ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی سدهای زیرزمینی (بررسی موردی)

عزت صفاری*، رسول اجل لوئیان؛ دانشگاه اصفهان، گروه زمین شناسی

چکیده

تاریخ: دریافت ۹۱/٦/۱۲ **پذیرش** ۹۲/٦/۱٦

سدهای زیرزمینی از فن‌آوری‌های سازگار با طبیعت است که در مدیریت منابع آب، به‌ویژه جلوگیری از خروج بدون استفادهٔ آب‌های زیرزمینی قابل مصرف، بسیار کارآمد هستند. بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی آبرفت‌های مخزن این نوع سدها حائز اهمیت است. بدین لحاظ در تحقیق حاضر ویژگی آبرفت‌های مخزن سد زیرزمینی ماست‌بندی واقع در جنوب اردستان (شمال شرق اصفهان) بررسی شده است. در این راستا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آبرفت‌های پوششی مخزن به‌صورت آزمایشگاهی و برجا تعیین شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد این آبرفت‌ها از نوع خاک دانه‌ای متراکم و غیریک‌نواخت با خاصیت غیرخمیری هستند. این رسوبات از نظر نفوذپذیری در ردهٔ خاک‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد قرار می‌گیرند. با توجه به تخلخل به‌دست آمده از این آزمایش‌ها و عمق رسوبات مخزن (۵ تا ۱۲ متر) در صورت اجرای سد زیرزمینی هم‌سطح، حجم مخزن معادل حدود ۲۰۰,۰۰۰ متر مکعب است. به‌طورکلی بارگذاری و باربرداری در اثر پر و خالی شدن مخزن از آب، منجر به نشست می‌شود. در حالی که در مخزن این سد با توجه به این‌که ذرات تشکیل‌دهنده بیش‌تر از نوع ماسه و گراول و به‌میزان کم‌تری سیلت است، نشست صورت گرفته از نوع آنی است. با توجه به پارامترهای مکانیکی به‌دست آمده، میزان نشست آنی برای واحد سطح در حالتی که مخزن از آب تخلیه شده برابر با ۱٦ میلی‌متر است.

واژه‌های کلیدی: سدزیرزمینی، مکانیک خاک، آبرفت، اردستان

* **نویسنده مسئول** e.safari2013@ymail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

مقدمه

استان اصفهان به‌دلیل واقع شدن در منطقهٔ خشک و نیمه‌خشک، از نظر زمانی و مکانی توزیع بارندگی نامنظم دارد. علاوه بر این رشد غیرعادی نیازهای مختلف آبی (کشاورزی، صنعتی و شرب)، محدودیت فوق‌العاده منابع آب سطحی، تغییرات اقلیمی و کاهش روزافزون منابع آب زیرزمینی، باعث شده شرایط حادی از لحاظ کمبود آب در این استان به‌وجود آید. احداث سدهای زیرزمینی راه‌کاری عملی برای استفاده بهینه از منابع آب و مدیریت صحیح آب‌های زیرزمینی به‌شمار می‌رود. با توجه به هزینهٔ کم، روش ساخت آسان، ذخیرهٔ آب بهداشتی و مزایای بسیاری که این سدها نسبت به سدهای سطحی دارند، می‌توانند روشی مقرون به‌صرفه و ساده برای ذخیره‌سازی و استفاده از آب‌های زیرزمینی باشند.

در اجرای سدهای زیرزمینی مانند هر پروژهٔ عمرانی دیگر زمین به‌عنوان پی یا بستر، اولین و مهم‌ترین عامل پژوهشی است و بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی، اصولی‌ترین موارد بررسی در پژوهش‌های اولیه را به‌خود اختصاص می‌دهند. مسائل ژئوتکنیکی می‌تواند باعث تغییر روش‌ها، برنامه‌ها و عملیات اجرایی در این سدها شده و هزینه‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. بنا بر این آگاهی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی آبرفت‌های تشکیل‌دهندهٔ مخزن برای درک عمل‌کرد آن در حین اجرای پروژه و نیز موفقیت پروژه برای استحصال آب زیرسطحی ضروری است.

سد زیرزمینی

سدهای زیرزمینی سازه‌هایی هستند که جریان طبیعی آب‌های زیرزمینی را مسدود می‌کند و سبب ایجاد ذخایر آبی در زیرزمین می‌شوند. به‌طورکلی ارتفاع دیواره در سدهای زیرزمینی برخلاف سدهای معمولی بالاتر از سطح رودخانه نخواهد بود. در این سدها با خاک‌برداری بستر رودخانه و پر کردن آن با خاک‌ها و مواد نفوذناپذیر، لایه نفوذناپذیری در مقابل جریان آب زیرزمینی ایجاد می‌کنند که منجر به تشکیل مخزن آب زیرزمینی می‌گردد. در این سدها با توجه به پارامترهای مختلفی از قبیل عرض مقطع، عمق سنگ کف، دبی عبوری، نوع آبرفت در منطقه، ممکن است لایه نفوذناپذیر به‌صورت پرده غیرقابل نفوذ رسی، بتنی، پلاستیکی، سپر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

فلزی و یا مصالح بنایی در نظر گرفته شود. بدیهی است اجرای این‌گونه موانع که به‌عنوان سد زیرزمینی نام برده می‌شود، نیاز به بعضی تأسیسات دارد. این تأسیسات بسته به شرایط توپوگرافی، نوع و محل تغذیه متفاوت هستند. از جمله این تأسیسات می‌توان به ایستگاه‌های پمپاژ، سرریز، کانال انتقال آب و سیستم خدمات و نگه‌داری اشاره کرد [۱]، [۲]، [۳]، [٤]، [۵]. سدهای زیرزمینی به‌طورکلی به دو دستهٔ سدهای زیرزمینی[۱] و سدهای ذخیره ماسه‌ای[۲] تقسیم می‌شوند [٦]، [۷].

از مهم‌ترین محاسن این سدها با توجه به نوع و شرایط احداث آن‌ها؛ کم‌تر بودن میزان تبخیر آب ذخیره شده در مخزن این سدها نسبت به مخازن سطحی و تأثیر کم‌تر بر اکوسیستم منطقه نسبت به حالتی که مخزن در سطح زمین تشکیل می‌شود. خسارت مخزن نظیر جابه‌جایی روستاها، تغییر جاده، خط انرژی و... ندارد و از زمین سطح مخزن می‌توان برای مصارف دیگری مانند کشاورزی، صنعت و ... استفاده کرد و در بسیاری از موارد این نوع سدها می‌توانند مانعی در برابر هجوم آب‌های شور و آلوده به حوضهٔ آب سالم باشند [۸]، [۹]. مهم‌ترین معایب این سدها در قیاس با سدهای متداول سطحی؛ عدم امکان تولید نیروی برق آبی در این سدها، دشوار بودن تخمین صحیح حجم آب انباشته شده و قابل برداشت از مخزن، ذخیره حجم آب کم‌تر نسبت به سدهای متداول که روی زمین احداث می‌شوند و نیز امکان تأثیر منفی بر روی آبخوان پایین دست، هستند [۱۰].

