IMIDRO

IRANIAN MINES AND MINING INDUSTRIES DEVELOPMENT
AND RENOVATION ORGANIZATION

سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران

IRANIAN MINES AND MINING INDUSTRIES DEVELOPMENT AND RENOVATION ORGANIZATION
سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران

مطالعه و بررسی مقدماتی امکان استفاده از آب‌های ژرف در حوزه معدنی سنگان

گزارش خلاصه مدیریتی

قرارداد شماره ۳۶۹۱۷

مجری: جهاددانشگاهی واحد صنعتی اصفهان

علی قاسمی

۱۴۰۱

شناسنامه پروژه

عنوان پروژه: مطالعه و بررسی مقدماتی امکان استفاده از آب‌های ژرف در حوزه معدنی سنگان

گزارش ارسالی: خلاصه مدیریتی

کارفرما: سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)

مجری: جهاددانشگاهی واحد صنعتی اصفهان

مدیر پروژه: علی قاسمی

همکاران: همایون صفایی، محمد سیاری، محبوبه فریدونپور، جواد طاهری

خلاصه مدیریتی

عواملی همچون رشد جمعیت، گسترش صنعت، بالا رفتن سطح بهداشت و رفاه عمومی، کاهش سرانه منابع آبی تجدیدشونده و نیز تغییر شرایط آب و هوایی منجر به افزایش رشد تقاضای آب نسبت به رشد جمعیت گردیده و منابع آبی جوابگوی نیاز بشر نمی‌باشد. این به معنی رخداد یک بحران جدی آب در سطح جهان است. خشکسالی‌ها و کم‌آبی‌های چند سال اخیر تأثیرات بسیار نامناسبی را بر مسائل مختلف از جمله در زمینه کشاورزی، شرب، صنعت، محیط‌زیست، گردشگری و... داشته است. برای رفع این بحران راهکارهای متعددی وجود دارد و یکی از آن‌ها اکتشاف و استفاده از آب‌های همچون آب‌های گسلی و کارستی تجدیدپذیر برای مصارف مختلف است. منظور از اجرای این طرح اکتشاف منابع آب گسلی است که تجدید پذیر بوده و به هیچ عنوان مخاطرات زیست‌محیطی ایجاد نمی‌کنند، در بیلان آب زیرزمینی آبخوان منطقه محاسبه نشده‌اند، کیفیت شیمیایی مناسبی داشته و از نظر عمق نیز بهره‌برداری از آن‌ها اقتصادی است. آب‌های زیرزمینی در مسیر پهنه‌های گسلش به ویژه گسل‌های فعال یکی از آب‌های گسلی و کارستی موجود در سازندهای سخت تجدیدپذیر هستند.

معدن آهن سنگان در شهرستان خواف، بزرگترین پروژه ملی در شرق کشور است. این معدن به دلیل عیار بالای آهن، پائین بودن میزان فسفر و ذخیره زیاد، یکی از مهم‌ترین کانسارهای آهن ایران به شمار می‌رود. سنگ‌های مافیک و الترامافیک، سنگ‌های پلوتونیکی و واحدهای رسوبی عمده واحدهای تشکیل‌دهنده در منطقه می‌باشند. این واحدها به‌صورت بالقوه می‌توانند تأثیرات منفی بر کیفیت منابع سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز خواف داشته باشند. رخنمون‌های واقع در حواشی شمالی و جنوبی دشت، بر کیفیت منابع آب سطحی و به سبب تشکیل سنگ کف آبخوان بر کیفیت آب زیرزمینی، تأثیرات منفی دارد. از آنجایی که این واحدها سنگ کف آبخوان دشت خواف را تشکیل می‌دهند به صورت یکپارچه سبب افزایش املاح آب زیرزمینی می‌گردند و با توجه به ماندگاری منابع آب در بخش پایینی آبخوان، نقش تخریبی این واحد بر منابع آب زیرزمینی مهم و قابل‌توجه است. شناسایی، اکتشاف و بهره‌برداری از منابع آب ژرف در چند دهه اخیر مورد توجه بسیاری از کشورهای

واقع در مناطق خشک و فراخشک جهان به ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا بوده است. در این مناطق که عمدتاً دسترسی به منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق فراهم نیست، آب ژرف بخش قابل‌توجهی از مصارف آب (به ویژه در بخش شرب) را تأمین نموده و فرصتی برای ارتقا رفاه اجتماعی و توسعه اقتصادی در شرایط کمبود شدید آب را فراهم نموده است. بررسی‌های انجام شده در کشورهای بهره‌بردار منابع آب ژرف نشان می‌دهد اگر توسعه بهره‌برداری از این منابع براساس معیارهای خاصی صورت پذیرد ریسک‌های بهره‌برداری (حتی از انواع تجدید ناپذیر) این منابع قابل مدیریت بوده و جامعه می‌تواند به‌صورت پایدار از آن‌ها بهره‌مند شود. شناخت همه جوانب مربوط به منابع آب ژرف اعم از توسعه روش‌شناسی صحیح برای شناسایی و اکتشاف و تبیین مسائل زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حقوقی مترتب بر بهره‌برداری و سپس در نظرگیری دقیق آن‌ها اهمیت زیادی دارد. اگرچه موضوع استفاده از منابع آب ژرف در سال‌های اخیر به‌طورجدی در کشور مطرح شده اما ابعاد مختلف این منابع آب برای جامعه علمی و مدیریتی کشور به میزان لازم و کافی مورد بحث و بررسی علمی قرار نگرفته است. در اینجا تلاش شده است ضمن ارائه ویژگی‌ها و مشخصه‌های این منابع آبی محدودیت‌ها و ملاحظات حاکم بر بهره‌برداری از آن‌ها ارائه شود.

ارائه چالش‌های فنی و اقتصادی و اجتماعی استحصال آب ژرف در حوزه معدنی سنگان

در این بخش به تشریح ویژگی‌های اصلی منابع آب ژرف در جنبه‌های مختلف پرداخته شده است.

ژرفا عمق قرارگیری منابع آب ژرف به شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی منطقه وابسته است لذا حد ژرفای مطلقی بین منابع آب زیرزمینی معمول (آزاد و محبوس) و ژرف نمی‌توان در نظر گرفت. در یک تعریف ساده منابع آب ژرف را می‌توان منابع آب زیرزمینی (غالباً محبوسی) در نظر گرفت که در اعماق زیرین منابع آب زیرزمینی کشف‌شده و در حال حاضر از آن استفاده می‌شود. بر این اساس در نقاط مختلف جهان اعماق متفاوتی برای عمق تشکیل و قرارگیری آبخوان‌های ژرف گزارش شده است. در بنگلادش به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی منابع آب موجود ژرفای بیش از ۱۵۰ متر

جز منابع آب ژرف در نظر گرفته شده است. ژرفای ایـن منـابع در نـواحی خشـک خاورمیانـه (ماننـد عربستان و اردن) ۱۲۰۰ متر و در شمال آفریقا (مانند مصر، لیبی، الجزایر و تونس) بین ۸۰۰ تا ۱۶۰۰ متر گزارش شده است. در منطقه سنگان بر اساس مطالعات انجام شده و شواهد زمـین‌شناسـی عمـق احتمالی آب ژرف بالای ۱۵۰۰ متر می‌باشد.

تجدیدپذیری، زمان ماندگاری و منشأ: شیب هیدرولیکی آب زیرزمینـی در آبخـوان‌هـای ژرف اغلب بسیار کم و نزدیک به صفر است؛ در نتیجه سرعت جریان آب زیرزمینی در این آبخوان‌ها اغلـب بسیار اندک و در حد چند متر در سال گزارش شـده اسـت (جـدول ۱). از طرفـی مسـیر گـردش آب زیرزمینی در یک آبخوان ژرف به‌گونه‌ای است که فاصله محل تغذیه تا تخلیه می‌تواند بـالغ بـر صـدها کیلومتر باشد. با توجه به سرعت جریان کم و طولانی بودن مسیر جریان، متوسط زمان مانـدگاری آب زیرزمینی در این منابع اغلب بسیار زیاد است. بر مبنای نتایج آن‌ها بیش از ۵۰ درصد کل چاه‌هایی که عمق بیش از ۲۵۰ متر دارند دارای مؤلفه آبی غالب با زمان ماندگاری قبل از دوره هولوسـن (۱۲۰۰۰ سال قبل) هستند (شکل ۱). بررسی‌هـا نشـان مـی‌دهـد متوسـط زمـان مانـدگاری آب زیرزمینـی در آبخوان‌های ژرف اغلب بسیار طولانی است و حتی به بیش از یک میلیون سال می‌رسد (جدول ۱).

