر متر مکعب آب ۳۳۰ هزار ریال (بدون در نظر گرفتن شبکه انتقال) بود. اجرای این خدمت به روش ASR این کار را با ۳۰ هزار ریال تخمین زده می‌شود.^۱

در پروژه ژرفاب استان سیستان در سال ۱۳۹۷ برای یک حلقه چاه اکتشافی ۲۵۰ میلیارد ریال سرمایه‌گذاری شد و در نهایت آب با شوری ۲۰ هزار (نصف شوری آب دریا) با دبی ۱۵۰۰ مترمکعب در روز تولید شد. هزینه اجرای هر حلقه چاه با دبی مشابه در روش ASR ۳۷۵ میلیون تومان تخمین زده در حالی که کیفیت آب تزریقی و تولیدی یکسان است (معادل شوری آب رودخانه)^۲.

در مقایسه با روش سدسازی، مساحت روزمینی به مراتب کمتری مورد نیاز است (کمتر از ۱ هکتار) و قابلیت برنامه‌ریزی چند ده ساله برای مدیریت منابع را دارد. در حالی که در سدسازی برنامه بهره‌برداری و مدیریت آب سالانه خواهد بود و امکان مدیریت نوسانات بارشی در بازه بیش از یک سال وجود ندارد.

مهمترین ریسک‌های اجرای این فناوری ریسک گرفتن مجوزها، ریسک تخصیص آب، ریسک اجرای عدم بلوغ فناوری، ریسک تضمین فروش آب و بازگشت سرمایه است. لذا پیشنهاد می‌شود با تامین مالی اجرای این فناوری در مرحله پایلوت نسبت به کاهش این ریسک‌ها توسط مراکز تحقیق و توسعه اقدام شود.

۶- نتیجه گیری

دراثر مطالعات و بررسی‌های انجام شده نتایج زیر در مورد فناوری تغذیه و برداشت مصنوعی از آبخوان به روش چاه محور، به دست آمد:

^۱ <https://www.tasnimnews.com/fa/news/1399/08/04/2376140/>

^۲ <https://www.tasnimnews.com/fa/news/1397/05/17/1796879/>

- ✓ این فناوری یک روش صنعتی آزموده شده جهانی برای حل مشکل تامین آب در اقلیم نیمه خشک است. صدها پروژه با این رویکرد در ۲۰ سال اخیر در آمریکا، استرالیا، اروپا و حاشیه جنوبی خلیج فارس اجرا و مستندسازی شده است.
- ✓ به دلیل حل دو مسئله روانابی و تبخیر سطحی بالا، این فناوری قابلیت اجرا در گستره وسیعی از کشور به طور خاص مناطق ساحلی را دارد.
- ✓ هزینه تامین آب به روش ASR یک پنجم تامین آب به روش شیرین سازی آب دریا است و توان تامین آب با ظرفیت ذخیره سازی بیشتر از حجم یک سد را دارد.
- ✓ مستندات فنی و اجرایی طرح در قالب دو هندبوک در سال های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸ و ده ها عدد مستندات پیمانکاری پروژه های موجود در دسترس است.
- ✓ توان اجرای کلیه مراحل طراحی و اجرای عملیات حفاری و بهره برداری در داخل کشور وجود دارد. و در صنعت نفت پروژه های تزریق آب به میادین در عمق ده برابری آبخوان ها و با تراوایی به مراتب کمتر با موفقیت اجرا شده است.
- ✓ هزینه تمام شده هر مترمکعب آب در این روش حدود ۳۰ هزار ریال است که با توجه به خدمات اضافی مانند اجرای تصفیه خانه، ایجاد شبکه انتقال آب و کنترل سیلاب حداکثر تا ۱۵۰ هزار ریال افزایش می یابد.

منابع

1. Satiprasad Sahoo, Chiranjit Singha, Ajit Govind & Prabhakar Sharma, *Review of aquifer storage and recovery opportunities and challenges in India* 122 ,Environmental Earth Sciences, 2025 , vol 84.
2. Tiwari, S., Yadav, B.K. Sherif, M., Singh, V.P., Sefelnasr, A., Abrar, M .*Factors Influencing the Site Selection Criteria for Efficient Aquifer Storage and Recovery (ASR) System in Saline Regions* . Water Resources Management and Sustainability, 2023 .978-3-031-24506-0.
3. Krishan, G., Garg, R .*Impacts of Urbanization on Hydrological Systems in India*.Springer, 2023 . 978-3-031-21618-3.
4. Karim Khalil, Qasim Khan & Mohamed Mohamed, *Modeling aquifer storage and recovery in the eastern district of the United Arab Emirates using MODFLOW*, Scientific Reports, 2022 ,Vol12 . 17537.
5. Quy-Nhan Pham, Viet-Hung Le, Dai-Phuc Hoang, Thi-Thoang Ta, Thanh-Le Tran, Minh-Hoang Pham & Quang-Son Nguyen, *Utilizing Aquifer Storage and Recovery as a Sustainable Water Supply Solution for Water-Scarce Regions in the Mekong Delta of Vietnam*. Geoinformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences, 2024 .978-3-031-71000-1.
6. . Ali Al-Maktoumi, Mohammad Mahdi Rajabi, Slim Zekri, Mohammad Mahdi Aghayi, Fatemeh Rezaiezadeh Roukerd, Zahra Hajibagheri & Mohammad Hashemzadeh, *Modeling coastal aquifer dynamics in Qatar for long-term water banking* .452 ,Environmental Earth Sciences, 2025 , Vol 84.
7. oceansatlas .<http://www.oceansatlas.org/subtopic/en/c/114/>