با توجه به موقعیت و اهداف بهره‌برداری، کاربردهایی از جمله مدیریت منابع آب (مانند مسدود کردن چند چشمه یا قنات)، تأمین آب مصرفی (آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی)، توسعهٔ روستاها و جلوگیری از مهاجرت روستاییان، تغذیهٔ مصنوعی سفره‌های زیرزمینی و بالا آوردن سطح ایستابی، جلوگیری از نفوذ آب شور، تصفیه فاضلاب‌ها و بهبود بخشیدن کیفیت آب، کنترل سیلاب‌ها، پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در پایین دست و جلوگیری از فرسایش خاک برای سدهای زیرزمینی قابل ذکر است [۱۱].

---

۱. Underground dams ۲. Sand storge dams

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده

سد زیرزمینی ماست‌بندی در صد و بیست کیلومتری شمال شرق اصفهان و پانزده کیلومتری جنوب اردستان واقع است. محل احداث این سد زیرزمینی در حدود ٦۰۰ متری حاشیهٔ جنوب غربی روستای ماست‌بندی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی محور این سد زیرزمینی در "۱۲/۱´۱۳°۳۳ شمالی و"۲٦/٦´۱۹°۵۲ شرقی واقع است. منطقهٔ مذکور از نظر تقسیمات زمین‌ساختی در زون ایران مرکزی و زیر زون آتشفشانی- رسوبی، ارومیه- دختر قرار گرفته است. جنس سنگ‌های موجود در این منطقه از نوع سنگ‌های آندزیتی، توف برشی، توف ماسه‌ای ایگینمبریت و سنگ‌های آذرآواری است. با توجه به لیتولوژی محدودهٔ بررسی شده که عمدتاً از سنگ‌های آذرین اسیدی تا متوسط با قابلیت انحلال ناچیز تشکیل شده است، کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی با عبور از آن‌ها تغییر زیادی نداشته و آب ذخیره شده در مخزن این سد برای شرب و کشاورزی مناسب است.

مخزن سد زیرزمینی ماست‌بندی از رسوب‌های عهد حاضر شامل پادگانه‌های آبرفتی جوان و نهشته‌های بستر رودخانه تشکیل گردیده است. آبرفت‌های منطقه به‌صورت قطعات کم‌وسعت و نواری نسبتاً باریک، حاشیهٔ بستر اصلی را در حوضه بررسی شده تشکیل می‌دهند. ضخامت رسوبات مخزن با توجه به حفاری‌های صورت گرفته و بررسی‌های ژئوالکتریکی بین ۵ تا ۱۲ متر متغیر است. این واحد آبرفتی بر روی سنگ بستری از جنس توف ماسه‌ای و توف برشی قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه و در شکل ۲ موقعیت محور سد زیرزمینی نسبت به روستای ماست‌بندی نشان داده شده است.

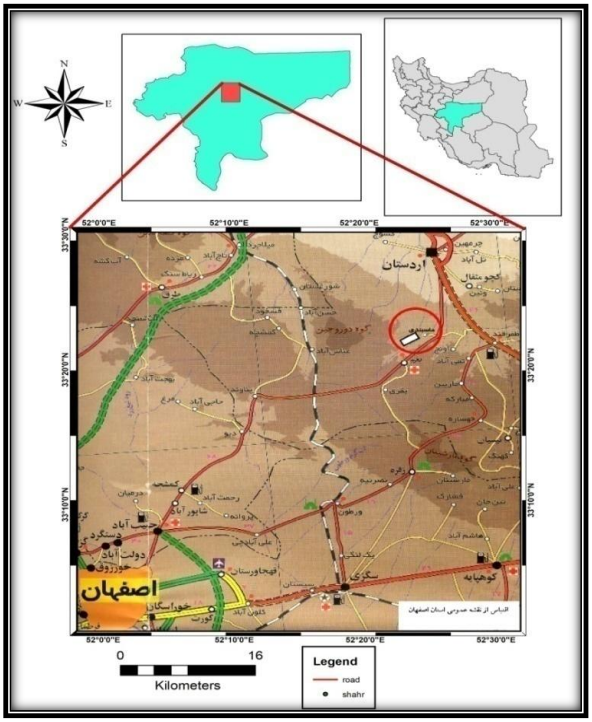
روش‌ها

شرایط لازم برای موفقیت پروژهٔ احداث سد زیرزمینی، وجود لایه‌های آبرفتی با تخلخل زیاد و ضخامت کافی برای ذخیرهٔ مناسب و هرچه بیش‌تر آب است. به‌دلیل این‌که در سدهای زیرزمینی مخزن در زیر سطح زمین و در سازندهای اطراف محور سد ذخیره می‌شود، برای ایجاد مخزنی با آب‌دهی مناسب وجود تشکیلات زمین‌شناسی با تخلخل مؤثر[۱] زیاد ضروری است.

۱. Effective porosity

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقهٔ بررسی شده

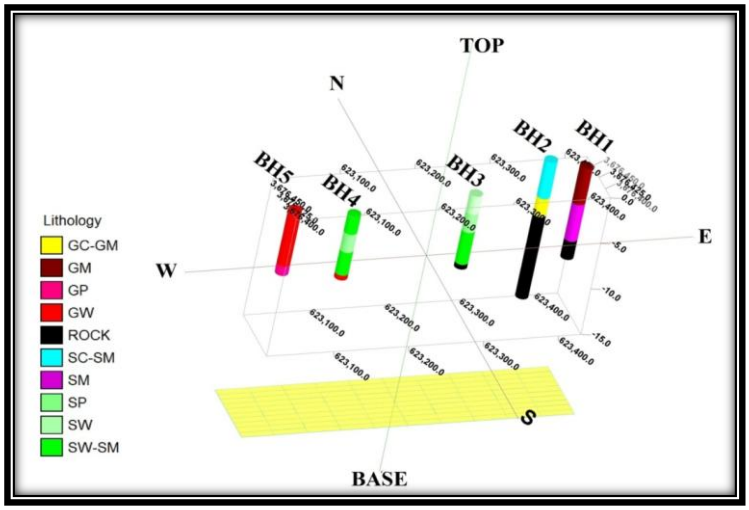
شکل ۲. محور سد زیرزمینی و موقعیت آن نسبت به روستای ماست‌بندی (دید به سمت شمال)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

در سفره‌های با مصالح ریزدانه معمولاً آب کافی درون فضای خالی خاک وجود دارد ولی امکان بهره‌برداری از آن به‌دلیل ضریب آب‌گذری کم، محدود است. بنا بر این بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی آبرفت‌های مخزن این نوع سدها اهمیت دارد.

در این منطقه با انجام پژوهش‌های ژئوفیزیکی عمق سنگ کف، ضخامت آبرفت و تغییرات آن و هم‌چنین عمق آب زیرزمینی تعیین شده است. به‌علاوه پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام شده در محل اجرای پروژه سد زیرزمینی ماست‌بندی با حفر ۵ گمانه ماشینی به‌عمق حداکثر ۱۵ متر به‌وسیلهٔ منابع طبیعی استان اصفهان انجام یافته است. شکل ۳ محل و موقعیت این گمانه‌ها را نشان می‌دهد.



