

مکان‌یابی ساختگاه سد زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه گز در استان هرمزگان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

محمد رضا ایدون^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی مهندسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

غلامحسین بیگی‌پور

استادیار گروه عمران، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

محمدصادق دهقانیان

استادیار گروه زمین‌شناسی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

چکیده

در اغلب نقاط ایران که دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است، مدیریت منابع آب زیرزمینی از اولویت خاصی برخوردار است. یکی از راههای مفید در تأمین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف در این مناطق و مقابله با بحران خشکسالی، کمک به افزایش ذخایر آب زیرزمینی است. موضوع اصلی این تحقیق مکان‌یابی سدهای زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه گز در استان هرمزگان است. براین اساس، با استفاده از تحلیل‌ها و آنالیزهای منطقه‌ای، مدل‌های ارتفاعی رقومی، اطلاعات ماهواره‌ای، خصوصیات هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و هواشناسی در نرم افزارهای مناسب به خصوص GIS بصورت سنجش از دور، مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده از تحقیق سه سایت بعنوان گزینه مناسب جهت احداث ساختگاه سد زیرزمینی معرفی گردیده است. پس از بررسی‌های اولیه و بازدید صحرائی از محل سایت‌های پیشنهادی، سایت شماره (۲) بعنوان سایت مستعد و دارای اولویت اول انتخاب گردید. این سایت به لحاظ زمین‌شناسی، بر روی واحدهای ماسه سنگی و کنگلومرایی و اندکی شیلی ماسه‌ای درشت دانه با نفوذپذیری خوب قرار دارد. رسوبات کواترنر شامل آبرفت‌ها و تراسهای آبرفتی نیز در حاشیه پهنه سیلابی رودخانه گز با نفوذپذیری قابل قبول دیده می‌شوند. شیب سطحی رودخانه ۲/۵٪ ارزیابی گردید که به لحاظ توپوگرافی، مستعد احداث سد زیرزمینی است. حجم آبیگیری مخزن سایت پیشنهادی در هر نوبت برابر با ۷۷۷۶۰۰ متر مکعب برآورد و مخزن سد در مدت حدود ۶۹ روز پر خواهد شد. لذا با مدیریت مناسب، امکان آبیگیری ۴-۳ نوبت در سال وجود دارد. بدین ترتیب حجم آبیگیری سالانه سد در ۴ نوبت، حدود ۳,۱۱۰,۴۰۰ متر مکعب برآورد می‌شود.

واژگان کلیدی: سد زیرزمینی، مکان‌یابی، رودخانه گز، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

مقدمه

آب، مهم‌ترین جزء در سیمای عرصه‌های طبیعی و محور توسعه‌ی پایدار حوضه‌های آبخیز می‌باشد. سهم دریافتی حوضه‌ها از نزولات جوی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محدود است. در چند دهه اخیر خشک سالی و عدم مدیریت صحیح منابع آب، بسیاری از مناطق جهان را با بحران آب مواجه کرده است. بخش قابل توجهی از نزولات جوی در هر منطقه به لایه‌های زیرین زمین نفوذ می‌کند و به نوعی از دسترس خارج می‌گردد. در حال حاضر در اکثر مناطق دنیا و به خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک که به دلیل تبخیر زیاد با کمبود آب‌های سطحی روبه‌رو هستند تنها راه رسیدن به آب احداث چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در بسیاری از مواقع بهره‌برداری غیراصولی و شدید منجر به خشک شدن سفره‌های آب زیرزمینی و خارج شدن آن‌ها از چرخه‌ی تأمین آب مورد نیاز ساکنین منطقه می‌شود. جریان‌های آب زیرزمینی به دلیل اینکه قابل رؤیت نیستند و همچنین عدم دانش کافی در مورد مسیرهای زیرزمینی آب بسیار پیچیده می‌باشند. بیشتر آب زیرزمینی موجود در یک حوضه از طریق مسیرهای متعدد زیرزمینی وارد حوضه‌های مجاور شده و در اکثر مواقع به طور کلی از دسترس خارج گشته و برای وارد شدن به دریا طی مسیر می‌کند. لذا مهار این بخش عظیم از آب شیرین و استفاده بهینه از آن می‌تواند بسیاری از معضلات کمبود آب حوضه‌های آبخیز بحران زده یا در معرض بحران آب را مرتفع کند. تا کنون راه‌های زیادی برای افزایش و استفاده بهتر از آب‌های زیرزمینی ارائه شده است. یکی از این راهکارهای مدیریتی، احداث سد زیرزمینی^۱ می‌باشد. در این راستا احداث سدهای زیرزمینی در انواع مختلف در مناطق خشک کشور می‌تواند به حل مشکل کم‌آبی و بحران آب خصوصاً برای مناطق روستایی دور افتاده در مقیاس کوچک کمک نموده و باعث ثبات بیشتر زندگی در این مناطق گردد. (هاشمی‌احمدآباد، ۱۳۹۰) در سدهای زیرزمینی آب در زیرزمین ذخیره می‌شود، بنابراین استفاده از منابع آب قابل تجدید (استفاده از آب‌های زیرزمینی کم‌عمق)، میزان بسیار کم تبخیر، کاهش خطر آلودگی، نبود خسارت مخزن، پایداری بسیار بالای سازه، عدم وجود تهدید برای ساکنین و ابنیه پایین دست سد و هزینه پایین ساخت از فواید عمده این نوع تأسیسات می‌باشد. احداث سدهای زیرزمینی نیاز به ذخیره سطحی ندارد و سبب تغییر کاربری اراضی و اکوسیستم موجود نمی‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که از نظر زیست‌محیطی بی‌خطر می‌باشند. (خیرخواه زرکش و همکاران، ۱۳۸۷). در سالهای اخیر ایده استفاده از سدهای زیرزمینی افزایش یافته است در این راستا خلیفه و همکاران (۱۳۹۲) با انجام مطالعاتی بر پایه اسناد، منابع، پژوهش‌های صحرائی، حفاری و نمونه‌برداری از آب و خاک به مکان‌یابی سد زیرزمینی در حوضه دره قنات پسند پرداختند. آن‌ها مکان‌یابی ساختگاه را بر اساس خصوصیات پی‌سنگ، تغییرات حجم آبرفت، تخلخل مؤثر و شیب بستر انجام دادند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که انباشتگی رسوبی در طول آبراه اصلی در دو محل مشاهده می‌شود و این دو نقطه را به عنوان گزینه پیشنهادی به شکل دقیق‌تری بررسی کردند. همچنین برخورداری (۲۰۱۵) در پژوهشی به گزینش مکان‌های مناسب از دیدگاه کمی و کیفی جهت احداث سدهای کوچک زیرزمینی در مناطق خشک پرداخته و آقای طالقانی و همکارش (۲۰۱۳) به نقش ژئومورفولوژی در مکان‌یابی سدهای زیرزمینی با استفاده

^۱ Underground dam

از روشهای کتابخانه ای و میدانی پرداخته اند. فرزیوری و همکاران (۲۰۰۸) روشی کلی را برای ارزیابی مکان‌های مناسب برای احداث سدهای زیرزمینی کوچک ارائه دادند. در این مطالعه سعی شده تا حد ممکن از تمامی تجربیات ارائه شده در زمینه مکان‌یابی سدهای زیرزمینی استفاده گردد. در این تحقیق با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نرم‌افزار ArcGIS به اکتشاف ساختگاه مناسب جهت احداث سد زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه گز (واقع در جنوب شرق میناب) پرداخته می‌شود. حوضه آبریز رودخانه گز به دلیل واقع شدن در منطقه خشک، نامنظم بودن توزیع بارندگی از نظر زمانی و مکانی، رشد غیر طبیعی و افزایشی نیازهای مختلف آبی (کشاورزی، صنعتی و شرب)، محدودیت فوق‌العاده منابع آب سطحی، تغییرات اقلیمی (دوره خشکسالی) و کاهش روزافزون منابع آبی زیرزمینی و شور شدن آب‌های زیرزمینی با مشکل عدیده و افزایشی کمبود آب به خصوص در فصل‌های خشک مواجه می‌باشد. از آنجا که این حوضه از نقطه نظر زمین‌شناسی دارای تشکیلات کواترنری (Qt1, Qt2, Qal) مستعد برای ذخیره آب در زیرزمین می‌باشد (فارساب صنعت، ۱۳۸۶) و همچنین به دلیل نفوذپذیری مناسب این تشکیلات می‌توان بر ضرورت توسعه سدهای زیرزمینی به عنوان یکی از روش‌های مهم اقتصادی و بسیار مؤثر در مقابله با خشکسالی و کمبود آب در این حوضه (استان) تأکید نمود. خلاصه تحقیقات مکان‌یابی سدهای زیرزمینی توسط اندیشمندان داخلی و خارج از کشور در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است.