جدول ۱: متوسط زمان ماندگاری و سرعت جریان آب زیرزمینی در برخی آبخوان‌های ژرف معروف جهان

نام آبخوان ژرف*	کشور(ها)	سرعت جریان (متر بر سال)		متوسط زمان ماندگاری		مرجع
		روش ایزوتوپی	روش مدل‌سازی	مدت (سال) *	روش سن‌سنجی	
Great Artesian Basin	استرالیا	۰/۱۳۳ تا ۰/۴۳۳	-	۷۰۰،۰۰۰ تا ۱،۰۶۰،۰۰۰	^{4}He و ^{36}Cl	Mahara و همکاران (۲۰۰۹)
Continental Intercalaire	الجزایر و تونس	۳ تا ۶	۲۰ تا ۴۰	۲۵،۰۰۰ تا ۳۰،۰۰۰	^{14}C و ^{13}C	Edmunds و همکاران (۲۰۰۳)
		-	-	بیش از ۵۰۰،۰۰۰	^{36}Cl	Petersen و همکاران (۲۰۱۸)
Eocene Sands	فرانسه	-	۵	۲۰،۰۰۰ تا ۲۵،۰۰۰	^{14}C	André و همکاران (۲۰۰۵)
Sherwood Sandstone	انگلستان	۰/۶	۰/۲	کمتر از ۱۰۰،۰۰۰	^{14}C	Edmunds و Smedley (۲۰۰۰)؛ Bath و همکاران (۱۹۸۷)
Bangal Aquifer	بنگلادش	-	۴/۴	۳،۰۰۰ تا ۹،۰۰۰	^{14}C	Hoque و Burgess (۲۰۱۲)

منابع آب زیرزمینی از دیدگاه عامه اغلب تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شوند؛ امـا در برخـی مـوارد متوسط زمان ماندگاری آب در این منابع به ویژه در ژرفای زیاد زمین، صدها و هزاران سال بوده که در مقایسه با دوره زمانی فعالیت‌های بشر به ویژه در ارتباط با برنامه‌ریزی منابع آب بسیار طولانی است.

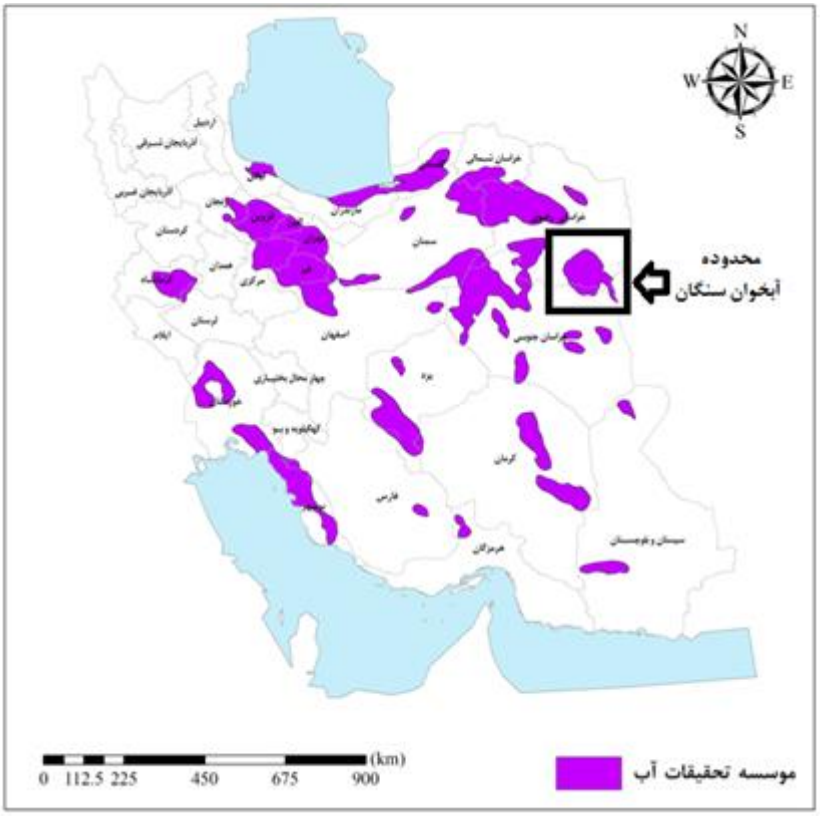
براساس تعریف پیشنهادی یونسکو در مطالعه منابع آب ژرف اغلب استناد می‌شود منابع آب زیرزمینی که دوره تجدید آن‌ها بیش از ۵۰۰ سال باشد تجدیدناپذیر در نظر گرفته می‌شوند؛ به عبارت دیگر در یک آبخوان تجدیدناپذیر نرخ تجدیدپذیری کمتر از ۰/۲ درصد در سال منظور شده است. بر این اساس منابع آب ژرف تجدیدپذیر را می‌توان دست‌های از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفت که زیر آبخوان‌های کم‌عمق در حال برداشت کنونی و در ژرفای زمین قرار گرفته است. این منابع دارای منشأ آب جوی هستند و در چرخه هیدرولوژیکی با نرخ تجدید پذیری اندک (که باید بیشتر از 0/2 درصد در سال باشد) مشارکت دارند. لازم به ذکر است طبق تعریف یونسکو بیشتر منابع آب ژرف کشف شده جهان در دسته منابع آبی تجدیدناپذیر قرار دارند و این منابع را با توجه به منشأ آن‌ها می‌توان به دو گروه کلی دسته‌بندی نمود:

الف: منابع آب ژرف تجدید ناپذیر فسیلی یا آب سازندی که در زمان رسوب‌گذاری در میان فضاهای خالی لایه‌های رسوبی به دام افتاده و به‌وسیله ساختارهای زمین‌شناسی محبوس شده است. کیفیت آب این منابع اغلب ازنظر شرب و حتی کشاورزی نامطلوب است.

ب: منابع آب ژرف تجدید ناپذیر دارای منشأ بارش‌های جوی اقلیم دیرینه ۸ با متوسط زمان ماندگاری بیش از ۵۰۰ سال، با توجه به شرایط اقلیمی محلی در اعصار گذشته در واحدهای رسوبی و یا سنگی (رسوبی، آذرین و یا دگرگونی) تغذیه و به‌وسیله ساختارهای زمین‌شناسی محبوس شده است. بیشتر منابع آب ژرف کشف‌شده در دنیا جز این گروه می‌باشند.

تعیین متوسط زمان ماندگاری و منشأ منابع آب ژرف با سنجش ایزوتوپ‌های پایدار و ناپایدار (اکسیژن، هیدروژن، کربن و غیره) و مقادیر و نسبت‌های یونی انجام می‌شود. الگوی پیچیده جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های ژرف توسط ساختارهای زمین‌شناسی کنترل می‌شود و تعیین منشأ آب‌های زیرزمینی مسیرهای اصلی جریان و چگونگی اختلاط این آب‌ها را با مشکل مواجه می‌نماید. بهر حال تجدیدپذیری، زمان ماندگاری و منشأ آب‌های ژرف احتمالی در منطقه سنگان پس از انجام مطالعات مگنتوتلوریک و حفر چاه اکتشافی و پس از انجام مطالعات هیدرولیک چاه و مطالعات ایزوتوپی قابل محاسبه است.

ابعاد: حجم ذخیره، گسترش فضایی و ضخامت اشباع منابع آب ژرف کشف شده در جهان قابل توجه است؛ به طوری که برای برخی از آبخوان‌های ژرف گسترش فضایی بیش از یک میلیون کیلومترمربع، ضخامت اشباع چند صد تا چند هزار متر و حجم ذخیره آبی در حد ده‌ها هزار میلیارد مترمکعب گزارش شده است. ابعاد ذخیره آب ژرف در محدود سنگان فراتر از مرزهای آبخوان بوده و مربوط به ضخامت و گسترش واحدهای سازندی نفوذپذیر می‌باشد. برای مطالعه هندسی آبخوان نیاز به مطالعات چینه‌شناسی دقیق منطقه در یک فاز تفصیلی در کل محدوده و حتی محدوده‌های مجاور است. در مطالعاتی که توسط سازمان تحقیقات آب انجام شده حدود آبخوان احتمالی نمایش داده شده است (شکل ۱).



شکل ۱: محدوده آبخوان‌های ابرحوضه‌ای ایران (مؤسسه تحقیقات آب)

کیفیت: ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی حاصل برآیند کلیه عواملی است که از زمان تراکم آب در جو، عبور آب از زون‌های غیراشباع و اشباع تا لحظه خروج آب از منطقه تخلیه آبخوان عمل می‌نمایند. عوامل متعددی همچون ترکیب شیمیایی آب بارش، جنس زمین (بدنه آبخوان)، اختلاط، زمان

ماندگاری آب زیرزمینی، تبخیر و شرایط فیزیک و شیمیایی محیطی بر کیفیت منابع آب زیرزمینی مؤثر است، در ادامه اثرات این عوامل بر کیفیت منابع آب ژرف به اختصار تشریح می‌شود.