8. **Mathias, Simon A** .Fluid Flow in Porous Media .,Hydraulics, Hydrology and Environmental Engineering, Springer Nature, 2023.
9. **صالحی, احسان امامی میران, شاهین کرد, رضا,** مرور جامع منشأ, روش‌های تشخیص مکانیزم‌ها و راهکارهای کنترل تولید آب اضافی در میادین نفتی.. پژوهش نفت, ۱۴۰۳, جلد ۳۴.
۱۰. **فاتحی, سید مصطفی جعفری‌راد, رضا آذین, شهریار عصفوری, روح اله.** شبیه‌سازی جابجایی طبیعی در فرآیند دفع گازهای اسیدی به سازند آبد. ۷۷, پژوهش نفت, ۱۳۹۳, جلد ۲۴.
۱۱. **غفوری, سید علی حسینی, خلیل شهبازی, میلاد.** بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر کشش بین‌سطحی نفت-آب در سیلاب‌زنی آب هوشمند به نفت حاوی آسفالتین. ۱۴۱, ۱۴۰۴, جلد ۳۵.
12. **Bouwer, Herman** .Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering. the Journal of Hydrogeology, 2002 .Vol 142- 121.
13. **Herman Bouwer, R. David, G.Pyne** .Design, Operation, and Maintenance for Sustainable Undergrouend Storage Facilities .Denver, USA : American Water Works Association, 2008 .978-1-60573-041-7.
14. **Marc Bierkens, Stijn Reinhard, Jens de Bruijn, Willeke Veninga,** The Shadow Price of Irrigation Water in Major Groundwater-Depleting Countries. 6 ,Water Resources Research, 2019 ,Vol 55.
15. **Pyne, R.D.G** .Aquifer Storage Recovery - A guide to Groundwater Recharge Through Wells . Florida, USA : Gainesville, 2005.
16. **sonnysredwoods,** <http://www.sonnysredwoods.org/library/puttingwaterback1.cfm>.
17. **www.usgs.gov** .https://www.usgs.gov/centers/kswsc/science/equus-beds-recharge-project?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
18. **Paalman, M. et al** .Enlarging selfsuffiient horticultural freshwater supply: Greenhouse areas Haaglanden (part 1), in Dutch .Utrecht, The Netherlands : Knowledge for Climate, 2012.
19. **Zuurbier, K** .Increasing freshwater recovery upon aquifer storage: A field and modelling study of dedicated aquifer storage and recovery configurations in brackish-saline aquifers .Delft University of Technology, 2016.
20. **Dillion, Russell Martin & Peter** .Aquifer Srorage and Recovery Future Direction for South Australia .CSIRO, Department of Water, Land and Biodiversity Conservation, 2002 .Report DWLBC 2002/04.
21. **Dillon, P. Pavelic, P** .Guidelines on the quality of stormwater for injection into aquifers for storage and reuse. Urban Water Research Association, 1996 .109.

Technical and economic feasibility study of water injection method to the shallow aquifers using the well-based ASR method - a case study of an Iranian water aquifers

Mahdi Zeinali Hasanvand (1), Hamid Kardan Moghadam (2), Mohamadreza Shabani (1)

(1) Research institute of Petroleum Industry,

(2) Water Research Institute

* Correspond Author: 881006.put@gmail.com

Abstract

Over the past 4 decades, the country's population growth and the consequent increase in various drinking, agricultural and industrial activities on the one hand, and the inappropriate spatial and temporal dispersion of precipitation on the other hand, have led to an increase in the exploitation of groundwater resources (due to the high reliability of these resources), and as a result, we are witnessing a decline in groundwater resources. Currently, all provinces of the country and most industries are facing water stress, and the issue of water supply has become one of the economic, social and national priorities.

About 70% of the country's average precipitation of 400 billion cubic meters is lost due to surface evaporation or runoff. This runoff is quite evident in the coastal provinces of the country. Currently, out of about 90 billion cubic meters of water consumption in the country, more than 50% is supplied from groundwater resources. Therefore, managing water supply through groundwater reservoirs (tables) is very important. So far, traditional artificial recharge methods have been carried out with the approach of flood spreading and creating recharge ponds, but their most important criticism is the lack of planning for the maintenance of these structures, and most of them have become evaporation ponds after a period of 3 to 5 years, and in fact, instead of water infiltration, they cause evaporation and water waste. High volume of sediments, high volume of seasonal floods, and inappropriate designs are among the factors that have reduced the efficiency of artificial recharge using the pond method. The well-based storage and withdrawal method from the aquifer has successfully overcome the two issues of flooding and surface evaporation in water supply in many regions of the world over the past two decades. In this method, during the cold and rainy days of the year, river water is added to the aquifer through injection wells after the containment and purification process, and during the warm days of the year, it will be possible to exploit it through production wells. In this study, the background of this technology has been studied along with a case study of process design in one of the aquifers of the country. In this study, in addition to preparing a reliable computer model of reservoir behavior and water hydrodynamics in this porous environment for 8 injection scenarios for 1 million cubic meters to 20 million cubic meters, the effect of injection on increasing the water level in the aquifer and its recovery was investigated. Also,

using Pipesm software, the pressure drop in the well column and the injection flow rate were investigated. The results of the technical section showed that in the studied aquifer and for the defined wells, there is a daily injection capacity of 10 thousand cubic meters of water without the need for additional pressure.

Also, an economic evaluation of the required investment amount and the final cost of water has been estimated. The results show that this technology has the potential to increase storage efficiency in the country's watershed management plans. The final cost of water storage and supply is much more economical than the method of dam construction, desalination, and water transfer.

Keywords: Water injection, well-based, aquifer storage and recovery, simulation, economic evaluation

Accepted paper