جدول شماره ۱: خلاصه تحقیقات انجام شده مشابه موضوع مورد بررسی در داخل و خارج از کشور

محقق	سال	نام منطقه	نتیجه
خلیفه و همکاران	۱۳۹۲	دره قنات پسند	مکان‌یابی ساختگاه را بر اساس خصوصیات بی‌سنگ، تغییرات حجم آبرفت، تخلخل مؤثر و شیب بستر انجام دادند. اثبات‌شکی رسوبی در طول آبراهه اصلی در دو محل مشاهده شده معیار انتخاب گزینه پیشنهادی عنوان شده است.
دانایی و همکاران	۱۳۹۰	منطقه منشاء استان یزد	از فاکتورهای شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم آبراهه‌ها، استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مخروط‌افکنه‌های منطقه دارای بیشترین استعداد جهت احداث سد زیرزمینی می‌باشند. همچنین اراضی با سنگ آهک ضخیم لایه در اولویت بعدی جهت احداث سد قرار دارند.
هاشمی احمدآباد	۱۳۹۰	منطقه بشیران خراسان جنوبی	شرایط و خصوصیات مختلف ساختگاه و مخزن سد با استفاده از مطالعات ژئوفیزیک، زمین‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی و لرزه زمین ساخت مورد بررسی قرار گرفته و این نتیجه به دست آمده است که امکان ذخیره آب در نهشته‌های آبرفتی مخزن و بهره‌برداری از آن امکان‌پذیر می‌باشد.
مرآتی و همکاران	۱۳۸۹	منطقه ابیورد در جنوب ورامین	به این نتیجه رسیدند که با احداث این سد زیرزمینی ضمن در دسترس قرار گرفتن آب در فصول خشک سال از هدر رفتن آب به علت نفوذ در اعماق زمین و همچنین آلودگی آب با توجه به مسیر حوضه آبریز (گذر از تشکیلات زمین‌شناسی که موجب شوری آب می‌گردد) جلوگیری شده است. همچنین به دلیل وجود این سد زیرزمینی امکان استفاده مجدد از آب کشاورزی مناطق بالادست نیز فراهم گردیده است.
خیرخواه زرکش و همکاران	۱۳۸۷	نطنز	با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به اولویت بندی مکان‌های مناسب احداث سد زیرزمینی پرداختند و با در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی مناسب‌ترین تنگه را جهت احداث سد زیرزمینی مشخص کردند.
پری اردکانی و دانائیان	۱۳۸۱	خراتق یزد	هدف از ساخت سد زیرزمینی خراتق توسعه پایدار حوضه آبخیزداری، جلوگیری از مهاجرت بی‌رویه روستاییان به علت نبود آب شرب و بهره‌برداری از منابع زیر سطحی اعلام شده است.
امینی‌زاده بزنجانی	۱۳۷۸	کهنوج کرمان	با توجه به شرایط طبیعی و اقلیمی منطقه (تبخیر بالا و احتمال شیوع بیماری مالاریا) و مقایسه هزینه‌ها در ارتباط با انجام پروژه‌های مختلف، با ایجاد سد زیرزمینی بهره‌برداری از آن مشکل اقتصادی اجتماعی منطقه را پیشنهاد نمودند.
برخورداری	۲۰۱۵	اردکان یزد	با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات هیدرولوژیکی و اقلیمی به این نتیجه رسیدند که سیستم اطلاعات جغرافیایی و ابزارهای تصمیم‌گیری می‌تواند به صورت قابل اعتمادی در انتخاب مکان‌های بالقوه جهت احداث سد زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند.
طالقانی و همکارش	۲۰۱۳	غرب گیلان	نقش ژئومورفولوژی و عواملی از جمله سنگ‌شناسی، ساختمان، طول، درجه و شیب آبراهه، جهت گسل، شکل دره، دانه‌بندی و ضخامت رسوب و سنگ‌شناسی بستر دره بعنوان معیارهای اصلی در مکان‌یابی و انتخاب سدهای زیرزمینی مورد استفاده قراردادند.
فرزیوری و همکاران	۲۰۰۸		بررسی معیارهای هیدرولوژی و زمینشناسی ژئومورفولوژی و ارائه فاکتورسود و هزینه درجهت ارزیابی مکان‌های مناسب برای احداث سدهای زیرزمینی کوچک در مناطق خشک
جیوانی و همکاران	۲۰۰۸	کیدال مالی	معیارها را به دو صورت کمی و کیفی انتخاب کردند: معیارهای کیفی از جمله فاصله از شهرک‌ها و زیرساخت‌ها و گسل‌های محلی و معیارهای کمی بسته به شاخص‌های اثر بخشی و امکان‌سنجی شامل شاخص طرح‌های آبرفتی، محاسبه نسبت سود/ هزینه هزینه شاخص هیدرولوژیکی و شاخص مورفولوژیکی و تخمین الگوهای پوشش گیاهی که می‌توان در زمان هزینه صرفه جویی نمود.
اوندر و ایلامز	۲۰۰۵	جنوب‌غربی ترکیه (موگلا)	سدهای زیرزمینی را ابزاری برای توسعه پایدار و مدیریت منابع آب زیرزمینی برشمردند و به این نتیجه رسیدند که سدهای زیرزمینی برای بالا بردن ذخیره موجود آبخوان‌ها و همچنین به منظور کنترل آب زیرزمینی ابزار بسیار مفیدی هستند.
وانرومی	۲۰۰۳	برزیل	سدهای زیرزمینی مزایایی از قبیل: سادگی و هزینه اجرایی کم، افزایش ظرفیت چاه‌های موجود، قابلیت تکرار و سهولت بهره‌برداری توسط اهالی محل و خطر آلودگی پایین دارند.

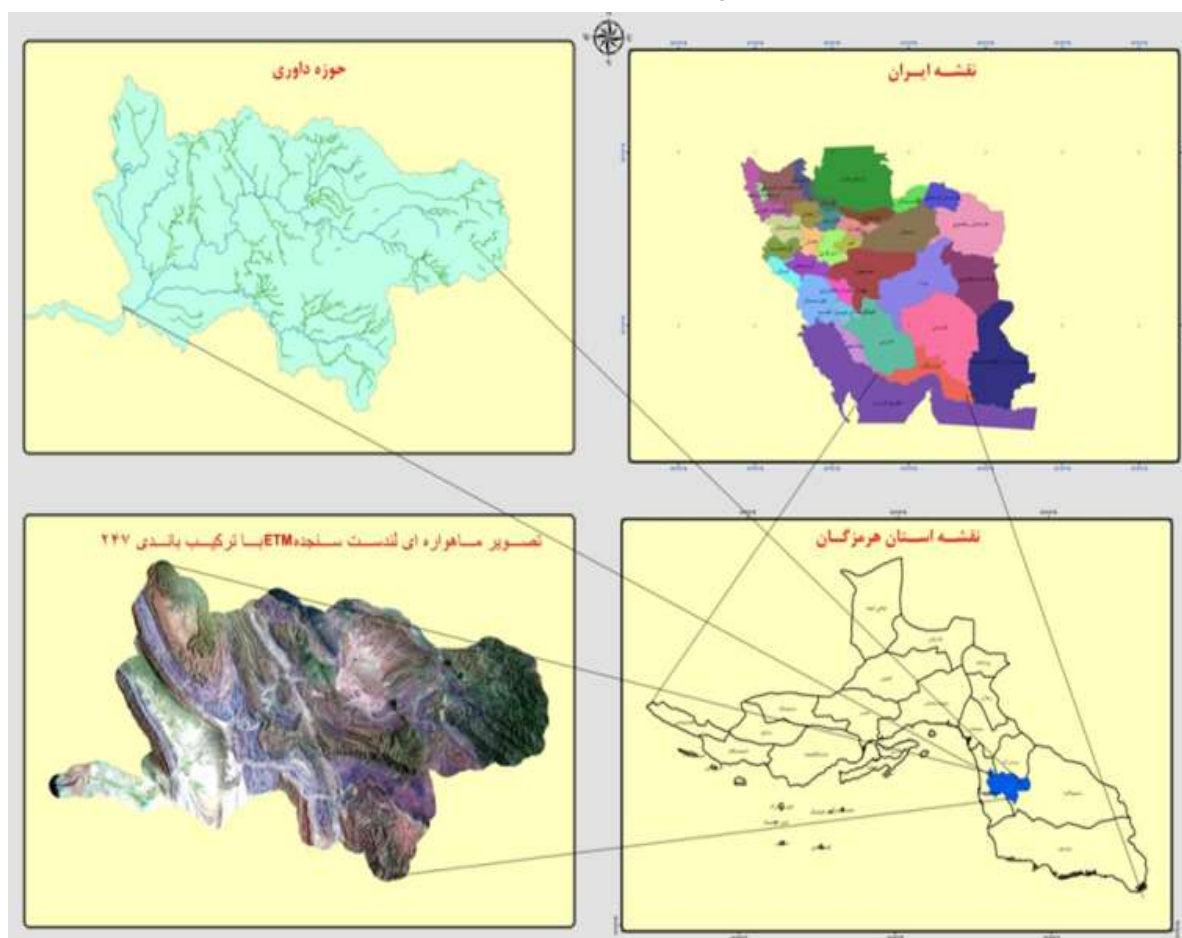
اهداف اصلی این تحقیق، شناسایی و اولویت‌سنجی مناطق مناسب احداث سد زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه گز می‌باشد.