الف: ترکیب شیمیایی، آب بارش، مواد محلول در آب بارش می‌تواند به آب زیرزمینی منتقل شود و میزان مواد محلول در آن را افزایش دهد. همچنین در صورت بالا بودن اسیدیته (اسیدی بودن بارش)، قابلیت انحلال آب بارش بیشتر خواهد بود و در نتیجه مواد بیشتری در مسیر حرکت آب در زیرزمین حل خواهد شد. اثر این عامل بر کیفیت آب زیرزمینی به ویژه از نوع ژرف قابل اغماض است.

ب: تبخیر، پدیده تبخیر موجب افزایش غلظت مواد محلول در آب باقیمانده می‌شود. این پدیده بر منابع آب جوی، سطحی و زیرزمینی (حداکثر تا عمق یکی دو متر) اثرگذار است؛ بنابراین اثر آن بر کیفیت آب‌های زیرزمینی ژرف قابل توجه نخواهد بود.

ج: لیتولوژی، جنس واحدهای زمین‌شناسی در مسیر جریان زیرسطحی (در منطقه اشباع و غیراشباع) را می‌توان مهم‌ترین عامل مؤثر بر ترکیب هیدروشیمیایی آب زیرزمینی (ژرف یا کم‌عمق) دانست. میزان مواد محلول آب زیرزمینی در تماس با ماسه‌سنگ‌های سیلیسی با درجه خلوص بالا و اغلب سنگ‌های آذرین و دگرگونی چندان افزایش نمی‌یابد؛ زیرا کانی‌هایی که قابلیت انحلال زیاد دارند، در سنگ‌های مزبور کمتر یافت می‌شود. به علت وجود کانی‌های با قابلیت انحلال زیاد (نظیر ژیپس و انواع کانی‌های تبخیری) میزان مواد محلول آب در تماس با برخی واحدهای زمین‌شناسی می‌تواند افزایش یابد، به طوری که میزان مواد محلول در منابع آب زیرزمینی (کم‌عمق یا ژرف) می‌تواند بیشتر از آب دریا باشد.

د: اختلاط، ترکیب آب‌های زیرزمینی که منشأهای مختلفی دارند، علاوه بر ایجاد یک ترکیب شیمیایی جدید برای آب حاصله (بر مبنای نسبت اختلاط)، می‌تواند منجر به افزایش قابلیت انحلال آب زیرزمینی شده و در نتیجه افزایش مواد محلول آب را به همراه داشته باشد. پدیده اختلاط می‌تواند ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی ژرف را به شدت تحت‌تأثیر قرار دهد.

و: زمان ماندگاری، طولانی بودن مسیر تغذیه - تخلیه و کند بودن سرعت جریان آب زیرزمینی موجب طولانی شدن زمان ماندگاری آب در محیط زیرزمینی می‌شود. با افزایش زمان ماندگاری به

دلیل افزایش مدت‌زمان تماس آب با رسوبات و سنگ‌ها زمان کافی برای انجام فعل‌وانفعالات شیمیایی و به اشباع رسیدن آب نسبت به یون‌های مختلف وجود دارد؛ بنابراین به عنوان یک قاعده کلی غلظت مواد محلول آب‌های زیرزمینی قدیمی نسبت به آب زیرزمینی جدید اغلب بیشتر است. اثر این عامل بر افزایش میزان مواد محلول در آب‌های زیرزمینی به گونه‌ای است که در یک آبخوان ژرف مناطق کم‌عمق‌تر با زمان ماندگاری کمتر دارای مواد محلول کمتری است. منابع آب ژرف با زمان ماندگاری زیاد (اغلب تجدیدناپذیر) در اثر تماس طولانی‌مدت با بدنه آبخوان ممکن است باعث کاهش شدید کیفیت شوند. به طوری که غلظت برخی یون‌ها در این آب‌ها می‌تواند بسیار بیش از حد مجاز شده و حتی مواد رادیواکتیو و برخی عناصر و فلزات سنگین که قابلیت انحلال پایینی دارند به میزان زیاد در آن‌ها یافت شود. غلظت بالای یون‌هایی از قبیل فلوئور، لیتیوم، وانادیم، آهن، منگنر، سیلیس، آرسنیک، کروم، استرانسیوم، نیترات و مواد رادیواکتیو در برخی منابع آب ژرف جهان که زمان ماندگاری زیادی داشتند گزارش شده است.

ه: شرایط فیزیک و شیمیایی محیطی، متغیرهای محیطی فیزیکی (دما و فشار) و شیمیایی (اسیدیته و شرایط اکسیداسیون و احیا) بر انحلال و رسوب‌گذاری املاح مختلف در آب زیرزمینی تأثیرگذار هستند. در منابع آب ژرف این عوامل می‌توانند موجب افزایش قابل‌توجه غلظت برخی از عناصر (نظیر کروم) شوند.

محدودیت‌ها و ملاحظات بهره‌برداری

با توجه به مشخصه‌های آبخوان‌های ژرف که به آن‌ها اشاره شد بهره‌برداری از این منابع با محدودیت‌ها و ملاحظات خاصی روبه‌رو است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

ملاحظات سیاسی ـ اجتماعی: با توجه به گستره وسیع آبخوان‌های ژرف چالش‌های سیاسی (بین کشوری) و اجتماعی (بین استان‌ها) برای بهره‌برداری از منابع آب ژرف دور از انتظار نیست. بسیاری از آبخوان‌های ژرف مهم کشف‌شده در جهان گستره سطحی و حجم ذخیره آب قابل‌توجهی دارند که اغلب بین دو یا چند کشور مشترک می‌باشند؛ بنابراین بهره‌برداری از این منابع آبی مشترک

اغلب در چارچوب قواعد و حقوق بین‌الملل مربوطه میسر خواهد بود. سازمان یونسکو در سال ۲۰۰۳ کارگروه مدیریت منابع آب زیرزمینی مرزی (مشترک) بین‌المللی (ISRAM) را برای مدیریت آبخوان‌های مرزی و مشترک تشکیل داده است (Vrba & Verhagen,2011). این کارگروه در اواخر سال ۲۰۰۸ مصوبه شماره A/RES/63/124 در خصوص نحوه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مرزی و مشترک را در جلسه شصت و سوم مجمع عمومی سازمان ملل متحد به تصویب رساند که طی مصوبه شماره A/RES/71/150 در سال ۲۰۱۶ به‌روزرسانی شد. مصوبه مزبور رویکرد بین‌المللی حاکم برای بهره‌برداری پایدار و منصفانه از آبخوان‌های مرزی مشترک را تبیین نموده است.

کیفیت و آلودگی: آب‌های زیرزمینی ژرف می‌توانند شیرین، لب‌شور، شور و یا حتی بسیار شور باشند. این منابع در برخی مناطق نظیر شمال‌شرق آفریقا و کشورهای عربی با وجود تجدیدناپذیر بودن به دلیل کیفیت بالا و میزان مواد محلول کم (که در برخی موارد کمتر از ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است) برای تأمین آب شرب و کشاورزی بهره‌برداری می‌شوند. درصورتی‌که غلظت مواد محلول منابع آب ژرف زیاد باشد ممکن است بهره‌برداری از آن‌ها حتی برای مصارف کشاورزی مقدور نباشد. برخی عناصر کمیاب، فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو در غلظت‌های خطرناک بیش از حد مجاز مصارف مختلف در آب‌های ژرف ممکن است وجود داشته باشد. لازم به ذکر است منابع آب ژرف شور و بسیار شور اگرچه به لحاظ منبع آبی اقتصادی نیستند اما به دلیل وجود برخی عناصر ارزشمند در غلظت‌های بالا می‌توانند ارزش فرآوری مواد معدنی را داشته باشند. در منطقه داشلی برون در استان گلستان طی مطالعات اکتشافی ژئوفیزیکی و حفاری نفتی در اعماق ۲۲۰۰ متری شورابه‌هایی با مقادیر قابل توجه ید کشف و بهره‌برداری شد. برداشت از منابع آب زیرزمینی ژرف که اغلب املاح بیشتری نسبت به سایر منابع آبی دارند، می‌تواند در درازمدت باعث افزایش شوری منابع خاک و آب (سطحی و زیرزمینی کم‌عمق) شود. لازم به ذکر است در صورت نیاز به تصفیه آب ژرف لب‌شور یا دارای آلودگی فلزات سنگین و رادیواکتیو تبعات زیست‌محیطی پساب تولیدی بسیار چالش‌زا است.