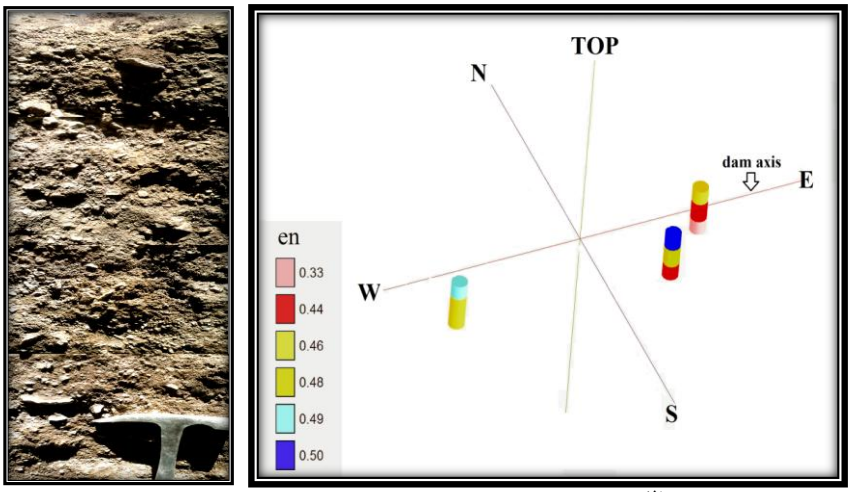
شکل ۳. موقعیت گمانه‌ها و نوع خاک تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها

محور این سد در نزدیکی گمانه دوم ($BH_۲$) از سمت شرق واقع است، این گمانه نسبت به سایر گمانه‌ها عمق بیش‌تری داشته و برای شناسایی وضعیت پی سنگ در محل محور، حدود ۹ متر داخل سنگ بستر ادامه یافته است. قابل ذکر است در چهار گمانه دیگر حفاری با رسیدن به سنگ بستر متوقف شده و بررسی‌های صورت گرفته در آن‌ها تنها بر روی آبرفت بوده و عمق این گمانه‌ها بین ۷ تا ۱۰ متر متغیر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی این آبرفت‌ها ابتدا لازم است ویژگی‌های فیزیکی این رسوبات مشخص گردد، در این راستا با توجه به امکانات موجود ۳ چاهک دستی به عمق ۲ متر حفاری شده و آزمون‌هایی نظیر دانه‌بندی، وزن مخصوص، تعیین دانسیته در محل، نسبت پوکی، میزان دانسیته حداقل و حداکثر، درصد رطوبت و نفوذپذیری بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از آن‌ها صورت گرفته است. شکل ٤ موقعیت این چاهک‌ها نسبت به محور سد زیرزمینی و نمونه‌ای از رسوبات داخل آن‌ها را نمایش می‌دهد. در این تحقیق سعی شده مکان حفاری این چاهک‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شود که حداکثر اطلاعات از محدودهٔ مخزن سد زیرزمینی مورد نظر به‌دست آید.



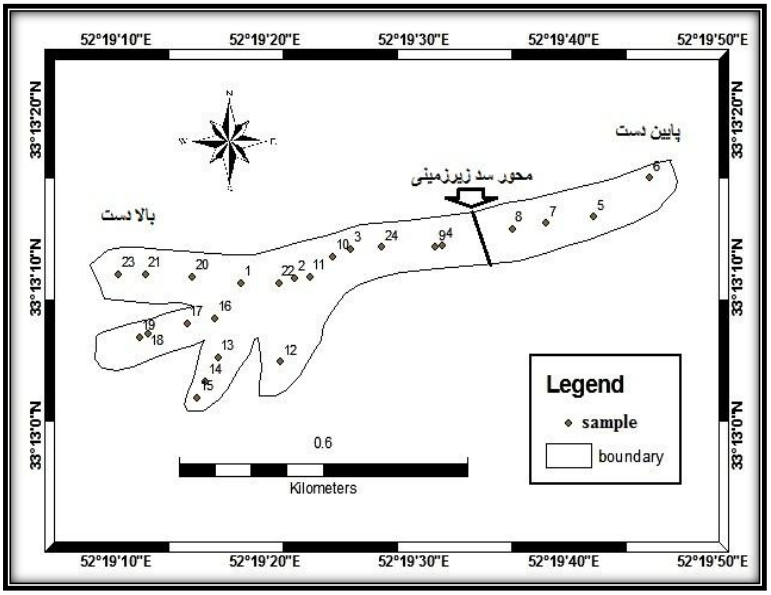
ب الف

شکل ٤. الف) موقعیت چاهک‌های حفاری شده در محدودهٔ مخزن و نتایج آزمون نسبت پوکی در آن‌ها، ب) نمایی از رسوبات در چاهک‌ها

هم‌چنین در ۲٤ نقطه از سطح مخزن پس از کنار زدن قسمت‌های هوازده رویی (عمق ۰/۵ متر)، نمونه‌برداری شده که در شکل ۵ موقعیت این نقاط نشان داده شده است. این شکل در حقیقت نمایان‌گر آب‌راهه‌های واقع در بین ارتفاعات است که در صورت احداث سد زیرزمینی، آب در آبرفت‌های موجود در آن‌ها ذخیره می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]



شکل ۵. موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده از سطح مخزن

در ادامه با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی این نمونه‌ها اقدام به تهیهٔ نقشهٔ سطحی شده است. این نقشه‌های سطحی با استفاده از امکانات رایانه‌ای و نیز به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) که ابزاری برای جمع‌آوری، مدیریت، تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات زمینی است، به‌روش ژئواستاتیستیکال (زمین آماری[۱]) تهیه شده است. از ویژگی مهم تکنیک میان‌یابی به طریق ژئواستاتیستیک این است که می‌توان با جمع‌آوری داده‌های کم‌تر نقشه‌هایی با دقت منطقی تهیه کرد. در این روش با استفاده از متد درون‌یابی[۲] و با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به برآورد مقادیر، در نقاطی که فاقد نمونه هستند اقدام و اطلاعات نقطه‌ای را به اطلاعات سطحی تبدیل کرد. نقشه‌های تهیه شده به این روش علاوه بر کاربرد ساده آن دارای اطلاعات مفید از رسوبات منطقه هستند [۱۲]، [۱۳].

در این پژوهش برای برآورد میزان مقاومت و تراکم مواد پوششی و مصالح خاکی موجود در محل سد زیرزمینی ماست‌بندی از آزمون برش مستقیم و نفوذ استاندارد (SPT) استفاده شده است.

۱. Geostatistical ۲. Interpolation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

آزمون برش مستقیم از آزمون‌های مهم خاک در مسائل مربوط به طراحی ساخت سدها است که برای تعیین خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک و مشخص کردن پارامترهای مقاومت برشی آبرفت‌های مخزن سد استفاده می‌شود و آزمون نفوذ استاندارد نیز ویژگی‌هایی نظیر مقدار φ (زاویهٔ اصطکاک داخلی) در خاک‌های دانه‌ای و c (چسبندگی) در خاک‌های چسبنده را برآورد می‌کند.