به طور کلی در این تحقیق اهداف زیر پیگیری می‌شود:

- یافتن مکان مناسب جهت احداث سد زیرزمینی در حوضه آبریز رودخانه گز
- بررسی اهمیت و اولویت پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر در مکان‌یابی سد زیرزمینی
- ارائه راهکارهایی جهت احداث سد زیرزمینی در مکان انتخاب شده

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز رودخانه گز با مساحت ۱۲۷۸۷۰ هکتار یکی از حوضه‌های آبریز دریای عمان است که مستقیماً به دریا می‌ریزد. این حوضه در مختصات جغرافیایی ۵۷ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و ۲۶ درجه ۲۰ دقیقه تا ۲۶ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. رودخانه گز از ارتفاعات جنوبی رشته کوه‌های بشاگرد سرچشمه گرفته و با روندی شرقی - غربی پس از عبور از دشت مهمانی به دریای عمان می‌ریزد. متوسط بارندگی و دمای سالانه در محدوده مورد مطالعه به ترتیب ۱۰۰ میلیمتر و ۲۸/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در اقلیم نمای دومارتن محدوده مورد مطالعه در ناحیه فرا خشک تا بیابانی قرار گرفته‌اند. شکل شماره (۱) موقعیت حوضه را در کشور، استان و شهرستان نشان می‌دهد.



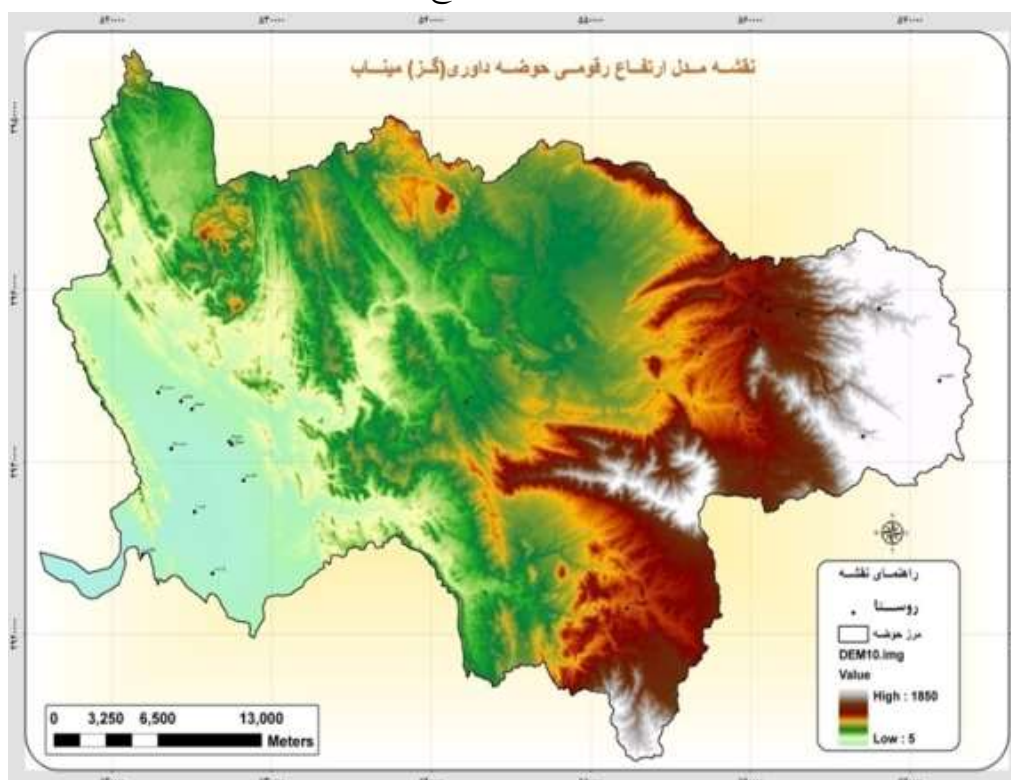
شکل شماره (۱) موقعیت حوضه در کشور، استان و شهرستان

فاکتورهای اصلی در انتخاب مکان‌های مناسب احداث سدهای زیرزمینی

براساس مطالعات انجام شده برای تعیین مناطق مناسب برای احداث سدهای زیرزمینی براساس نتایج مطالعات انجام شده از پارامترهای شیب، شبکه آبراهه، زمین‌شناسی، گسل، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، و توپوگرافی استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم افزار ArcGIS9.3 به تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به شرح زیر اقدام شده است:

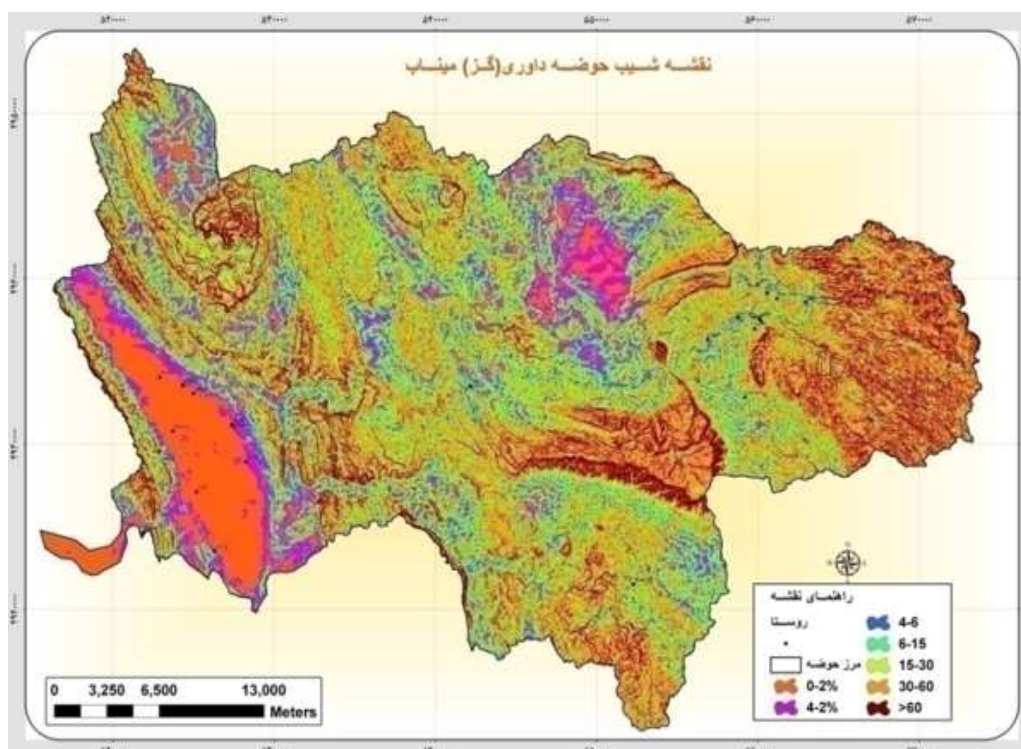
لایه توپوگرافی و شیب

نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ توپوگرافی سازمان نقشه برداری به عنوان داده پایه برای تعیین مرز حوضه، تهیه مدل ارتفاع رقومی، تهیه نقشه شیب مورد استفاده قرار گرفت. این نقشه‌ها که در فرمت DGN هستند ابتدا توسط نرم افزار Microstation8 تبدیل به فرمت DWG شدند و سپس به منظور استفاده در محیط GIS توسط نرم افزار Arc Gis9.3 تبدیل به فرمت Shapfile شدند. جهت زمین مرجع کردن نقشه‌ها و تصاویر ماهواره ای بر اساس نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ با دقت ۰,۵ پیکسل سیستم مختصاتی UTM با سطح مبنای WGS84 زون ۴۰ شمالی در نظر گرفته شده. آماده سازی تمام نقشه‌ها و تصاویر بر اساس این سیستم مختصات صورت پذیرفته است. به طور کلی، محل احداث سدهای زیرزمینی بهتر است در دره‌ها و رودخانه‌های باریک و یک دست انتخاب شود. از آنجا که شیب سطح ایستایی و در نتیجه میزان جریان آب زیرزمینی تابع شیب توپوگرافی محل است، برای احداث سد زیرزمینی باید حداقل شیب توپوگرافی موجود باشد (سلیمانی و همکاران ۱۳۸۷). شیب به عنوان یکی از فاکتورهای موثر در تعیین نقاط مناسب احداث سد زیرزمینی مطرح می‌باشد.



شکل ۲: نقشه مدل ارتفاعی رقومی DEM

سیلوا و رنګوتو (Silva and Rego Neto, 1998) در مطالعات خود شیبه‌های کمتر از ۶ درصد را به دلیل تشکیل مخازن مناسب زیرسطحی به عنوان شیب مناسب جهت ایجاد سد زیرزمینی می‌دانند. جهت تهیه نقشه شیب ابتدا نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ سه بعدی مطابق با اندکس نقشه‌های توپوگرافی تهیه شدند (شکل ۴-۱) و پس از آماده سازی از طریق جعبه ابزار Arc Gis و دستور Topo To Raster و اقدام به تهیه مدل رقومی ارتفاعی با اندازه پیکسل ۱۰ متر (مطابق با کمترین فاصله افقی بین دو خط کنتور بر روی نقشه) شده (شکل ۴-۳) و سپس از الحاقی Spatial Analyst گزینه Surface نقشه شیب بر حسب درصد تهیه گردید و مطابق نقشه شیب (شکل ۴-۴) حاصل مطابق با کلاس بندی شده استبرای بررسی وضعیت توپوگرافی منطقه مورد مطالعه از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و لایه مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شده است. نقشه مدل ارتفاعی رقومی و شیب منطقه مورد مطالعه در شکل شماره ۲ و ۳ آورده شده است.



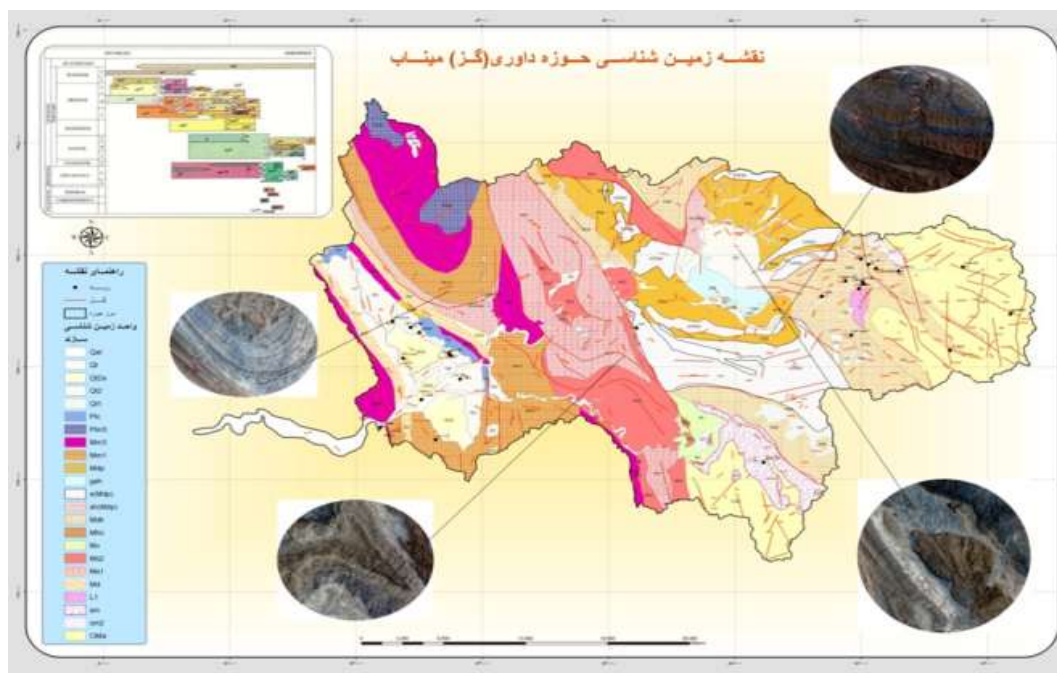
شکل ۳. نقشه شیب حوضه مورد مطالعه

لایه زمین شناسی: یکی از فاکتورهای بسیار مهم در مکانیابی سدهای زیرزمینی وضعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه می باشد. وجود سنگ بستر نفوذناپذیر به خصوص در محل احداث سد زیرزمینی و همچنین نوع سازندها از عوامل بسیار مهم است. منطقه مورد مطالعه از لحاظ تقسیمات ساختمانی - رسوبی در زون مکران قرار دارد. قدیمی ترین سازند در حوضه سازند انگهران (الیگومیوسن) می باشد. بیشترین گسترش مربوط به مارن‌های گوشه با ۱۲۹۱ کیلومترمربع و کمترین آن‌ها مربوط به کنگلومرای هارزبورژیتی (۱۵/۱ کیلومترمربع) است. در شکل شماره ۴ نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

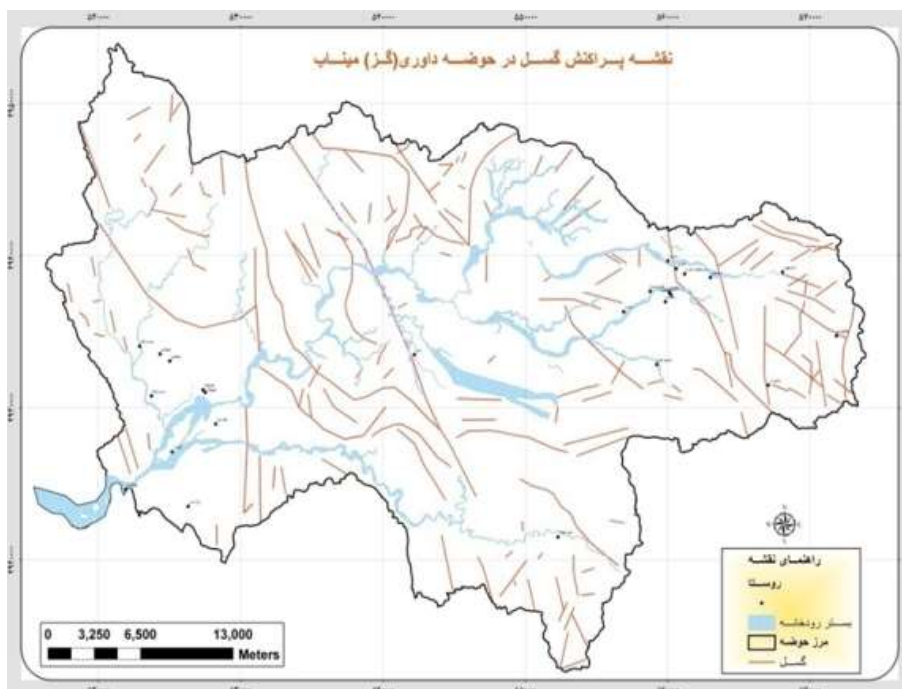
برای تهیه نقشه زمین شناسی ابتدا نقشه زمین ۱/۲۵۰۰۰ با کمک نرم افزار PCI Geomatica زمین مرجع و در نرم افزار Arc Gis رقومی گردید و در مرحله بعد با استفاده از تصویر ماهواره‌های ASTER با ترکیب باندهای ۳۲۱ و