مخاطرات زیست‌محیطی: واکنش آبخوان‌های کم‌عمق نسبت به تنش (برداشت از ذخیره به‌وسیله چاه) سریع و به‌صورت افت سطح آب زیرزمینی یا سطح پیزومتریک است. درحالی که واکنش

هیدرولیکی منابع آب ژرف نسبت به برداشت آب کندتر از منابع آب زیرزمینی کم‌عمق‌تر بوده و اغلب بعد از چندین سال نمایان می‌شود. برداشت آب زیرزمینی از آبخوان ژرف مخاطرات زیست‌محیطی را به همراه دارد که به شرح ذیل است:

الف-کاهش آبدهی و خشک شدن چشمه‌ها و چاه‌های مرتبط: با برداشت آب از آبخوان ژرف آبدهی چشمه‌ها و چاه‌های مرتبط که به‌صورت طبیعی آن را زهکشی می‌کنند کاهش خواهد یافت. برداشت آب از آبخوان ژرف North WesternSahara آفریقا منجر به کاهش آبدهی چشمه‌های مرتبط با این آبخوان در درازمدت شده است. بررسی سری زمانی نرخ بهره‌برداری و تعداد چاه‌ها و چشمه‌های آرتزین مرتبط با آبخوان ژرف Djeffara در شمال آفریقا نشان می‌دهد با وجود اینکه نرخ بهره‌برداری از این آبخوان از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۸ تقریباً ثابت بوده و افزایش نیافته اما با افت فشار آبخوان در درازمدت تعداد منابع آب آرتزین منطقه به شدت کاهش یافته است.

ب- تغییر رژیم هیدرولیکی آبخوان‌های کم‌عمق (آبرفتی) و کاهش نرخ تغذیه از سنگ کف آن‌ها: آبخوان‌های ژرف عموماً از نوع تحت‌فشار می‌باشند، بنابراین اگر بار هیدرولیکی و شرایط زمین‌شناسی در یک منطقه به‌گونه‌ای باشد که آبخوان ژرف تغذیه‌کننده یک آبخوان کم‌عمق از طریق سنگ کف باشد با افت فشار در آبخوان ژرف میزان نرخ تغذیه از سنگ کف آبخوان کم‌عمق کاهش خواهد یافت؛ بنابراین از سنگ کف آبخوان کم‌عمق کاهش خواهد یافت؛ بنابراین بار هیدرولیکی در آبخوان کم‌عمق شود جهت جریان طبیعی بار هیدرولیکی در آبخوان کم‌عمق شود جهت جریان طبیعی ژرف شود. در چنین شرایطی ذخیره آبی آبخوان کم‌عمق (که کیفیت بهتری دارد) به اعماق بیشتر نفوذ کرده و شدت افت سطح آب زیرزمینی در این آبخوان بیشتر خواهد شد.

ج- فرونشست زمین: آب زیرزمینی به‌وسیله چاه موجب کاهش فشار آب منفذی، افزایش فشار در بدنه آبخوان و در نتیجه فرونشست غیرالاستیک (برگشت‌ناپذیر) فضاهای خالی می‌شود که در سطح زمین نیز نمود می‌یابند. شواهد فرونشست زمین در اثر بهره‌برداری گسترده (در حد یک میلیون مترمکعب بر روز) از آبخوان ژرف Nubian، در جنوب شرق لیبی گزارش شده است.

ملاحظات اقتصادی: منابع آب ژرف در اعماق زیاد زمین واقع شده است در نتیجه هزینه‌های شناسایی، اکتشاف، حفاری، بهره‌برداری و تصفیه آب آن‌ها بیشتر از هزینه‌های مشابه برای منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق است. بیشتر منابع آب ژرف مهم جهان (که در زمره منابع آب تجدید ناپذیر به شمار می‌روند) در مناطق خشک و نیمه‌خشک با منابع آب سطحی و زیرزمینی کم‌عمق تجدیدپذیر ناچیز کشف شده است؛ بنابراین ارزش واقعی آب برای استمرار حیات و توسعه انسانی در این مناطق نسبت به هزینه‌های صرف شده برای دسترسی به آن قابل‌توجه می‌باشد.

مقایسه تأمین آب حوزه معدنی سنگان از استحصال آب‌های ژرف با سایر روش‌های تأمین آب

حوضه آبریز خواف با وسعت ۵۱۴۴/۵۴ کیلومترمربع، در بخش شمالی حوضه آبریز نمکزار خواف، در جنوب استان خراسان واقع شده است. قدیمی‌ترین سازند بررسی شده در محدوده مطالعاتی سنگ‌های دگرگونی و ولکانیکی پروتروزوئیک هستند که در بخش‌های شرقی محدوده رخنمون دارند و جوان‌ترین سازندها نیز نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر و کفه‌های رسی است که به ترتیب در بستر رودخانه‌ها و بخش‌های میانی محدوده نهشته شده‌اند. رخساره‌های ارتفاعات شمالی که از ماسه‌سنگ‌های الیگوسن، آندزیت و بازالت ائوسن که در بخش سطحی هوازده و شکسته می‌باشند قابلیت جذب و تا حدودی ذخیره آب را دارند. رسوبات آبرفتی که در نتیجه فرسایش ارتفاعات شمالی و حمل آن‌ها توسط رودهای کال سده، سیجاوند، شهرک، سلامی، فایندر و... می‌باشد، در حاشیه شمالی دشت دانه درشت و نفوذپذیر می‌باشد که به سمت مرکز دشت حاشیه جنوبی دانه‌ریز شده و میزان آبدهی چاه‌ها در این جهت کاهش می‌یابد. جهت شناخت خصوصیات لایه آبرفتی، مطالعات ژئوفیزیک به روش ژئوالکتریک نشان می‌دهد سنگ کف دشت ناهموار بوده و فرورفتگی اصلی آن در نیمه غربی متمایل به حاشیه شمالی می‌باشد. مقاومت آبرفت در امتداد فرورفتگی زیاد بوده و از آبرفت‌های درشت‌دانه تشکیل شده است که مربوط به افزایش درصد رس و شوری آب زیرزمینی است. سنگ کف در نیمه جنوبی از رس‌های میوسن و در بخش شمالی از کنگلومرای پلیوسن تشکیل شده

است. به نظر می‌رسد ضخامت آبرفت در جنوب شرق خواف کاهش‌یافته و از عناصر دانه‌ریز رسی با مقاومت کم تشکیل شده است. بررسی‌های صورت گرفته در محدوده مطالعاتی خواف نشان می‌دهد آزمایشات پمپاژ در ۱۰ حلقه چاه اکتشافی و پیزومتر صورت گرفته و حداقل و حداکثر مقادیر قابلیت انتقال در این آبخوان ۳۷۸ و ۲۳۲۱ مترمکعب بر روز می‌باشد. طبق آخرین آماربرداری انجام شده در دشت خواف (آماربرداری سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷) تعداد ۴۳۴ حلقه چاه با تخلیه ۱۴۷/۱۸، ۸۷ رشته قنات با تخلیه ۲۰/۱۲ و ۳۳ دهانه چشمه با تخلیه ۱/۳۵ میلیون مترمکعب وجود دارد؛ بنابراین سالانه ۱۶۸/۶۵ میلیون مترمکعب از آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی خواف برداشت و به مصارف مختلف می‌رسد. در محدوده مطالعاتی خواف، ۳۴۲ حلقه چاه کشاورزی (با تخلیه سالانه ۱۳۹/۰۲ میلیون مترمکعب)، ۳۵ حلقه چاه شرب (با تخلیه ۶/۴۹ میلیون مترمکعب) و ۵۷ حلقه چاه صنعتی (با تخلیه سالانه ۱/۶۷ میلیون مترمکعب) وجود دارد. سطح آب زیرزمینی در آبخوان خواف از سال آبی ۶۸ـ۱۳۶۷ تا سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ اندازه‌گیری شده است. براساس نتایج حاصل از هیدروگراف آبخوان خواف، مجموع افت سطح آب زیرزمینی طی ۲۸ سال آمار حاصل از شبکه رفتارسنجی، برابر ۲۶/۰۷ متر و متوسط افت سالانه برابر ۰/۹۳ متر می‌باشد. مجموع افت سطح آب زیرزمینی از مهرماه سال آبی ۶۸-۱۳۶۷ تا شهریورماه سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ معادل ۲۶/۰۷ متر است که با توجه به تعداد سال‌های آماری، متوسط افت سطح آب زیرزمینی معادل ۰/۹۳ متر می‌باشد؛ بنابراین متوسط کسری مخزن ۲۸ ساله در آبخوان خواف سالانه معادل ۴۹/۶۹ میلیون مترمکعب در سال است. این آمار نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب منابع آب زیرزمینی جهت استفاده در مصارف جدید و صنعتی است.

در سال‌های اخیر به دلیل افزایش مصرف آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی و بعضاً خشکسالی‌های متوالی، شاهد کمبود آب هستیم. برآوردهای اولیه برای آب موردنیاز منطقه سنگان خواف، سالانه حدود ۲۲ میلیون مترمکعب بود که بعدها به ۱۸ میلیون مترمکعب رسید که با توجه به‌روز شدن فناوری بازچرخانی و فناوری بازیابی آب، اکنون این نیاز با در نظر گرفتن آب مورد نیاز برای توسعه فضای سبز به ۱۷ میلیون مترمکعب آب در سال رسیده است.