در این منطقه پس از اجرای سد زیرزمینی و افزایش سطح آب در پشت دیواره، از رسوبات منطقه باربرداری شده و با برداشت آب و تخلیه مخزن، مجددا بارگذاری می‌گردد. به‌طوری‌که با خارج شدن آب فشار آب منفذی کاهش یافته و تنش مؤثر افزایش می‌یابد. با بالا رفتن میزان تنش مؤثر انتظار می‌رود آرایش اجزای خاک به‌هم خورده و تجدید آرایش اجزای خاک باعث متراکم شدن و در نتیجه نشست خاک گردد. بنا بر این تخلیه مخزن می‌تواند، فضاهای خالی را کاهش داده و از میزان ضریب آب‌گذری و هم‌چنین حجم ذخیره آب بکاهد. در این پژوهش میزان نشست (S) در مخزن با استفاده از رابطه نشست آنی خاک (رابطهٔ ۱) محاسبه شده است. بدین‌منظور پارامترهای مکانیکی به‌دست آمده از آزمون‌های فوق‌الذکر با جدول‌های موجود مقایسه شدده و مقادیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسان و... تعیین شده است. سپس با توجه به این مقادیر میزان نشست در اثر افت سطح آب به‌دست آمده است:

$$\Delta H = S = qB\frac{(1-\mu^2)}{E}I_P \qquad (1)$$

μ= نسبت پواسان خاک

E= مدول الاستیسیته

q= فشار تماسی که با توجه به γ_d و ارتفاع خاک به‌دست می‌آید

I_P= ضریب تأثیر

B= عرض موقعیت

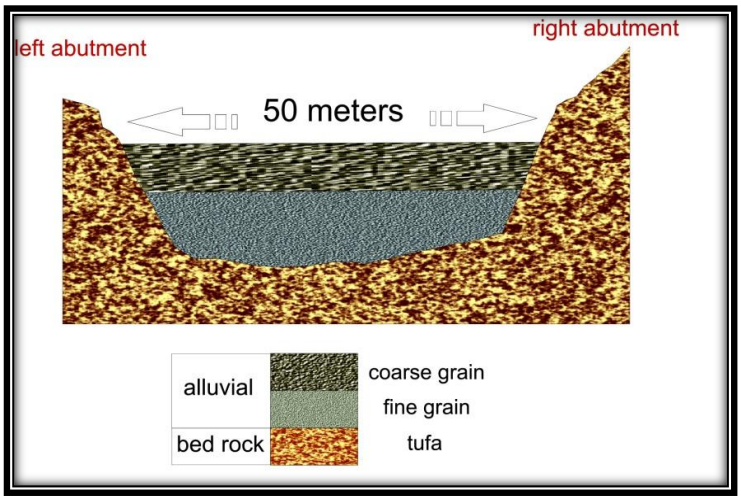
بررسی ضخامت آبرفت و وضعیت سنگ بستر

چنان‌که اشاره شد در این منطقه با استفاده از روش ژئوفیزیکی و حفر گمانه، عمق آب زیرزمینی، ضخامت آبرفت و تغییرات آن به‌دست آمده است. در شکل ٦ نمای شماتیک از محور این سد با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از پژوهش‌های ژئوالکتریک ترسیم شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

است. چنان‌که در تصویر مشاهده می‌شود در منطقه دو نوع آبرفت دانه‌ریز و دانه‌درشت وجود دارد که سطح آب زیرزمینی منطبق بر حدفاصل این دو لایه است. عمق پی سنگ در محل محور حدود ۷ متر است و عرض آن در محل انتخابی ۵۰ متر است. به‌طورکلی ضخامت آبرفت در این روش بین ۱۲–۵ متر تعیین شده است.



شکل ٦. نمایی از رسوبات در محل محور با توجه به نتایج به‌دست آمده از ژئوالکتریک

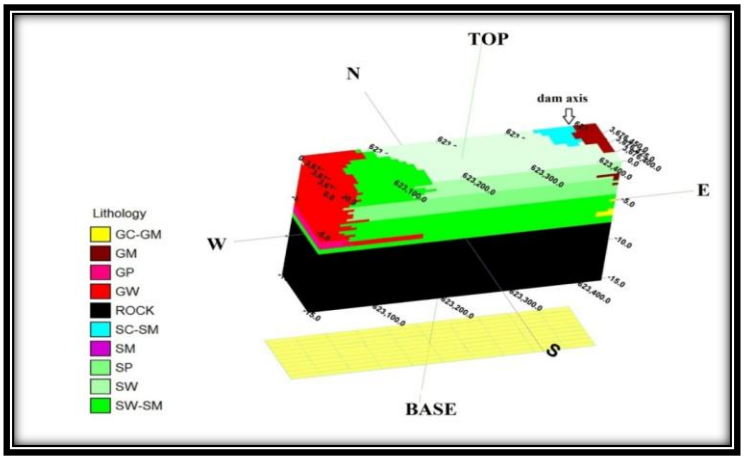
ضخامت آبرفت (عمق سنگ کف) در گمانه‌های حفاری شده برابر۹–٦ متر است که ضخامت به‌دست آمده به روش ژئوفیزیکی را تأیید می‌کند. هم‌چنین بررسی نمونه‌های سنگی به‌دست آمده از گمانه ($BH_۲$) نشان می‌دهد، سنگ بستر در محل محور از جنس توف ماسه‌ای و توف برشی با کیفیت مقاومتی ضعیف تا متوسط و حاوی شکستگی‌های تقریباً باز است. هم‌چنین بررسی درصد مغزه بازیافتی نشان می‌دهد تا عمق ٤ متری سطح سنگ بستر از خرده سنگ‌های هوازده تشکیل یافته است. باید توجه داشت که عدم برداشت این مواد سنگی خرد شده در موقع حفر ترانشه برای احداث سد زیرزمینی منجر به فرار آب از زیر بدنه سد و در نتیجه کاهش سطح آب در مخزن می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی آبرفت‌های مخزن

آزمون دانه‌بندی در گمانه‌ها و چاهک‌ها نشان‌دهندهٔ خاک غیر یک‌نواخت با درصد ریزدانه کم است. با توجه به نتایج این آزمون، ریزدانه رسی تنها در گمانه واقع در محل محور مشاهده گردید، از این رو آزمون حدود آتربرگ تنها در نمونه‌های به‌دست آمده از این گمانه انجام گرفت. مقدار شاخص خمیری و حد روانی به‌دست آمده حاکی از خاصیت خمیری کم این خاک داشته و آن را در گروه خاک‌های ماسه‌ای سیلتی و رسی با خاصیت خمیری کم قرار می‌دهد. شکل ۷ بلوک دیاگرامی از وضعیت دانه‌بندی رسوبات مخزن سد را که در محیط ()[۱] ترسیم شده، نشان می‌دهد.



شکل ۷. بلوک دیاگرام وضعیت دانه‌بندی رسوبات منطقه

چنان‌چه از تصویر بلوک دیاگرام منطقه برمی‌آید وسعت زیادی از مخزن با ذرات در اندازهٔ ماسه پوشیده شده است که با افزایش عمق، ماسه با دانه‌بندی یک‌نواخت جای‌گزین ماسه با دانه‌بندی غیریک‌نواخت می‌گردد. این مطلب می‌تواند علتی بر افزایش تخلخل رسوبات مخزن در این عمق باشد. هم‌چنین ذرات در اندازهٔ شن به‌سمت غرب افزایش داشته و عدسی‌های رسی به‌طور محدود به‌ویژه در نزدیکی محور سد به‌چشم می‌خورد.