نقشه رقومی شده تن و رنگ هر واحد زمین‌شناسی شناسایی می‌شود و سپس نقشه مذکور بر این اساس اصلاح گردید. هدف اصلی از تهیه نقشه زمین‌شناسی در مکان‌یابی سدهای زیر زمینی بدست آوردن محدوده آبرفت‌های بستر رودخانه جهت ایجاد سد زیرزمینی می‌باشد. برخلاف آبرفت‌های بستر، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی مرتفع موجود در کرانه‌های رودخانه از جمله مناطقی می‌باشند که دیواره سد را به دلیل نشت آب از تکیه گاهها نمیتوان بر روی آنها بنا نهاد (سلامی، ۱۳۸۵). با عنایت به اینکه این پادگانه‌های آبرفتی دارای بافت دانه درشت و نفوذپذیری بالایی (این موضوع با انجام بازدیدهای صحرائی مشخص گردید) در منطقه مورد بررسی می‌باشند، لذا بخشهایی از رودخانه که دارای این پادگانه‌های آبرفتی مرتفع در جناحین میباشد جزء مناطق نامناسب جهت احداث محور میباشند به همین منظور نقشه پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و نهشته‌های آبرفتی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی تهیه شدند.

لایه گسل: یکی از عوامل اصلی نشت و فرار آب از مخازن سدهای زیرزمینی، وجود شکستگی‌ها و گسل در محدوده پی سد می‌باشد. بنابراین لازم است محل‌های این گسل‌ها شناسایی و مشخص شوند (دانایی و همکاران ۲۰۱۱). گسل‌های حوضه مورد مطالعه عمدتاً دارای امتداد ۱۱۰-۱۶۰ درجه نسبت به شمال بوده و تقریباً موازی با گسل زندان می‌باشند. این گسل‌ها در سه دسته به شرح زیر قرار می‌گیرند: گسل‌های با امتداد ۱۲۰-۱۱۰ درجه، گسل‌های با امتداد ۱۴۰-۱۳۰ درجه و گسل‌های با امتداد ۱۶۰-۱۵۰ درجه. عمده گسل‌های فوق‌الذکر از مناطقی می‌گذرند که پتانسیل لازم برای ایجاد سد زیرزمینی را ندارند. در شکل‌های ۴ و ۵ نقشه زمین‌شناسی و پراکنش گسل‌ها نشان داده شده‌اند. در تحقیق حاضر به منظور بررسی اهمیت گسل‌ها و خطواره‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره ای در مکان‌یابی سدهای زیر زمینی و همچنین بدلیل جلوگیری از احداث محور سد بر روی گسل‌ها و جلوگیری از خروج آب مخزن سد از خطواره‌ها موجود در دیواره‌ها و بستر مخزن، این لایه اطلاعاتی تهیه شده است.



شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی حوضه مورد مطالعه



شکل ۵: نقشه پراکنش گسل حوضه مورد مطالعه

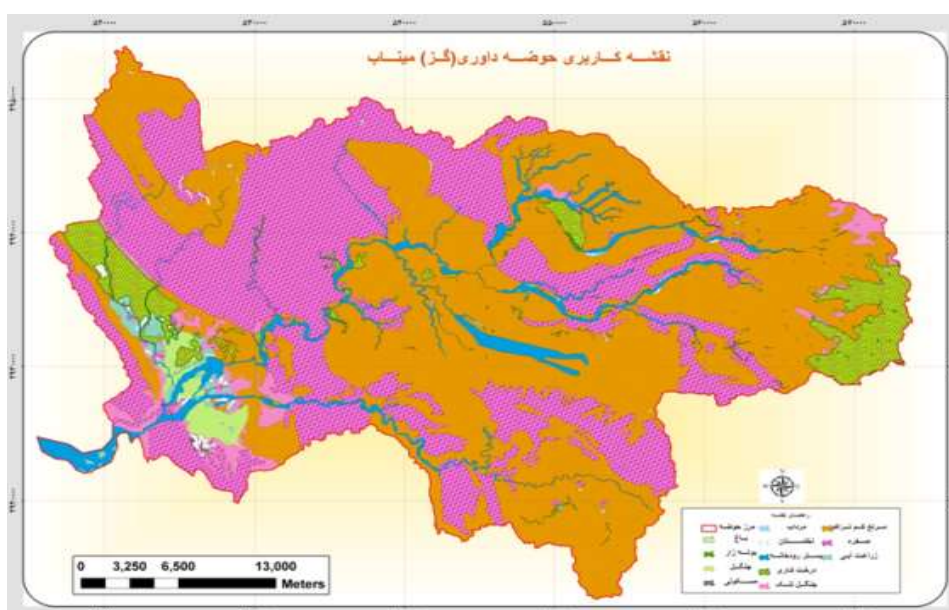
لایه کاربری اراضی: برای تهیه نقشه کاربری در این تحقیق از تصویر ماهواره ای سنجنده ASTER با ترکیب باندهای ۳۲۱ استفاده شده است با احداث سد زیرزمینی و با بالا آمدن سطح ایستابی، رطوبت خاک منطقه تا حد زیادی افزایش می یابد که در بهبود شرایط آبیاری و کشاورزی نقش شایانی دارد ولی مناطق مسکونی، شهری و صنعتی برای احداث سد زیرزمینی نامناسب هستند. با توجه به شکل شماره ۴ بیشتر کاربری حوضه مورد مطالعه را مناطق با مرتع کم تراکم و اراضی صخره ای تشکیل داده است.

وجود جریان زیرسطحی کافی بعنوان یکی از شرطهای مطرح در نظر گرفته میشود. مشاهده گیاهان آب دوست در آبراهه‌ها و خشکه رودها نشان دهنده وجود آب در زرفای کم در رسوبات آنهاست که بعنوان راهنما استفاده میشود. (سلامی، ۱۳۸۵). نمایان سازی پوشش گیاهی بستر آبراهه (نمایانگری از وجود جریان زیر سطحی) با استفاده از RS و عملیات رقومی در ترکیب باندها از قبیل NDVI انجام میگردد. از لحاظ پوشش گیاهی سواحل شمالی دریای عمان و کوههای مکران بخشی از تیپ عمده رویشی سند و صحارایی است. بیشتر پوشش سطح حوضه از مراتع کم تراکم پوشیده شده است. جنگلهای کم تراکم پراکنده از نوع گز، کرت و کهور نیز در بخش جنوبی و شمالی حوضه نیز دیده می شود. اگر آب زیرسطحی موجود در بستر آبراهه ساکن و بدون حرکت باشد نمی توان انتظار افزایش حجم آب مخزن را داشت. وجود جریانات زیرسطحی در اعماق کم قابل ملاحظه است، زیرا اگر اکیفر در اعماق باشد تشخیص ویژگیهای هیدروژئولوژیکی محل سد به دلیل افزایش هزینه و مشکلات تکنیکی دشوار خواهد بود.