تعدادی از راهکارهای پیش رو جهت رفع مشکل کم‌آبی عبارت‌اند از: تأمین آب از تصفیه پساب‌های شهرهای اطراف، انتقال آب از حوضه‌های اطراف و انتقال آب از دریای عمان و نیز استحصال آب‌های ژرف تجدیدپذیر. برای تأمین آب صنایع فولادی سه طرح کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت برای این موضوع تعریف شده است. در کوتاه‌مدت و میان‌مدت آب مورد نیاز صنایع از افزایش بهره‌برداری از آب چاه‌های کشاورزی و تخصیص حجم آب صرفه‌جویی شده به صنعت تأمین خواهد شد. در درازمدت برای تأمین آب پایدار طرح شیرین سازی و انتقال آب از دریای عمان در دستور کار قرار دارد. پساب شهرها شیوه‌ای مطمئن در میان‌مدت و حتی بلندمدت برای تأمین نیاز صنایع فولادی سنگان خواف است. سه میلیون مترمکعب در دشت زوزن، سه میلیون مترمکعب در محدوده مطالعاتی نمکزار خواف، دو میلیون مترمکعب در محل مطالعاتی خواف و یک میلیون مترمکعب هم آب از محل سد سده قابل تأمین است. براساس مصوبه سال ۱۳۶۵ شورای عالی منابع آب کشور قرار شده بود منابع آب دشت زوزن خواف با گنجایش ۴۵۰ لیتر در ثانیه به‌صورت منطقه ممنوعه و تنها برای مصرف آب صنایع سنگان در نظر گرفته شود. بر اساس مصوبه دیگری در سال ۱۳۹۲ دشت زوزن از حالت ممنوعه خارج و منابع آب آن به سایر مصارف هم اختصاص یافت که این مسئله مشکلات و محدودیت‌های زیادی برای صنایع سنگان ایجاد کرد چون حیات و ادامه فعالیت‌های این صنایع به آب بستگی دارد. بخشی از نمکزار خواف در منطقه حفاظت‌شده «سیرخون» قرار داد که در قسمتی از آن که از سوی سازمان حفاظت محیط‌زیست مجوز دریافت شده چاهی حفر گردید اما به آب نرسید و در باقی این منطقه حفاظت‌شده، سازمان حفاظت محیط‌زیست اجازه حفاری نمی‌دهد. از محل سه میلیون مترمکعب آبی که از دشت زوزن برای تأمین آب موردنیاز صنایع فولادی سنگان اختصاص یافت، مجوز حفر ۶ چاه گرفته شده است. از محل حق آبراه سد سده، در ابتدا ۱.۵ میلیون مترمکعب آب در سال به صنایع فولادی سنگان اختصاص یافت اما وزارت نیرو از این میزان کاسته و آن را به ۴۰۰ هزار مترمکعب رسانده است. هر چند برای صنعت توجیه اقتصادی ندارد که برای انتقال ۴۰۰ هزار مترمکعب آب در سال از سد سده با همه معارض‌هایی که در مسیر وجود دارد دو هزار میلیارد ریال هزینه کند و آن را به منطقه سنگان برساند.

در ارتباط با افزایش راندمان انتقال و کاربرد داخل مزرعه، از طریق احداث شبکه‌های نوین و استفاده از روش‌های جدید آبیاری، اقدامات اساسی انجام و بعضاً در شرف انجام است و به نظر نمی‌رسد کافی باشد. زیرا افزایش راندمان آبیاری کاهش نفوذ آب داخل زمین و متعاقب آن خشک شدن چاه‌های منطقه را به دنبال خواهد آورد. متعاقب آن تأثیر خشک شدن چاه‌های منطقه نیز کم شدن انعطاف استفاده از آب چاه‌ها در زمان آبیاری مزارع و به‌عبارت‌دیگر وابستگی شدید آبیاری مزارع، به جاری بودن آب در رودخانه و کانال‌ها است. هرچند که این روش نیز باعث کاهش سطح آب زیرزمینی حوضه مذکور شده و در نهایت با توجه به عدم تغذیه مناسب این آبخوان باعث مشکلات فراوانی شده و به‌عنوان یک منبع پایدار نمی‌توان به آن توجه کرد. در صورت برخورد علمی با موضوع آب کشاورزی در منطقه خواف سنگان به طور قطع در کوتاه‌مدت و میان‌مدت می‌توان آب صنایع سنگان را تأمین کرد. لازم به ذکر است آب مصرفی در دشت‌های خواف، زوزن و رشت خوار سالانه ۲۸۰ میلیون مترمکعب است که با صرفه‌جویی پنج‌درصدی در برداشت می‌توان ۱۴ میلیون مترمکعب بقیه را برای مصرف صنایع معدنی سنگان اختصاص داد. کل میزان آب موردنیاز طرح‌های توسعه فولاد استان در سنگان خواف، ۲۱ میلیون مترمکعب در سال است.

پساب فاضلاب شهرها شیوه‌ای مطمئن در میان‌مدت و حتی بلندمدت برای تأمین نیاز صنایع فولادی سنگان خواف است. در خصوص استفاده از پساب مشهد نیز دو مشکل وجود دارد. یکی مشکلاتی مانند مسیر اجرای پروژه، وجود زمین‌های معارض و اختلاف ارتفاع است و مشکل دیگر مربوط به مسائل منطقه‌ای و اجتماعی است که ریسک اجرای این پروژه را به شدت بالا برده است. لازم به ذکر است ۹۵ میلیون مترمکعب هم‌اکنون در شهر مشهد آب تصفیه و وارد کشف رود می‌شود. کل آب مورد نیاز صنایع سنگان حدود ۱۸ میلیون مترمکعب است یعنی حدود ۱۸ درصد از آبی که تصفیه و وارد کشف رود می‌شود که می‌تواند کل منطقه را از این خطر نجات دهد. از جمله سایر طرح‌های تأمین آب می‌توان به طرح مهار آب‌های سطحی از خروجی دشت خواف اشاره کرد و می‌توان آب‌های سطحی که از کشور را خارج می‌شود مهار تا برای منطقه سنگان مورد استفاده قرار گیرد. این پروژه عظیم و زیرساختی در قالب قرارداد BoT (ساخت، بهره‌برداری، انتقال) با

سرمایه‌گذاری بخش صنعت و معدن و سرمایه‌پذیری شرکت آب و فاضلاب استان خراسان‌رضوی طی ۳۰ ماه اجرا می‌شود. طرح سرمایه‌گذاری طرح فاضلاب شهر خواف با اعتبار حدود چهار هزار میلیارد ریال در حال انجام است که صرف اجرای ۱۴۴ کیلومتر شبکه جمع‌آوری، نصب ۱۵ هزار انشعاب و احداث تصفیه‌خانه با ظرفیت ۶ هزار و ۵۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز خواهد شد. پساب حاصل از تصفیه به مدت ۲۵ سال در اختیار سرمایه‌گذار قرار می‌گیرد که برای استفاده در بخش صنعت به مجتمع صنعتی و معدنی سنگان منتقل خواهد شد.

یکی از راه‌هایی که اخیراً مطرح و اجرا گردیده است، شیرین سازی و انتقال آب از دریای عمان می‌باشد. شرکت تأمین و انتقال آب خلیج‌فارس مسئولیت اجرای خط دوم انتقال آب استان‌های کرمان، خراسان جنوبی و رضوی را در دستور کار خود دارد این طرح مجموعاً برای تأمین نیاز صنایع و معادن استان‌های مذکور معادل ۲۳۰ میلیون مترمکعب در سال ظرفیت انتقال دارد. خط ۲ به طول ۱۲۷۵ کیلومتر است و میزان سرمایه‌گذاری آن معادل ۱۵۰ هزار میلیارد تومان برآورد شده است. نقاط تحویل آب نقاط صنعتی و معدنی واقع در شهرهای کرمان و شهرهای بیرجند، قائن، سنگان، خواف، مشهد و سایر صنایع و معادن واقع در مسیر انتقال است. تنها هزینه قطعه اول این پروژه در حدفاصل چابهار تا ایرانشهر به طول ۳۰۵ کیلومتر معادل کمتر از ۲۰ درصد از کل مسیر بر اساس فهرست‌بهای ۳ ماه اول سال ۱۳۹۷ معادل ۲۹۱.۷ میلیارد تومان برآورد هزینه شده است. این در حالی است که کل هزینه تخمین زده شده برای این پروژه معادل ۴ میلیارد دلار برآورد می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات مقدماتی انجام‌شده در این ارتباط، عدم توجیه اقتصادی و اجرائی طرح را به اثبات رساند. بر این اساس قیمت تمام‌شده یک مترمکعب آب برای حالاتی که زمان اجرای طرح ۱۰ ۲۰ و ۳۰ سال به طول بینجامد، به ترتیب برابر با ۱۰۰۰۰، ۲۷۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ تومان به دست آمد (حاجیان، ۱۳۹۲) که با توجه افزایش حدوداً ده برابری قیمت ارز و سایر نهاده‌ها این قیمت به‌تناسب افزایش خواهد یافت. همواره پس از مطرح‌شدن پروژه‌های شیرین‌سازی آب دریا و انتقال به سایر نقاط ایران، تحلیل‌های فراوانی در مخالفت با آن مطرح می‌شود. عمده انتقادات مطرح شده در این حوزه در ارتباط با چالش‌های زیست‌محیطی است، بر این اساس کارشناسان محیط‌زیست ابهامات گسترده‌ای از