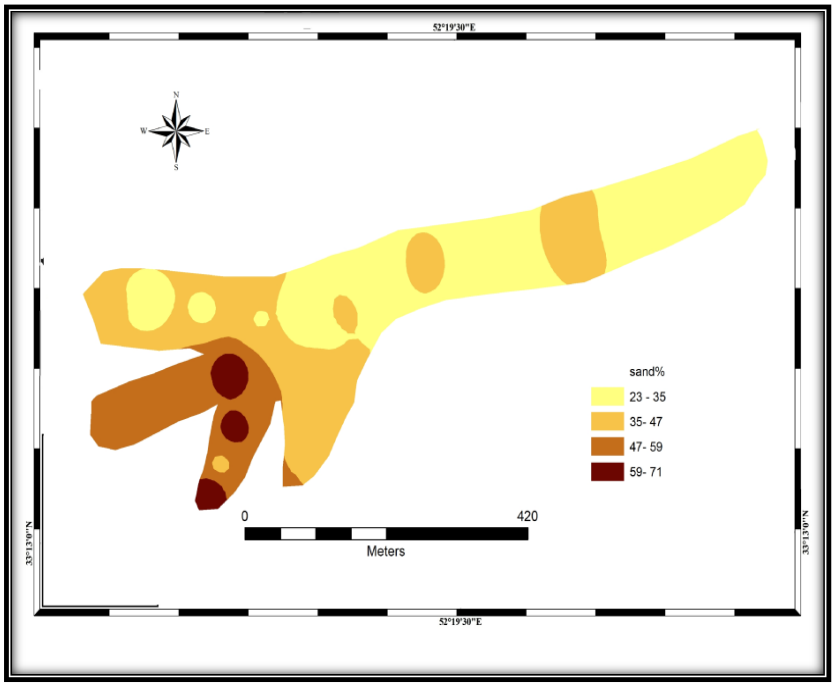
پس از مشخص شدن وضعیت دانه‌بندی رسوبات پوششی با تعیین درصد ذرات تشکیل دهنده مخزن (سیلت، گراول و ماسه) نقشه سطحی به روش ژئواستاتیستیک ارائه گردیده است.

۱. Rock Work

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

در این روش هر چه تعداد نقاط نمونه‌برداری با توزیع مناسب بیش‌تر باشد، دقت نقشه‌های حاصل بیش‌تر است. نتایج این بررسی‌ها حاکی از آن است که درصد ذرات ریزدانه در رسوبات پوششی سطح مخزن (درصد سیلت) بین ۱ تا ۸ و درصد دانه‌های گراول بین ۵۷– ۷ درصد متغیر است. این نقشه‌ها حاکی از دانه درشت بودن آبرفت‌های پوششی مخزن این سد زیرزمینی هستند، که بسته به شرایط رسوب‌گذاری درصد این ذرات دچار نوسان شده است. (شکل ۸) نقشهٔ سطحی از درصد ماسه موجود در سطح مخزن را نشان می‌دهد. این مقدار بین ۸٦–۳۵ درصد متغیر است و بسته به شرایط رسوب‌گذاری در قسمت‌های مختلف مخزن مقدار آن افزایش یا کاهش داشته است. با توجه به این شکل مقدار ماسه در محل محور کاهش یافته و به کم‌ترین مقدار خود رسیده است.



شکل ۸. نتایج آزمون دانه‌بندی در نمونه‌های سطحی (درصد ماسه)

به‌طورکلی با توجه به بررسی‌های انجام شده رسوبات مخزن به‌طور متناوب از شن و ماسه و به میزان کم‌تری سیلت تشکیل شده است. مقدار ریزدانه چسبنده در این رسوبات ناچیز و اکثر نمونه‌ها غیر پلاستیک (NP) است. بر اساس طبقه بندی یونیفاید (USGS) جنس این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

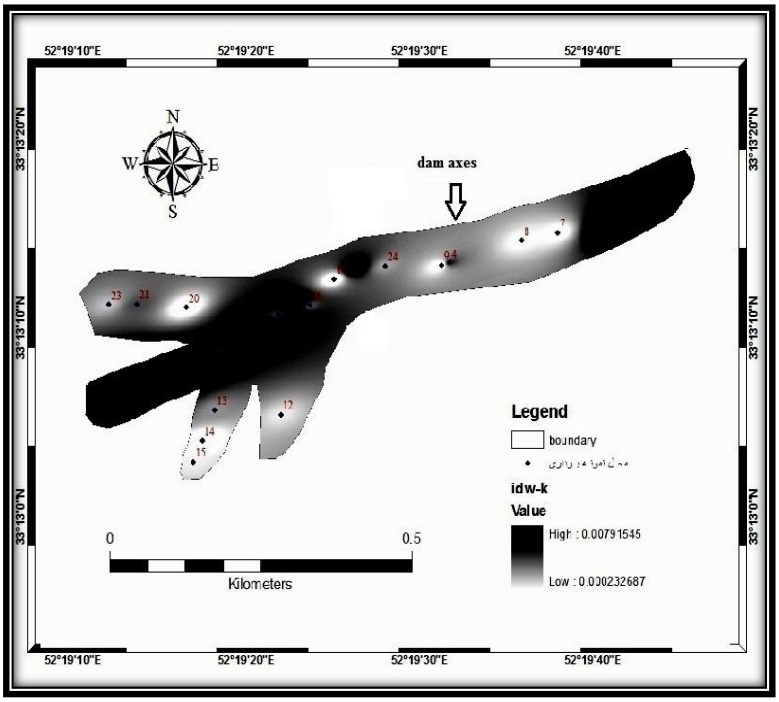
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

آبرفت‌ها از نوع خاک دانه‌ای و در محدوده‌های SC -SM، GM، SM، SW، SP، GW، GP و GC -GM است.به‌منظور تعیین و ارزیابی کلی از میزان نفوذپذیری مواد پوششی مخزن سد زیرزمینی ماست‌بندی، آزمون لوفران در داخل گمانه‌های موجود به‌روش بار آبی ثابت و متغیر (افتان) انجام گرفته است. با توجه به نفوذپذیری زیاد این خاک‌ها انجام آزمون صحرایی تعیین نفوذپذیری، تنها در دو گمانهٔ $BH_۲$ و $BH_۵$ میسرشده است و در سایرگمانه‌ها با توجه به مقدار فوق‌العاده زیاد آب مورد نیاز امکان تعیین نفوذپذیری وجود نداشته است. براساس نتایج آزمایش لوفران، نفوذپذیری نهشته‌های موجود بین $۱/۱\times۱۰^{-۳}$ تا $٦/٦\times۱۰^{-۲}$ (cm/sec) متغیر است که دلیل این تغییرات درصد ذرات ریزدانه داخل رسوبات و میزان یک‌نواختی ذرات تشکیل‌دهنده است. بنا بر این بر اساس نفوذپذیری به‌دست آمده این مواد در ردهٔ خاک‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد قرار می‌گیرند. به‌طورکلی عامل اصلی کنترل کننده میزان نفوذپذیری، وضعیت دانه‌بندی رسوبات است. با کاهش میزان یک‌نواختی مواد تشکیل‌دهنده و افزایش ذرات ریزتر از میزان نفوذپذیری کاسته می‌شود.