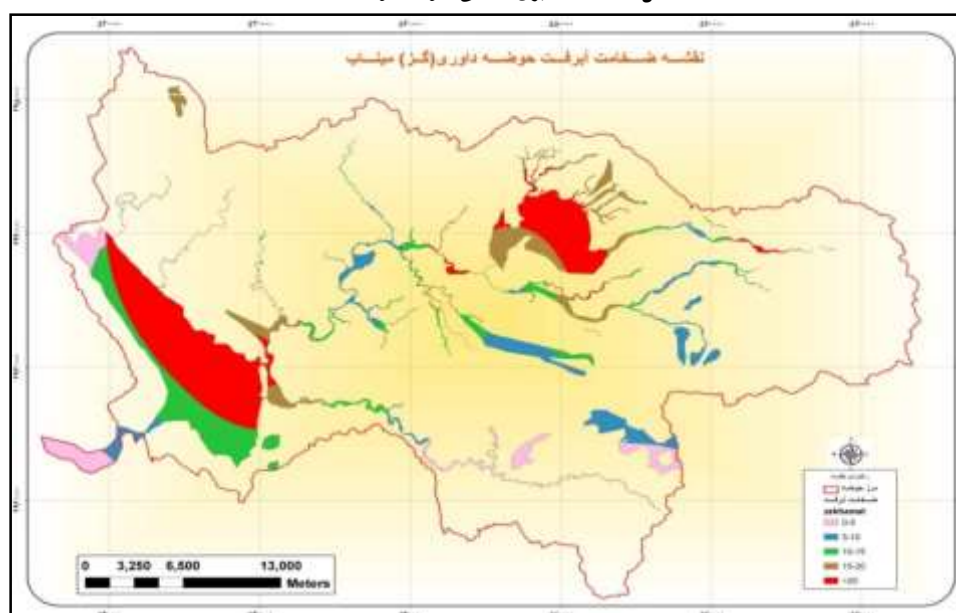
از شاخصه‌های جریان زیر سطحی کم عمق در برخی آبراهه‌ها وجود پوشش گیاهی سبز در طول سال در کناره‌های رودخانه می باشد. از دیگر نشانه‌های جریان زیرسطحی وجود چاه‌های حفر شده توسط کشاورزان منطقه برای

استحصال آب از جریانات زیرسطحی موجود در رودخانه می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت نوع پوشش گیاهی بیانگر میزان جریانات زیرسطحی بوده و در تعیین موقعیت سدهای زیرزمینی تاثیرگذار است.

لایه ضخامت آبرفت: جهت شناخت اولیه از ویژگی‌های آبرفت در محل محورهای پیشنهادی، لازم بود اطلاعات موثقی از وضعیت آبرفت از نظر ضخامت و پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی حاصل شود تا بتوان درباره وضعیت ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی آبرفت، سنگ بستر و تکیه‌گاه‌ها اظهار نظر نمود. برای نیل به اهداف فوق و عمق سنگ کف، از اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی که توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان هرمزگان در سال ۱۳۷۲ حفر شده اند استفاده شده است. در شکل‌های ۶ و ۷ نقشه کاربری اراضی و ضخامت آبرفت داده شده اند.



شکل ۶: نقشه کاربری اراضی حوضه مورد مطالعه



شکل ۷: نقشه ضخامت آبرفت حوضه مورد مطالعه

نتایج

تلفیق لایه‌ها و تعیین سایت‌های پیشنهادی

تصمیم‌گیری در انتخاب مکان‌های مناسب احداث سد زیرزمینی بادر نظر گرفتن اینکه معیارهای متعددی در این انتخاب باید در نظر گرفته شوند کاربرد شوری است. این معیارها شامل معیارهای فنی، زیست محیطی و اقتصادی - اجتماعی می‌باشد. در این زمینه هاشمی در سال ۱۳۸۱ مکان یابی جهت احداث سد زیرزمینی در حوضه آبریز حاج علیقلی واقع در استان سمنان را مورد بررسی قرار داده است. در این بررسی پارامترهای مساحت حوضه، فرسایش پذیری حوضه، میزان رواناب، شیب حوضه، عرض مقطع رودخانه،

ضخامت آبرفت و بافت رسوبات از طریق بررسی نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، بررسی‌های بصری تصاویر ماهواره‌ای و بررسی‌های صحرایی تعیین شده است و نهایتاً با توجه به معیارهای فوق مکان‌های پیشنهادی اولویت بندی شده است. طباطبائی یزدی در سال ۱۳۸۱ مکانیابی سد زیرزمینی را در بخش‌هایی از استان تهران و سمنان با استفاده از بازدیدهای میدانی، انجام آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی و بر اساس معیارهای فنی انجام داده است. همچنین پری اردکانی و دانائیان به روش فوق و باتشکیل لایه‌های اطلاعاتی لازم بر اساس تحلیل‌های کارشناسی مکانهای مناسب برای احداث سد زیرزمینی در منطقه خرائق یزد را مشخص نموده اند در گزارش ارزیابی سدهای زیرزمینی احداث شده Tuinhof و Foster در برزیل، عوامل حجم مخزن، عمق سنگ بستر نسبت به سطح زمین، نفوذپذیری خاک مخزن و کیفیت شیمیایی خاک مخزن به عنوان عوامل تاثیرگذار در میزان موفقیت سدهای زیرزمینی ذکر نموده اند. در مطالعات انجام شده توسط چزگی شیب و زمین‌شناسی به عنوان مهمترین عوامل برای مکانیابی در نظر گرفته شده است و در این نوشتار نیز جریان زیرسطحی (آبراهه)، شیب، زمین‌شناسی و فاصله از گسل و عرض دره و وسعت حوضه آبریز مهمترین معیارها را تشکیل می‌دهند. پس از بررسی‌های اولیه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و عکس‌های هوایی منطقه و بازدید بصورت پیمایش صحرایی مسیر رودخانه‌های گز، مرک و دهارن، سه نقطه بعنوان سایت‌های پیشنهادی جهت بررسی‌های تکمیلی انتخاب شدند که در شکل شماره ۸ جانمایی شده اند.



شکل ۸: جانمایی سایت‌های پیشنهادی در حوضه مورد مطالعه

سایت پیشنهادی شماره ۱: این سایت در ابتدای رودخانه گز در تنگه ای با عرض ۵۲/۱۲۷ متر پیشنهاد شده است. طبق نقشه‌های ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی منطقه، رسوبات بستر رودخانه را ذرات متوسط و ریز دانه تشکیل می‌دهند. عمق سنگ بستر نیز در این تکیه گاه بین ۲-۰ متر متغیر می‌باشد. تکیه گاه‌های این سایت از جنس ماسه سنگ و دارای استحکام مناسبی هستند. این حوضه به لحاظ وسعت جزء حوضه‌های متوسط می‌باشد. این محل می‌تواند نقطه مناسبی جهت احداث سازه سد زیرزمینی باشد، اما رسوبات سطحی درشت دانه بستر این حوضه وسعت چندانی نداشته؛ در نتیجه مخزن مساحت کمی را خواهد داشت. درحالیکه مکانی مستعد برای احداث سد روزمینی می‌باشد.

سایت پیشنهادی شماره ۲: این سایت بر روی رودخانه مرک در تنگه ای با عرض ۰۵/۷۸ متر در بالادست روستاهای گرائیک و زنگیان پیشنهاد شده است طبق نقشه‌های ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی منطقه، رسوبات بستر رودخانه را ذرات متوسط و درشت دانه از نوع GW و GC تشکیل می‌دهند. عمق سنگ بستر بر اساس حفاری‌های صورت گرفته حداکثر ۱۸ متر و در حاشیه حداقل ۳ متر برآورد شده است. تکیه گاه‌های این سایت نیز از جنس ماسه سنگ و دارای استحکام مناسبی هستند. براساس خصوصیات ژئومتری این حوضه به لحاظ مساحت جزء حوضه‌های کوچک و شیب آبراهه در این حوضه خیلی کم می‌باشد.

سایت پیشنهادی شماره ۳: سایت شماره (۳) بر روی رودخانه دهان در تنگه ای به عرض ۶۴/۱۲۴ متر در نزدیکی روستای گرائیک پیشنهاد شده است. ذرات با تناوب دانه ریز تا درشت دانه، رسوبات بستر رودخانه را شامل می‌شوند. تکیه گاه‌های این سایت به لحاظ مقاومت ظاهری دارای وضعیت مناسبی نیستند. براساس خصوصیات ژئومتری این حوضه به لحاظ مساحت جزء حوضه‌های کوچک و شیب آبراهه در این حوضه خیلی کم می‌باشد. در جدول ۲ خصوصیات ژئومتری حوضه سایت‌های پیشنهادی و در شکل ۹ موقعیت آنها آورده شده است.