جمله تغییر کیفیت آب در مبدأ را به عنوان اهم چالش‌های زیست‌محیطی برای این پروژه مطرح می‌کنند. علاوه بر انتقادات زیست‌محیطی، اقتصاد پروژه‌های انتقال آب به‌واسطه وسعت گسترده آن‌ها از دیگر چالش‌هایی است که همواره در کنار طرح اسم این پروژه‌ها مطرح می‌شود، ارقام مطرح‌شده پیرامون هزینه تمام‌شده هر مترمکعب آب شیرین‌سازی و انتقال‌یافته در برخی از پروژه‌های خاص از ۱۰۰ هزار تومان عبور کرده است و مشخص نیست این آب تا این اندازه گران‌قیمت قرار است صرف چه فعالیتی شده و سودآوری به همراه داشته باشد. علاوه بر این انرژی موردنیاز انتقال هر مترمکعب آب از دریای عمان به مشهد، معادل ۲۵ کیلووات ساعت است؛ یعنی برای انتقال آب دریای عمان به مشهد، باید سه نیروگاه اتمی برای تولید برق مانند نیروگاه بوشهر در مسیر اجرای طرح احداث شود این در حالی است که تولید یک کیلووات ساعت انرژی نیازمند ۱۰۰ لیتر آب است. بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان برداشت آب نیروگاه مشهد در هر ساعت ۶۰۰ مترمکعب است یعنی سالانه بیش از ۴ میلیون مترمکعب آب در این نیروگاه مصرف می‌شود. درواقع با یک محاسبه کوچک می‌توان برآورد کرد که چه میزان آب برای تولید انرژی و چه میزان انرژی برای انتقال آب نیاز داریم. از سویی، اجرای ۱۶۰۰ کیلومتر خط لوله بدون شک منجر به ایجاد مسائل زیست‌محیطی و حتی امنیتی در طول مسیر خواهد شد.

برای رفع بحران کم‌آبی، در درازمدت اکتشاف و استفاده از آب‌های غیرمتعارف همچون آب‌های ژرف برای مصارف مختلف به ویژه مصارف صنعتی است. منابع آب ژرف ویژگی‌های متمایزی نسبت به سایر منابع آب زیرزمینی دارند. این ویژگی‌ها شامل ابعاد قابل‌توجه حجم ذخیره و گستره سطحی، زمان ماندگاری زیاد و تجدیدناپذیری می‌باشد. اگرچه این منابع آب در قسمت‌های خشک و فراخشک جهان به طور گسترده بهره‌برداری می‌شوند؛ اما بهره‌برداری از آن‌ها تاکنون در کشور صورت نگرفته است و انجام کارهای مطالعاتی در این زمینه از سال ۱۳۹۴ آغاز شده است. مطالعه منابع آب ژرف در کشور در حال حاضر در دو رویه مجزا در حال پیگیری است. رویه اول توسط وزارت نیرو در حال انجام است مطالعات شناسایی در قالب پهنه‌بندی مناطق مستعد آب‌های ژرف کشور را در دستور کار دارد که وضعیت کل کشور را از نظر وجود مناطق دارای پتانسیل آب ژرف تعیین خواهد نمود. رویه دوم

توسط معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری در حال پیگیری است و شامل مطالعات اکتشافی موردی مبتنی بر به‌کارگیری تمامی ابزارهای اکتشافی در منطقه سیستان است. به‌عبارت‌دیگر در این رویه مناطقی که به واسطه شواهد موجود و یا انجام مطالعات دیگر همچون اکتشافات نفت و گاز احتمال وجود منابع آب ژرف شیرین در آن وجود دارد انتخاب و در طی زمان کوتاهی مطالعات اکتشافی لازم از جمله لرزه‌نگاری، ژئوفیزیک و حفاری در آن‌ها صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه انجام مطالعات اکتشافی و پهنه‌بندی آب ژرف در جهان به‌صورت یکپارچه انجام می‌شود؛ بهره‌گیری از نتایج مطالعات اکتشافی رویه دوم برای دقت مطالعات پهنه‌بندی آب ژرف رویه اول بسیار سودمند خواهد بود. بهره‌برداری از منابع آب ژرف نیازمند تدوین سیاست‌های راهبردی و ضوابط معینی است که کلیه ابعاد حقوقی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی مترتب بر بهره‌برداری را با در نظر گرفتن رویکرد توسعه پایدار در نظر بگیرد. به نظر می‌رسد در صورت اجرای این پروژه و دستیابی به آب‌های ژرف تجدیدپذیر در مناطق مختلف استان و یا کشور هزینه حفر چاه و استحصال این منابع آبی از شیرین کردن آب و انتقال تا فلات مرکزی ایران هزینه‌هایی به مراتب کمتر داشته باشد. با توجه به مطالعات انجام شده در ستاد آب و خشکسالی معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری به عنوان متولی آب ژرف در ایران که منجر به حفر چند حلقه چاه اکتشافی با عمق بیش از ۱۵۰۰ متر در استان سیستان بلوچستان شده است هزینه حفر هر حلقه چاه در سال ۱۴۰۱ حدود ۶۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است و هزینه هر مترمکعب آب استحصال شده از منابع آب ژرف حدود ۵۰ هزار ریال برآورد شده است. هر چند همانطور که اشاره شد پارامترهای مختلفی بر روی هزینه، کیفیت و دبی آب‌های ژرف تأثیرگذار است که بدون انجام مطالعات اکتشافی تکمیلی و حفر چاه اکتشافی نسبت به برآورد هزینه، هزینه آب استحصال‌شده و کمیت و کیفیت چاه اکتشافی اظهارنظر نمود. برآورد قیمت تمام شده آب در برخی پروژه‌های اکتشاف آب ژرف بیانگر توجیه‌پذیری موردی بهره‌برداری از این منابع است.

جدول ۲: مقایسه راه‌های تأمین آب حوزه معدنی سنگان

ردیف	روش تأمین آب	برنامه	مزیت	محدودیت
۱	آب ژرف	درازمدت	در صورت دارا بودن کمیت و کیفیت مناسب با رعایت ابعاد حقوقی، اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی مترتب بر بهره‌برداری مناسب است.	کمیت و کیفیت آب ناشناخته است
۲	انتقال آب از دریای عمان یا خلیج‌فارس	درازمدت	قیمت تمام‌شده بالا، هزینه بالای نگهداری تأسیسات، وجود معارضین محلی در طول مسیر انتقال، برق مصرفی بالا	کیفیت آب مناسب. پایداری از لحاظ تأمین آب
۳	انتقال پساب از مشهد	درازمدت	هزینه بالای نگهداری تأسیسات انتقال، وجود معارضین محلی در طول مسیر انتقال، مخالفت‌های اجتماعی اجرای طرح	کیفیت آب مناسب. پایداری از لحاظ تأمین آب
۴	انتقال آب پساب از شهر خواف	میان‌مدت	تنها بخش کوچکی از آب مورد نیاز را تأمین خواهد کرد.	کیفیت آب مناسب. پایداری از لحاظ تأمین آب
۵	انتقال بین حوضه‌ای	میان‌مدت	معارضین محلی، مشکلات اجتماعی و زیست‌محیطی، عدم پایداری به دلیل اثرات سوء برداشت بر روی آب‌های زیرزمینی	کیفیت آب مناسب
۶	استفاده از منابع زیرزمینی منطقه	کوتاه‌مدت	معارضین محلی، مشکلات اجتماعی و زیست‌محیطی، عدم پایداری به دلیل اثرات سوءبرداشت بر روی آب‌های زیرزمینی	کیفیت آب مناسب

هزینه‌های اکتشاف و استحصال آب ژرف در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: هزینه‌های اکتشاف و استحصال آب ژرف

ردیف	شرح	تعداد	زمان	هزینه (دلار)
۱	مطالعات اکتشاف شامل ایستگاه مگنتوتلوریک، اودیومگنتوتلوریک	۴۰۰ ایستگاه	۶ ماه	۶۰۰ هزار دلار
۲	مطالعات لرزه‌شناسی	یک پروفیل	یک ماه	۴۲۰ هزار دلار
۳	حفر یک حلقه چاه با ظرفیت ۸۰ لیتر بر ثانیه	یک حلقه	سه ماه	یک میلیون و هفتصد هزار دلار

امکان‌پذیری یا عدم امکان‌پذیری تأمین کمبود آب حوزه معدنی سنگان از استحصال آب‌های ژرف براساس هیدرولوژی منطقه

در ایران بحث اکتشاف منابع آب ژرف موردتوجه است. سازمان زمین‌شناسی گسل‌های فعال و اصلی کشور را شناسایی نموده است.