به‌علاوه نفوذپذیری آبرفت‌های تشکیل‌دهندهٔ مخزن به‌روش آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از چاهک‌ها و هم‌چنین ۲٤ نمونه سطحی تعیین شده است. قابل ذکر است به‌دلیل دانه‌درشت بودن نمونه‌های خاک از آزمون بار ثابت برای تعیین نفوذپذیری استفاده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در محیط GIS به‌روش ژئواستاتیستیکال یا زمین آماری درون‌یابی شده که نقشهٔ سطحی به‌دست آمده از آن در شکل ۹ به‌نمایش در آمده است. مقدار نفوذپذیری به‌دست آمده از این نمونه‌ها بین $۲/۳\times۱۰^{-٤}$ تا $۷/۹\times۱۰^{-۳}$ (cm/sec) نوسان داشته است. این نوسانات به‌علت تغییر رژیم رسوب‌گذاری و افزایش یا کاهش ذرات ریزدانه در محل مخزن است. به‌طورکلی بررسی نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها بیان‌گر نفوذپذیری بالای این آبرفت‌ها است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]



شکل ۹. نقشه نفوذپذیری آبرفت‌های سطح مخزن

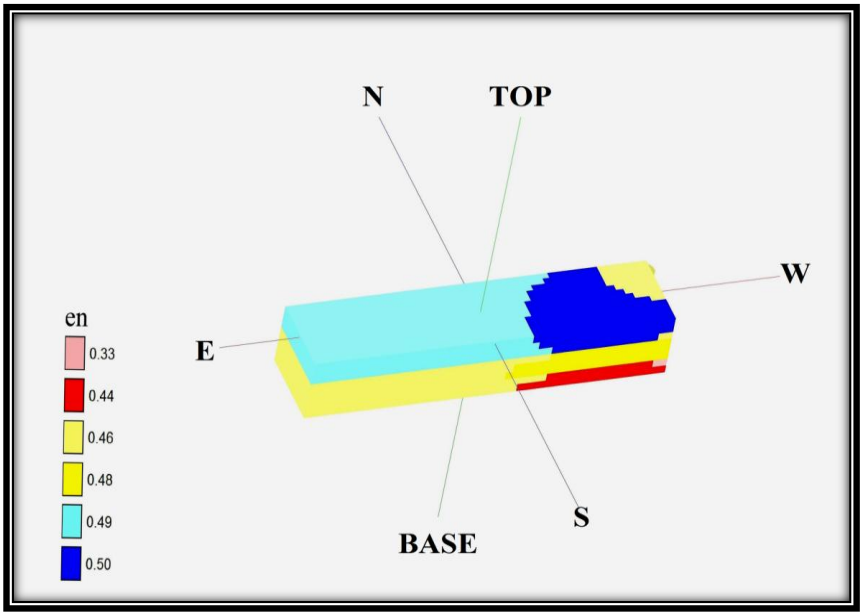
با توجه به این که اکثر محاسبات وزنی و حجمی نیازمند دانستن مقادیر وزن مخصوص ذرات جامد خاک است، آزمایش تعیین وزن مخصوص بر روی تمامی نمونه‌ها صورت گرفته است. با توجه به نتایج این آزمون، وزن مخصوص جامد رسوبات مخزن ۲/۷۲ الی ۲/۷۵ است. بررسی مقاطع نازک گرفته شده از آبرفت‌ها نشان می‌دهد، این آبرفت‌ها متشکل از خرده‌های آندزیت، بازالت، پیروکسن آندزیت، توف ریولیتی، میکرودیوریت، آندزیت تلوریتی، ماسه سنگ توفی با کانی‌هایی نظیر کوارتز، کلسیت، پیروکسن و پلاژیوکلاز است که وزن مخصوص به‌دست آمده در آزمایش‌هارا تائید می‌کند.

چنان‌که ذکر شد برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی آبرفت‌های مخزن علاوه بر موارد فوق آزمایش‌های نظیر تعیین دانسیته در محل، نسبت پوکی، میزان دانسیته حداقل و حداکثر و درصد رطوبت بر روی نمونه‌های به‌دست آمده از چاهک‌ها انجام یافته است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

با توجه به نتایج به‌دست آمده درصد رطوبت و وزن حجمی با افزایش عمق افزایش یافته و نسبت پوکی کاهش می‌یابد. هم‌چنین میزان دانسیته خشک در دو حالت حداقل و حداکثر به‌طور نامنظم و بدون الگوی خاصی، متأثر از رژیم رسوب‌گذاری افزایش یا کاهش نشان می‌دهد. قابل ذکر است درصد تخلخل بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۳ متغیر است که نشان‌دهندهٔ تخلخل مناسب رسوبات پوششی تشکیل‌دهندهٔ مخزن و قابلیت زیاد این رسوبات برای ذخیرهٔ آب است. وزن حجمی رسوبات (دانسیته) در محل چاهک‌ها به‌دست آمده و سپس با استفاده از روابط فازی موجود نسبت پوکی خاک در حالت طبیعی تعیین شده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. بلوک دیاگرام نسبت پوکی طبیعی در آبرفت‌های مخزن

نتایج بررسی نشان می‌دهد نسبت پوکی و در نتیجه تخلخل، به‌ویژه در نزدیکی محور سد با افزایش عمق کاهش یافته است. علت این نوسانات می‌تواند تغییر وضعیت رسوب‌گذاری در محدوده مخزن باشد. با توجه به این‌که محل محور در گلوگاه یا خروجی آب‌راهه واقع شده است، رسوبات در این قسمت تراکم بیش‌تری دارند. کاهش سرعت حفاری مشاهده شده ضمن حفر چاهک‌ها نیز می‌تواند دلیلی بر این موضوع باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

میزان مقاومت و تراکم مواد پوششی و مصالح خاکی موجود در محل سد زیرزمینی با استفاده از آزمون برش مستقیم و نفوذ استاندارد (SPT) تعیین شده که نتایج این بررسی‌ها در ادامه آمده است. مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و چسبندگی به‌دست آمده در حالت‌های مختلف آزمایش برش مستقیم در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش برش مستقیم [۱٤]

نام گمانه	عمق (m)	USGS	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kg/cm^2)	روش آزمایش
BH_2	۰-۳	SC-GM	۳۲	۰/۱۷	CD
BH_2	۳-٦	GC-GM	۳۷	۰/۰٦	CU
BH_2	۳-٦	GC-GM	۳۵	۰/۱۱	UU

برای احداث سد زیرزمینی هر چه زاویهٔ اصطکاک داخلی به‌دست آمده و چسبندگی خاک بیش‌تر باشد، برای حفر ترانشه می‌توان شیب حفاری را افزایش داد. افزایش شیب حفاری باعث کاهش حجم خاک‌برداری و در نتیجه کاهش هزینه پروژه می‌شود. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که این خاک تا عمق ٦ متر تقریباً فاقد چسبندگی است و تنها پارامتر مقاومتی آن اصطکاک بین دانه‌های خاک است. بنا بر این هنگام حفاری همواره امکان ناپایداری و ریزش دیواره وجود داشته و باید برای آن تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

نتایج آزمون نفوذ استاندارد بر روی رسوبات مخزن این سد زیرزمینی، نشان می‌دهد، اعداد به‌دست آمده (N) بجز عمق ۳- ۰ متر در گمانه‌های BH_3، BH_4 و BH_5 که مقدار بین ۵۰- ۳۰ دارد در دیگر موارد مقدار بیش‌تر از ۵۰ را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که دانسیته نسبی منطقهٔ بررسی شده بین ۸۵ الی ۱۰۰ درصد و در موارد معدودی بین ۸۵- ٦۵ درصد واقع است. از این رو، مقاومت فشاری تک‌محوری بیش‌تر از ٤۰ کیلو پاسکال است و این رسوبات در ردهٔ متراکم تا بسیار متراکم قرار می‌گیرند [۱۵]، [۱٦].