شکل ۹: الف) تصویر ماهواره‌ای از حوضه آبریز سایت پیشنهادی. ب) مخزن سایت پیشنهادی. ج) جانمایی سایت پیشنهادی		
سایت پیشنهادی شماره (۱)	سایت پیشنهادی شماره (۲)	سایت پیشنهادی شماره (۳)
		
		

جدول ۲: خصوصیات ژئومتری حوضه سایت‌های پیشنهادی

سایت پیشنهادی	مساحت محیط (km ²)	ارتفاع ماکزیمم (m)	ارتفاع مینیمم (m)	طول آبراهه (km)	شیب حوضه (m/m)	ضریب گرادیلوس	ابعاد مستطیل معادل		مساحت مخزن (km ²)	طول سد پیشنهادی (m)
							عرض (km)	طول (km)		
۱	۱۳۶	۵۶	۲۰۴	۹/۸۳	۰/۰۱۵	۱/۳۴	۲۱/۷	۶/۲۵	۰/۰۵	۳۱۰
۲	۱۳/۳۵	۱۷/۵	۳۰۰	۲/۹۱	۰/۰۶۵	۱/۳۴	۶/۷۸	۱/۹۶	۰/۷۶	۷۳
۳	۵/۷۷	۱۱/۰۸	۲۰۳	۲/۱۰	۰/۰۵۹	۱/۲۹	۴/۱۴	۱/۳۹	۱/۳۷	۱۰۰

نتایج و بحث

بررسی خصوصیات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی ساختگاه‌های پیشنهادی

در سایت شماره ۱ به دلیل اینکه در محدوده این سایت و تکیه‌گاه‌های آن لایه‌های مارن با ضخامت حدود ۱/۵ متر از سطح زمین در بستر رودخانه وجود دارد، امکان نفوذ آب به آبرفت را به حداقل می‌رساند. برونزد لایه‌های سنگی در ۲۰۰ متری بالا دست سد در سطح زمین قابل مشاهده می‌باشد که در نتیجه از ضخامت آبرفت در این ساختگاه می‌کاهد. رسوبات تراس‌های آبرفتی اطراف بستر نیز به دلیل تخریب و حمل ذرات رسی از لایه‌های مارنی پیرامون مخزن، ذرات دانه ریز همراه با گراول، ماسه و سیلت از جورشدگی خوبی برخوردار بوده ولی میزان نفوذپذیری و تخلخل را کاهش داده‌اند.

در سایت شماره ۲ تشکیلات زمین شناسی از سازند کنگلومرای میناب با میان لایه‌هایی از مارن و ماسه سنگ در تکیه‌گاه‌ها و رسوبات درشت دانه عهد حاضر در بستر رودخانه (مخزن سد) تشکیل شده است. این واحد نفوذپذیری خیلی زیادی داشته و تحت تاثیر سیلاب‌ها فرآیندهای رسوب گذاری در حال حاضر نیز تشکیل می‌گردد.

در سایت شماره ۳ نهشته‌های آبرفتی منطقه به ظاهر دارای نفوذ پذیری نسبتاً خوب بوده اما دانه‌بندی در آبرفت و محدوده مخزن این سایت متشکل از قطعات درشت سنگ، قلوه سنگ، گراول، ماسه و دانه‌های ریزتر شامل سیلت و رس می‌باشد که می‌توان دانه بندی گسترده به آن نسبت داد. این درحالیست که گستردگی دانه‌بندی موجب کاهش تخلخل و تراوایی آبرفت شده است.

انتخاب سایت یا اولویت اول

برای کمی کردن و بررسی وضعیت مکانی داده‌هایی مثل بارندگی و تابش خورشید و... که با استفاده از اطلاعات حاصل از انعکاس امواج در محدوده‌های مشخص طول موج ایجاد می‌گردد از سنسورهای دور استفاده می‌گردد و در موارد تشخیصی آب، خاک مرطوب، خاک خشک، پوشش گیاهی بستر آبراهه، سنگ‌ها و محاسبه عرض آبراهه (محاسبه حجم مخزن) و ظهور تناوبی جریان پایه در بستر آبراهه و وجود عوامل آلاینده طبیعی یا غیرطبیعی و وجود مصالح مورد نیاز (معادن سنگ و خاک) و غیره کاربرد دارد.

پس از بررسی‌های اولیه و سنسورهای از دور و همچنین بازدید صحرایی از محل سایت‌های انتخاب شده سایت شماره (۲) به دلایل ذیل بعنوان سایت مستعد و دارای اولویت اول انتخاب گردید.

- عمق آبرفت در این سایت بیشتر از سایت‌های دیگر می‌باشد.

- تکیه‌گاه‌های این سایت نسبت به سایت‌های دیگر به لحاظ مقاومت ظاهری و نحوه قرار گیری آن در مقابل جهت جریان آب از وضعیت بهتری برخوردار است.
 - نوع رسوبات بستر این سایت، GW بوده و تماماً درشت دانه هستند و جریان زیرسطحی مطلوبی دارد.
 - عرض تنگه پیشنهادی جهت احداث محور سد نسبت به سایر سایت‌ها کمتر است.
 - این سایت در بالادست دو روستا قرار گرفته و جهت بهره برداری از آن می‌توان به هردو روستا خط انتقال احداث نمود.
- سایت پیشنهادی شماره (۲) دارای محیط ۹۲۱۵ کیلومتری و مساحت ۱۲۹۶ کیلومتر مربع می‌باشد. طبق حفاری‌های انجام شده توسط شرکت سهامی آب منطقه استان هرمزگان در این رودخانه، عمق متوسط آبرفت بستر رودخانه ۴ متر تخمین زده شده است. در جدول شماره ۳ پارامترهای مقاومتی مصالح آبرفت بستر ساختگاه شماره ۲ نشان داده شده است.

جدول شماره ۳: پارامترهای مقاومتی مصالح آبرفت بستر ساختگاه شماره ۲

بافت	طبقه بندی	دانسیته (gr/cm ³)		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (gr/cm ²)
		γ_{wet}	γ_{sat}		
درشت دانه	GW	2.10	2.20	38.0	0.0

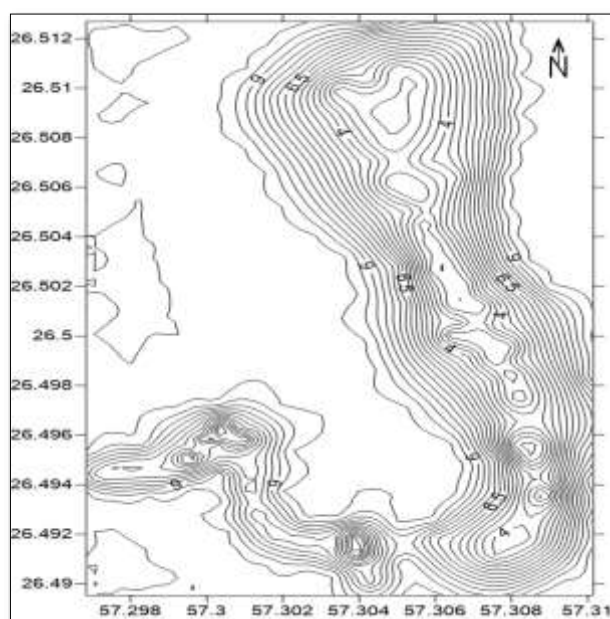
برآورد حجم مخزن و حجم آبیگری سالانه ساختگاه سد زیرزمینی شماره ۲

با استفاده از توپوگرافی بستر رودخانه (شیب رودخانه) و اطلاعات موجود از عمق سنگ کف (گمانه‌های حفاری) و عرض مقطع رودخانه، حجم مخزن سد زیرزمینی با دقت مناسب قابل محاسبه است. جهت تعیین حجم مخزن ابتدا اقدام به ترسیم نمودن محدوده مخزن سد در Google earth v.7.1 و سپس انتقال و رقومی نمودن آن در نرم افزار Global mapper v.17 گردید. سپس در نرم افزار Surfer v.10.0 با استفاده از اطلاعات گمانه‌های اکتشافی، عملیات سه بعدی سازی و تعیین حجم مخزن انجام شد. میزان دبی آب زیرسطحی بطور میانگین حدود ۰/۱۳ مترمکعب برثانیه است (براساس رابطه زیر و متوسط بارش سالانه ایستگاههای بارانسنجی منطقه).