از آن جمله می‌توان به گسل‌هایی مانند گسل کَلمرد، شتری طبس و اسفندیار، نایبند و زاگرس، تهران و میامی در استان سمنان اشاره نمود. در کویر ایران این گسل‌ها پراکنده هستند. در مناطقی مانند دشت لوت که خشک و کویری است گسل‌هایی شناسایی شده است. ازآنجایی‌که اطلاعات کاملی از منابع آب فسیلی در کشور موجود نیست برای ردیابی اولیه این منابع ارزشمند در کشور از طریق تشابهات زمین‌شناسی و ... با آبخوان‌های فسیلی کشورهای همسایه اقدام شده است. کویر عربستان دارای حجم عظیمی از آب‌های فسیلی است؛ اکثر کشورهایی که در این کویر قرار دارند از جمله عربستان، اردن، قطر، امارات و بحرین از این آب‌ها استفاده می‌نمایند. این کشورها تشابه زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، تکتونیکی با محیط‌های رسوبی ایران تا اواخر دوران دوم زمین‌شناسی را دارند آب فسیلی در سازندهای ضخیم ماسه‌سنگی غیرسیمانی در مناطق غیرفعال تکتونیکی ایران وجود دارد. با توجه به این شواهد علاوه بر مناطق زاگرس و البرز از ایران مرکزی مناطقی چون طبس و یزد که سازندهای ماسه‌ای به‌عنوان مناطق محتمل وجود آب فسیلی در نظر گرفته می‌شود. در این منطقه

علاوه بر وجود گسل‌های فراوانی کـه امکـان انتقـال آب را دارنـد، سـازندهای تخریبـی بـا ضـخامت و گسترش قابل‌توجهی که دارای تخلخل مناسب جهت نگهداری آب زیرزمینی هستند وجود دارد.

یکی از اجـزای فـرار تکتـونیکی، حوضـه‌هـای جدایشـی ــ کششـی بـه صـورت فروافتـادگی‌هـای توپوگرافی‌اند که طرفین آن‌ها با دو یا چند گسل امتداد لغز و انتهای آن‌ها با گسل‌های انتقالی مـورب محدود می‌شود. این محیط‌ها، تنش‌های ناحیه‌ای را در برمی‌گیرند که شـامل اجـزای برشـی و نرمـال می‌شوند. کشش در این حوضه‌ها، مقداری جابه‌جایی امتدادلغز را دربر دارد کـه آن‌هـا را تشـکیل داده است. این حوضه‌ها در نهایت منجر به جداسازی صـفحه در امتـداد یـک سیسـتم از مراکـز گسـترش به‌صورت جانبی می‌شوند. بر اساس شواهد صحرایی و مطالعه تکتونیکی انجـام‌شـده در ناحیـه معـدنی سنگان، چندین حوضه جدایشی- کششی، در میان ذخایر مشاهده مـی‌شـود کـه ازجملـه آن، دردوی اشاره کرد که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند براساس مطالعه تصویر ماهواره‌ای، بررسـی مغنـاطیس هوابرد و مشاهدات صحرایی از دید ویژگی‌های ساختاری، یک سری جابه‌جایی بزرگ در ناحیه سنگان قابل مشاهده‌اند که در ارتباط با پایانه شرقی گسل درونه است. همچنین فروافتادگی خواف در جنـوب شرق معدن سنگان واقع است. این بلوک در سوی جنوب‌غربی رشته اصلی قرار دارد و با گسل اصلی و کم‌وبیش پوشیده با روند شمال‌غربی ـ جنوب‌شرقی از بالاآمدگی کوه تهور ـ سینا جدا شده است. ایـن فروافتادگی به سوی جنوب‌شرقی، به احتمال زیاد بسته مـی‌شـود و پـی‌سـنگ آن در ایـن قسـمت از سنگ‌های پالئوزوئیک ساخته‌شده که در ناحیه‌ی نیشتافون، نیازآباد و کوه‌فاشی به سوی مرز افغانستان برون‌زد دارند. این فروافتادگی از نهشته‌های نئوژن با ترکیب سنگ‌شناسی ماسـه‌سـنگ و کنگلـومرای تخریبی با چین‌خوردگی کم‌وبیش شدید انباشته شده‌اند. علاوه بر آن تشـکیلات کنگلـومرایی بـا سـن الیگوسن ـ میوسن، رسوبات تخریبی با سن ائوسن که با گسترش قابل‌ملاحظـه در چهـارگوش خـواف دیده می‌شوند، می‌تواند به عنوان محل‌های مناسب جهت مطالعات تکمیلی مورد بررسی قرار گیرد.

سفره‌های کارستی مخازنی هستند که در لایه‌های شکاف‌دار، توده‌های آهکی و دولومیتی تشـکیل می‌شوند. البته شبیه این سفره ممکن است در تشکیلات آذرین که براثر حرکـات زمـین دارای درز و شـکاف شده‌اند تشکیل شوند. مجموعـه ایـن مخـازن بـه عنـوان هیـدروژئولوژی کارسـتیک شناسایی

می‌شوند که به جای یک سفره زیرزمینی گسترده پیوسته یک مجموعه از شکاف‌های مرتبط که بعد عبور جریان آب است را به وجود می‌آورد. در نواحی کارستی برخلاف مناطق آبرفتی آب از درون درز و شکاف‌ها حرکت نموده و پس از آن در درون کانال‌ها و معابر درون توده سنگ‌ها که در اثر پدیده کارست شدگی ایجاد شده‌اند از یک یا چند محل خارج می‌گردند که این محل‌های خروجی همان چشمه‌های کارستی هستند یا اینکه در آبخوان‌های کارستی ذخیره می‌شوند و در صورت حفر چاه می‌تواند به صورت آرتزین از زمین خارج شود. پیدایش منابع آب زیرزمینی در آهک‌های کارستی و سازندهای سخت غیرکربناته ناشی از عملکرد تخلخل ثانویه حاصل از زون‌های شکستگی و درز شکاف‌ها می‌باشد با این تفاوت که در سازندهای کربناته به سبب انحلال در طول زمان، فرآیند شکل‌گیری و گسترش منابع آب سرعت پیدا می‌کند. در منطقه مطالعاتی تشکیلات کربناته با سنین مختلف که دارای گسترش و عمق مناسب هستند نیز می‌تواند جهت بررسی مطالعات آب ژرف مورد بررسی قرار گیرد.

نواحی پرپتانسیل جهت مطالعات تفصیلی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد ابرحوضه یک واژه کلیدی در تبیین مدل مفهومی آبخوان‌های ژرف است. طبق تعریف ابرحوضه عبارت است از آبخوان‌های بسیار عمیق متشکل از رسوبات گراولی با سنگ مادر درز و شکافی واجد یا فاقد ساختارهای رسوبی که از نظر تغذیه، ذخیره، انتقال و به دام افتادن آب‌های زیرزمینی ژرف به‌صورت یکپارچه عمل می‌نماید در مدل مفهومی ارائه‌شده توسط بیسون ارتفاعات یک ابرحوضه در تغذیه آبخوان ژرف نقش دارند و جریان آب زیرزمینی در آبخوان می‌تواند در راستای شکستگی‌ها و گسل‌های مهم به وجود آید. در این راستا در این مطالعات سعی شد که با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک هوایی، زمین‌شناسی ساختاری، سنجش از دور، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و چینه‌شناسی مناطق مناسب جهت تبیین این مدل مفهومی که لازمه آن وجود ارتفاعات، شکستگی و گسل‌ها و رسوبات تخریبی هستند مشخص گردد.

تعیین پهنه‌های دارای پتانسیل آب با تلفیق این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و چینه‌شناسی و با توجه به وجود رسوبات تخریبی ماسه‌سنگی و کنگلومرایی دوران سوم و سنگ‌های کربناته دوران اول و دوم که دارای گستردگی و ضخامت قابل توجه بوده و گسل‌های متعدد این تشکیلات را قطع نموده‌اند، دو پهنه اصلی جهت انجام مطالعات تکمیلی مشخص شد (شکل ۲).