با توجه به نتایج آزمون SPT و مقایسه آن با جدول‌ها و نمودارهای ترسیمی موجود ظرفیت باربری مجاز این منطقه حداقل برابر ٤۳۰ kN/m^2 به‌دست می‌آید. این مقدار بیان‌گر مقاوم بودن این آبرفت‌ها در مقابل بارهای وارده است [۱۷].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

چنان‌که می‌دانیم طراحی یک فونداسیون ایمن تحت تأثیر عواملی نظیر گسیختگی برشی خاک و نشست اضافی است. با تعیین مقاومت برشی محدود شده خاک که با عنوان ظرفیت باربری نهایی، (q_u) معرفی شده است، می‌توان ایمنی سازه را مشخص کرد. ظرفیت باربری استفاده شده برای طراحی، نشان‌دهندهٔ دامنه و اندازهٔ نشست خاکی و تأثیر آن بر سازه است. ترزاقی بری تعیین ظرفیت باربری نهایی از رابطهٔ (۱) استفاده کرده است.

$$q_u = cNc + qNq + ۱/۲\gamma BN_\gamma \qquad (۲)$$

در این رابطه ضرایب N_c، N_q و N_γ (فاکتورهای اساسی برای محاسبه شکل پی، عمق و ...) با توجه به زاویهٔ اصطکاک به‌دست آمده از آزمون‌های فوق و مقایسهٔ با جدول ضرایب ظرفیت باربری ترزاقی به‌ترتیب برابر ٤٤/۰۳، ۲/۵۲/ و ۲۷/٤۹ به‌دست می‌آید. هم‌چنین B یا عرض پی برابر ۱ و q نیز با توجه به γ خاک و ارتفاع خاک روی دیواره برابر $kN/m^۳$ ۱۹ و متوسط چسبندگی خاک (c) ۱/۱ $kN/m^۲$ در نظر گرفته شده است.

بدین‌ترتیب مقدار ظرفیت باربری نهایی با توجه به این رابطه برابر $kN/m^۲$ ۷٦۰/۲ به‌دست می‌آید. این مقدار تقریباً دو برابر ظرفیت باربری مجاز منطقه است (نتایج آزمون SPT). بنا بر این در اثر بار وارده پس از احداث سازه در این منطقه، احتمال ایجاد گسیختگی خاک وجود نداشته و ضریب اطمینان در این شرایط برابر ۱/۸ است.

برآورد حجم مخزن و آب قابل ذخیره

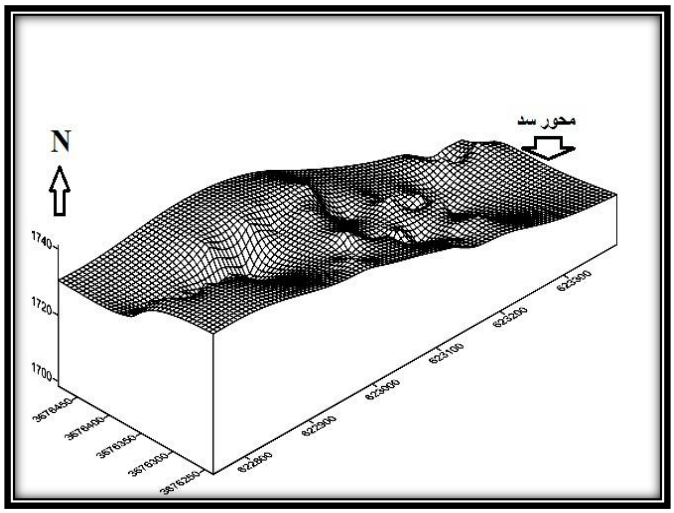
حجم کل این مخزن با نرم‌افزار سورفر[۱] ۹ به‌دست آمده است. بدین منظور دو فایل اکسل[۲] با محتوای سه ستون اطلاعاتی X، Y و Z (طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع نسبت به سطح دریا) از گمانه‌ها و سونداژهای الکتریکی، برای دو سطح فوقانی و تحتانی (ابتدا و انتهای گمانه‌ها) تهیه می‌شود. این نرم‌افزار با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر مقدار X ، Y و Z در هر دو سطح فوقانی و تحتانی معرفی شده است، مساحت و حجم مخزن را محاسبه می‌کند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، مساحت مخزن برابر ۱۵۰,۰۰۰ متر مربع و حجم آن در صورتی که تاج سد هم سطح زمین اجرا شود با توجه به ضخامت متوسط آبرفت‌ها برابر ٦۹۰,۰۰۰ متر مکعب است.

۱. Surfer ۲. Excel

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

با توجه به این‌که متوسط تخلخل در این رسوبات ۳۰ درصد است، حجم آب ذخیره شده در این مخزن زیرزمینی که از حاصل‌ضرب حجم کل مخزن در تخلخل موجود به‌دست می‌آید، حدود ۲۰۰,۰۰۰ متر مکعب خواهد بود. اجرای سد زیرزمینی هم سطح منجر به باتلاقی شدن زمین سطح مخزن می‌گردد. با توجه به پتانسیل زیاد منطقه برای اکتشاف معادن و هم‌چنین استفاده از این زمین‌ها به‌منظور کشاورزی، بهتر است تاج سد یک متر در زیر زمین قرار گیرد. در این حالت حجم آب ذخیره‌ای به حداکثر حدود ۵۰,۰۰۰ متر مکعب خواهد رسید. این کاهش حجم با توجه به‌وسعت اراضی پایین‌دست قابل توجیه است و از ارزش پروژه نخواهد کاست. شکل ۱۱ وضعیت سنگ بستر را با توجه به حفاری‌ها و بررسی‌های ژئوالکتریکی نشان می‌دهد. این تصویر در محیط سورفر ۹ تهیه شده است.



شکل ۱۱. مورفولوژی سنگ بستر در زیر مخزن سد زیرزمینی ماست‌بندی (تهیه شده در محیط سورفر) با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌ها

برآورد میزان نشست آبرفت‌ها

ذرات تشکیل‌دهندهٔ مخزن این سد زیرزمینی بیش‌تر از نوع ماسه و گراول و به‌میزان کم‌تری سیلت هستند، بنا بر این نشست صورت گرفته از نوع آنی است. با توجه به دانه‌ای بودن رسوبات بخش اعظم این نشست در زمان‌های قبل اتفاق افتاده و از این به بعد به نظر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

می‌رسد مقدار کمی از نشست محاسبه شده اتفاق بیفتد. بهر حال در ادامه با استفاده از رابطهٔ (۱) میزان نشست کلی (S) در مخزن محاسبه شده است. در این رابطه؛

μ=۰/۳، E = ۳۵۰۰ kN/m^{۲}، P = ۱۱٤ kN/m^{۲}، I_P = ۰/۵۵[۱۸]، B = ۱ (واحد سطح) در نظر گرفته شده و میزان نشست در حالتی که مخزن از آب تخلیه شده، برابر ۱٦ میلی‌متر به‌دست آمده است. این میزان نشست از نظر کاهش حجم آب قابل ذخیره و میزان نفوذپذیری، با توجه به جنس و ارتفاع آبرفت‌های موجود چندان مشکل ساز نیست. هم‌چنین با توجه به این‌که بخش اعظم این نشست در قبل اتفاق افتاده، حتی در صورت اجرای سد آبرفتی که بدنه بر روی سطح زمین قرار می‌گیرد، در اثر نشست خطر ایجاد ترک، سازه را تهدید نمی‌کند. بهتر است برای جلوگیری از این مسئلهٔ احتمالی و هم‌چنین جلوگیری از فرار آب از زیر بدنه، دیواره بر روی پی سنگ سالم اجرا شود. بدین‌منظور لازم است تمامی آبرفت‌های محدودهٔ محور تا رسیدن به سنگ کف سالم برداشت شده و پس از اجرای سد مجدداً با این مواد پر شود.