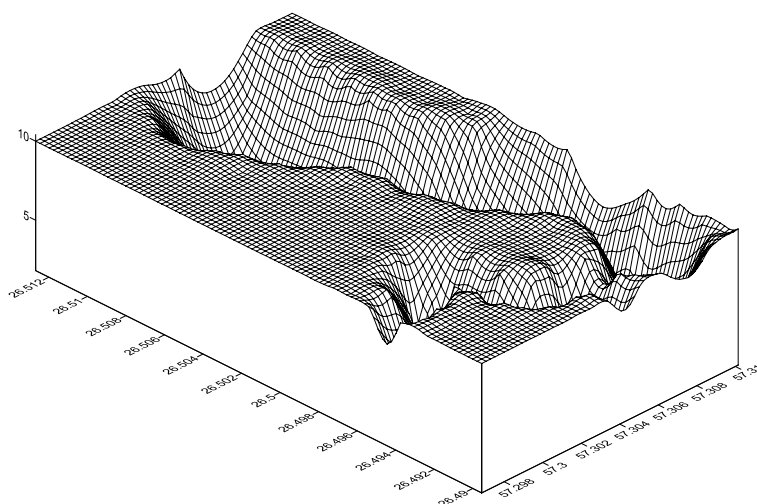
$$Q = \frac{1.115P^{1.44}}{T^{1.34}A^{0.0613}}$$

در این رابطه P بارندگی سالانه حوضه (سانتی‌متر)، T دمای متوسط سالانه حوضه (درجه سانتی‌گراد)، Q ارتفاع رواناب سالانه حوضه (سانتی‌متر)، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع) می‌باشد

چنانچه سد زیرزمینی تا سطح زمین ادامه یابد، مخزن سد در مدت حدود ۶۹ روز پر خواهد شد لذا با مدیریت مناسب، امکان آبیگری ۳-۴ نوبت در سال وجود دارد. بدین ترتیب حجم آبیگری سالانه سد در ۴ نوبت، حدود ۱/۳ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. از آنجا که پیک مصرف آب منطقه در فصول بهار و تابستان می‌باشد، می‌توان با استحصال این میزان آب در شرایط بی‌آبی و بحرانی منطقه خصوصاً در فصول گرم، در افزایش تولیدات دامی و کشاورزی منطقه نقش به‌سزایی داشت. در شکل ۱۰ خطوط تراز عمق آبرفت در مخزن سد پیشنهادی و در شکل ۱۱ نمایش سه بعدی (D۳) مخزن سد زیرزمینی پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۱۰: خطوط تراز عمق آبرفت در مخزن سد پیشنهادی



شکل ۱۱: نمایش سه بعدی (3D) مخزن سد زیرزمینی پیشنهادی با استفاده از نرم افزار Surfer v.10.0

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

سایت شماره (۲) با توجه به میزان نفوذپذیری، عمق آبرفت، عدم چسبندگی میان ذرات خاک و میزان عرض تاج سد در اولویت اول و سایت‌های شماره (۱) و (۳) نیز به ترتیب بعنوان اولویت‌های دوم و سوم معرفی می‌گردند. عمق متوسط آبرفت بستر رودخانه در سایت پیشنهادی بطور میانگین ۴ متر برآورد شده است. سایت پیشنهادی از نفوذپذیری بالایی برخوردار بوده بطوریکه میانگین نفوذپذیری آن $0/006$ سانتیمتر برثانیه می‌باشد. تکیه گاه‌های سایت پیشنهادی به لحاظ درزه داری، جز بلوک‌های سالم قرار داشته و درزه‌های موجود در آن ناچیز بوده، بطوریکه بیشترین میزان فضای مستعد فرار آب را در واقع لایه بندی ایجاد کرده است، اما بدلیل اینکه لایه‌ها بصورت مایل و در جهت جریان آب و یا مورب و عمود بر جهت جریان قرار دارند، تمامی این فضاها با ذرات ریز و درشت و مارن‌های میان لایه ای پر شده باشند و میزان فرار آب از این درزه‌ها قابل توجه نباشد. حجم آبیگری

مخزن سایت پیشنهادی در هر نوبت برابر با ۷۷۷ هزار متر مکعب برآورد شده است. با مدیریت مناسب، امکان آبیگری ۳-۴ نوبت در سال وجود دارد و حجم آبیگری سالانه سد در ۴ نوبت، حدود ۱/۳ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود.

با توجه به وجود معادن شن و ماسه در منطقه مورد مطالعه، مطالعه رسوب شناسی و برآورد بار رسوبی رودخانه‌های بالادست سایت مورد نظر پیشنهاد می‌شود. همچنین به دلیل وجود آهک در برخی از توالی ماسه سنگی، مطالعه و بررسی فرآیند کارستی شدن و فرار آب از تکیه گاه‌ها و حاشیه رودخانه بوسیله ردیاب‌های صنعتی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

پری اردکانی، م. و دانائیان، م. ر. ۱۳۸۱؛ مکان‌یابی سدهای زیرزمینی در منطقه خرناق یزد، گزارش فنی، معاونت عمرانی ستاد حوادث غیر مترقبه، وزارت کشور، استانداری یزد.

خیرخواه زرکش، میرمسعود. ناصری، حمیدرضا. داوودی، محمدهادی و سلامی، همت. ۱۳۸۷، استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در اولویت بندی مکان‌های مناسب احداث سد زیرزمینی مطالعه موردی: دامنه شمالی کوه‌های کرکس - نطنز. مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی. شماره ۷۹.

خلیفه، محمد حسین (۱۳۹۲). مکان‌یابی سد زیرزمینی پسبند، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.

چزگی، ج.، مرادی، ح.، خیرخواه، م.، قاسمیان، د. و روستایی، ی.، ۱۳۸۸ - مکان‌یابی سد زیرزمینی به روش معیارهای حذفی با استفاده از GIS (مطالعه موردی غرب تهران) پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران.

سلیمانی. سمانه، نیکودل. محمدرضا، ارومیه ای. علی، بهرامی. حمید (۱۳۸۷)، مکان‌یابی گزینه‌های مناسب جهت احداث سد زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی دشت مشهد)، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۲۳۹-۲۳۴.

سلامی، ه. ۱۳۸۵؛ تعیین مناطق مناسب جهت احداث سد زیرزمینی در مناطق آذرین با استفاده از دورسنجی، مطالعه موردی: دامنه شمالی کوه‌های کرکس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی.

داودی، م. ۱۳۸۳؛ سدهای زیرزمینی راهکاری اقتصادی و موثر برای مدیریت و توسعه منابع آب، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

دانایی. رضا، حسن زاده. محمد، محتشم نیا. سعید (۱۳۹۰)، مکان‌یابی سدهای زیرزمینی با استفاده از RS و GIS (مطالعه موردی: منطقه منشاد استان یزد). اولین کنفرانس ملی بررسی‌های اقتصادی در زمینه کشاورزی، ۱۴۶-۱۵۱.

طباطبائی یزدی، ج. ۱۳۸۱؛ بهره برداری از جریانات زیر سطحی در آبراه‌های فصلی با استفاده از سدهای زیرزمینی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، گزارش تحقیقاتی

هاشمی احمد آباد، سیدوحید (۱۳۹۰). بررسی شرایط ساختگاه و مخزن سدهای زیرزمینی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی (مطالعه موردی سد زیرزمینی بشیران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن اکتشاف، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

شرکت مهندسی مشاور فارساب صنعت، ۱۳۸۶، "مطالعات زمین شناسی دشت پاراف-سیریک"

Foster, S., and Tuinhof, A., 2004; Subsurface dams to augment groundwater storage in basement terrain for human subsistence-Brazilian and Kenyan experience, World Bank, Groundwater Management Advisory Team, No.5

Forzieri, G., Gardenti, M., Caparrini, F. & Castelli, F., 2007, A methodology for The pre-selection of suitable sites for surface and underground small dams in arid areas: A case study in the region of Kidal, Mali, Physics and Chemistry of the Earth 33, pp. 74-85.

- Mesfin, S., 1999; Design of subsurface dam for Bori Village, Addis Ababa, Ethiopia.
- Saaty, T.L., 1994; How to make a decision: The analytical hierarchy process, Interfaces 24 (6, S): 19-43.
- Saaty, T., 1980; The analytic hierarchy process McGraw Hill.
- Telmer, K., and Best, M., 2004; Underground dams: A practical solution for the water needs of small communities in semi-arid regions, School of Earth and Oceans Sciences, University of Victori