براساس نتایج حاصل از مطالعات ۴ پروفیل بر روی دو پهنه پیشنهادی معرفی شده است (شکل ۳). طول پروفیل‌های پیشنهادی حدود ۱۸۰ کیلومتر بر روی چهار پروفیل پیشنهادی تخمین زده می‌شود. براساس مساحت منطقه مورد مطالعه و با توجه به اینکه انجام اکتشافات ژئوفیزیکی کم‌عمق تا نسبتاً عمیق مدنظر است مجموعاً ۴۰۰ سونداژ اودیومگنتوتلوریک (AMT) و مگنتوتلوریک (MT) پیشنهاد می‌شود. شرح خدمات پیشنهادی جهت انجام مطالعات به شرح ذیل است. براساس متدولوژی شرح خدمات اجرای طرح شامل موارد ذیل خواهد بود.

فاز اول: جمع‌آوری اطلاعات، پردازش و تحلیل داده‌ها و مطالعات میدانی امکان‌سنجی وجود کلیه آبخوان‌های قابل استحصال در گستره سنگان شامل:

- بررسی پایان‌نامه‌ها و اطلاعات پهنه موردنظر
- پردازش داده‌های ماهواره‌ای
- پردازش داده‌های ژئوفیزیک هوایی
- بررسی و تحلیل نقشه‌ها و گزارشات زمین‌شناسی
- بررسی نقشه‌ها و گزارشات هیدرولوژی و هیدروژئولولوژی
- مطالعات چینه‌شناسی
- تهیه نقشه‌های پایه در محیط GIS
- بازدید میدانی اولیه
- شناسایی مسیر برش‌های ساختمانی
- پیشنهاد پروفیل انجام مطالعات MT و AMT
- مطالعات چینه‌شناسی، ساختاری، پترولوژی و آب‌شناسی شامل
- پیاده‌سازی پروفیل‌های شناسایی شده بر روی نقشه‌های پایه
- پیاده‌سازی تمام اطلاعات توپوگرافی و زمین‌شناسی
- انجام عملیات صحرایی و برداشت اطلاعات
- ترسیم ستون‌های چینه‌شناسی

- تعیین ضخامت رسوبات و سایر واحدهای سنگی
- مطالعه گسل‌ها
- مطالعه ساختارهای زمین‌شناسی
- ترسیم برش‌های ساختمانی و ناحیه‌ای
- تدوین گزارش فاز ۱

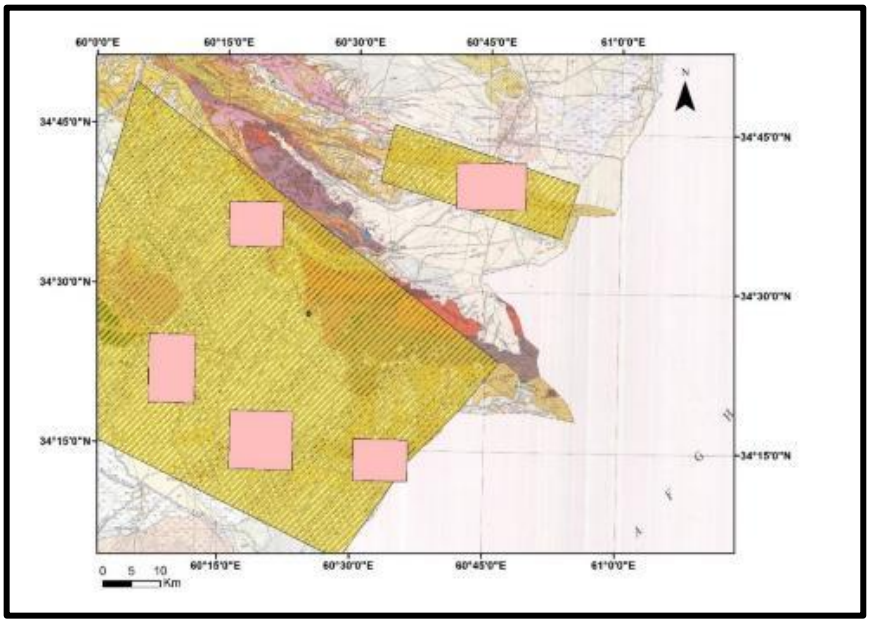
فاز دوم: شناسایی و اکتشاف منابع آب زیرزمینی ابرحوضه‌ای در گستره سنگان با طراحی عملیات صحرایی و انجام مطالعات ژئوالکتریک و مگنتوتلوریک و تفسیر نتایج شامل:

- پیاده‌سازی پروفیل‌های شناسایی‌شده بر روی نقشه‌ها
- برداشت توسط دستگاه
- انجام مطالعات ژئوفیزیک زمینی به روش اودیومگنتوتلوریک (AMT) و مگنتوتلوریک (MT)
- انجام مطالعات ژئوفیزیک زمینی به روش ژئوالکتریک
- پیاده‌سازی برداشت‌ها توسط دستگاه بر روی کامپیوتر
- وارون سازی یک‌بعدی و دوبعدی و تفسیر داده‌های MT/AMT
- پردازش داده‌های ژئوالکتریک
- تصحیح مطالعات الکترومغناطیسی توسط ژئوالکتریک در نواحی مورد نظر
- داده‌پردازی و تعیین مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس
- رسم نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس برای فرکانس‌های مختلف
- تعیین مقاومت ویژه حقیقی
- تفسیر مقاطع مقاومت ویژه حقیقی و تلفیق آن‌ها با اطلاعات موجود (زمین‌شناسی، حفاری و توپوگرافی و سایر اطلاعات)
- تفکیک لایه‌های زیرزمینی در محل هر برداشت به واسطه مقاومت ویژه
- تعیین ضخامت لایه‌های آبرفتی در محل هر برداشت و تعمیم آن در منطقه و تهیه نقشه منحنی‌های هم ضخامت رسوبات آبرفتی
- تعیین ضخامت چینه‌ها و سازندهای مختلف در منطقه با استفاده از اطلاعات موجود و داده‌های ژئوفیزیک تا عمق موردمطالعه
- تهیه مقاطع زمین‌شناسی تحت‌الارضی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک و حفاری‌های قبلی
- تعیین عمق و ابعاد هندسی آبخوان با توجه به اطلاعات ژئوفیزیکی
- تعیین تعداد لایه‌های رسانای احتمالاً آبدار و نحوه گسترش آن‌ها
- تجزیه و تحلیل و تعبیر و تفسیر نقشه‌ها و نیم‌رخ‌های مقاطع و نمودارها و کلیه مطالعات ژئوفیزیکی.

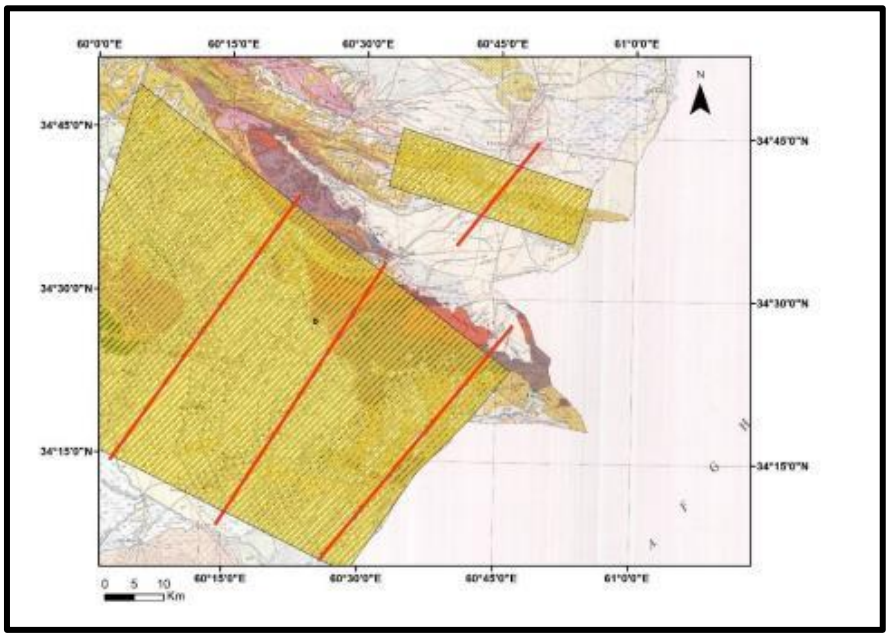
فاز نهایی

- تهیه و استخراج کلیه لایه‌های مطالعاتی
- ورود اطلاعات به سیستم GIS

- آماده‌سازی نقشه‌ها
- تجزیه و تحلیل و بررسی کلیه مطالعات انجام‌گرفته و تلفیق نتایج جهت تعیین پهنه‌های دارای پتانسیل آب
- تهیه و تدوین گزارش نهایی و تعیین مناطق هدف جهت مطالعات تکمیلی



شکل ۲: پهنه‌های پیشنهادی جهت مطالعات تکمیلی. پهنه انتخابی جهت شناسایی با هاشور زرد مشخص شده است.



شکل ۳: نقشه موقعیت مکانی خطوط پیشنهادی برداشت مگنتوتلوریک پروفیل انتخابی با خط قرمز مشخص شده است.