نتیجه‌گیری

احداث سدهای زیرزمینی از روش‌های ساده و نوین ذخیره‌سازی منابع آب زیرزمینی از طریق ایجاد سد در مسیر آب زیرزمینی است. از مسائل مهمی که در اجرای سدهای زیرزمینی باید به آن توجه شود، بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی آبرفت‌ها است. بررسی خصوصیات فیزیکی آبرفت‌های مخزن سد زیرزمینی ماست‌بندی حاکی از آن است که این آبرفت‌ها از نوع خاک دانه‌ای متراکم و غیر یکنواخت با خاصیت غیرخمیری هستند. ساختمان ذرات خاک نسبت به هم‌دیگر و عدم وجود ذرات ریزدانه رس باعث افزایش تخلخل مؤثر در نهشته‌های موجود شده است. نتایج آزمون لوفران تاییدی بر این مطلب است و این رسوبات از نظر نفوذپذیری در ردهٔ خاک‌های با نفوذپذیری متوسط تا زیاد قرار می‌گیرند. با توجه به خصوصیات آبرفت‌های پوششی مخزن، این محدوده در صورت وجود نزولات جوی پتانسیل زیادی برای ایجاد سفرهٔ آب‌دار با ضریب آب‌گذری مناسب برای استحصال آب دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

حجم کل این مخزن در صورتی که تاج سد هم سطح زمین اجرا شود برابر ٦۹۰۰۰۰ متر مکعب است. با توجه به تخلخل ۳۰ درصدی این رسوبات، حجم آب ذخیره شده در این مخزن زیرزمینی حدود ۲۰۰۰۰۰ متر مکعب خواهد بود. در حالتی که تاج سد زیرزمینی یک متر در زیر زمین قرار گیرد، حجم آب ذخیره‌ای به حداکثر ۵۰۰۰۰ متر مکعب خواهد رسید. این کاهش حجم با توجه به‌وسعت اراضی پایین دست قابل توجیه است و از ارزش پروژه نخواهد کاست.

بررسی پارامترهای مکانیکی نشان می‌دهد این رسوبات در ردهٔ متراکم تا بسیار متراکم با دانسیتهٔ نسبی بالا قرار می‌گیرند. بنا بر این امکان فشرده شدن و کاهش حجم در این آبرفت‌ها کم و ظرفیت باربری این رسوبات زیاد است. به‌طوری‌که مقدار ظرفیت باربری نهایی برابر ۷٦۰/۲ KN/m^2 و ظرفیت باربری مجاز برابر ٤۳۰ KN/m^2 به‌دست آمد.

با توجه به این‌که این ذرات بیش‌تر از نوع ماسه و گراول و به‌میزان کم‌تری سیلت هستند، نشست صورت گرفته در آبرفت‌های مخزن از نوع آنی و غیرماندگار است. با در نظر گرفتن وزن حجمی خشک خاک و پارامترهای مکانیکی آن، میزان نشست در حالتی که ٦ متر از آب مخزن تخلیه شده است، برابر ۱٦ میلی‌متر است. این میزان نشست در اجرای بدنه نسبتاً زیاد و قابل توجه است و می‌تواند باعث ترک‌خوردگی و شکست سازه گردد. اما از نظر کاهش حجم آب قابل ذخیره و میزان نفوذپذیری، با توجه به جنس و ارتفاع آبرفت‌های موجود چندان مشکل ساز نیست. هم‌چنین این خاک تقریباً فاقد چسبندگی است و اصطکاک بین دانه‌های خاک تنها پارامتر مقاومتی است، از این رو، هنگام حفاری همواره امکان ناپایداری و ریزش دیواره وجود داشته و باید برای آن تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

منابع

1. Foster S., Azevedo G., Baltar A., "Subsurface dams to Augment ground water storage in basement terrain for human subsistence: Brazilian experience", Universidad Federal, vol. 82 (2002) 49-56.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

2. Hansson G., Nilsson A., "Groundwater dams for rural water supplies in developing countries", Ground Water, vol 24, no. 4 (1986) 497-506.
3. Ishida S., Fazal M. A., Ishida S., Imaizumi M., "Construction of subsurface dam and their impact on the environment", RMZ-Materials and Geoenvironment, vol 50 (2003) 149-152.
4. Nilsson A., "Siting of groundwater dams for rural water supply in developing countries- hydro geological and planning aspects, part 1: regional study in south India", The royal Institute of Technology, Stockholm (1987).
5. Onder H., Yilmaz M., "Underground dams a tool of sustainable development and management of groundwater resources", Publications Journal European Water, vol 11 (2005) 35-45.
6. Janardhana R. N., Munirathnam P., "Subsurface dams to harvest rainwater, A case study of the swarnamukhi river basin, Southern India", Department of Geology, Banaras Hindu University, no. 14 (2006) 526-531.
7. Nilsson A., "Groundwater dams for small- scale water supply, IT Publications, London (1988).
8. Dillon p., "Underground dam the way of the future", CSIRO Land and Water Association, Astralia, vol. 12 (2000).
9. Miyazaki K., Nawa N., "The analysis of saltwater intrusion through Komesu underground dam and water quality management for salinity", Geological Survey Techniques of Water- Resources Investigations, vol. 7 (2009) 71-82.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]

۱۰. افکار م. ر.، *مکان‌یابی سایت‌های مستعد احداث سد زیرزمینی در استان خراسان جنوبی با تأکید ویژه بر سایت ریخان بیرجند*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۹).

11. Yilmazin M., "Control of groundwater by underground dams, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University" (2003).

12. Oh H. J., Kim Y. S., Choi J. K., Parklee E. S., "GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang city", Korea, Journal of Hydrology, vol. 399 (2011) 158- 172.

13. Forzieri G., Gardenti M., Caparrini F., "A methodology for the pre-selection of suitable sites for surfaceand underground small dams in arid areas, A case study in the region of Kidal: Physics and Chemistry of the Earth", vol. 33 (2008) 74- 85.

۱٤. مهندسین شرکت محققین امین پژوه سپاهان، *گزارش مطالعات ژئوفیزیک و زمین‌شناسی مهندسی سد زیرزمینی ماست‌بندی*، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی (۱۳۸۹).

15. Das B. M., "Fundamentals of soil dynamic", Elsevier Science Publishing Co., NewYork (1984).

16. Meyerhof G. G., 1956, "Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesion less Soil", ASCEJ. Soil Mechanic, Foundation. Div., vol. 82 (1983).

17. Terzaghi K., "Theoretical Soil Mechanic, Wiley, New York (1943).

18. Steinbrenner W., "Tafeln zur Setzungsberechnung", Die Sh- asse, vol. 1 (1934).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.4.3.5]