

علمی - تخصصی

رفتارنگاری سد مخزنی هراز با استفاده از نتایج ابزار دقیق ژئوتکنیکی: مطالعه جامع ایمنی در دوران ساخت

سید مجید ایزدپرست^{۱*}، حبیب نیرومند، حسین اکبری، امیر کاظمی توسه، سعید شعرا

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ کارشناسی ارشد، مدیر فنی و برنامه ریزی شرکت مشاور ساحل امید ایرانیان

^۴ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

^۵ کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲)

چکیده

هدف از رفتارنگاری سدها، کنترل ایمنی، مقایسه عملکرد واقعی با پیش بینی‌های طراحی و دستیابی به تجربیات ارزشمند برای طراحی‌های آینده است. در این راستا، در تمام سدهای خاکی بزرگ، مقادیر فشارهای منفذی، تنش‌های توده خاک و تغییر شکل‌ها در طول دوران ساخت و بهره برداری با استفاده از ابزار دقیق اندازه‌گیری شده و عملکرد آن مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. در این مقاله نتایج ابزار نصب شده در سد هراز بررسی و عملکرد سازه و پایداری آن در دوران ساخت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سد مخزنی هراز که در شمال ایران بر روی رودخانه هراز در حال ساخت است، از نوع خاکی با هسته رسی و پوسته مخلوط (GC) می‌باشد. طول تاج سد ۳۷۳ متر، ارتفاع سد از پی ۱۵۰ متر، حجم مخزن ۲۳۰ میلیون متر مکعب، تراز تاج سد ۵۰۸ متر از سطح دریا و بستر رودخانه در محل محور سد دارای تراز ۳۸۶ متر از سطح دریا می‌باشد که ۸۰ متر از ارتفاع سد هراز تاکنون اجرا شده است. در این پژوهش به ارائه رفتارنگاری برای بررسی هم زمان اثر قوس زدگی و نشست بر بر پایه استانداردهای جهانی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که سد هراز با وجود شرایط خاص ژئوتکنیکی، در محدوده معیارهای متعارف سدهای مشابه در جهان است. این یافته‌ها می‌تواند در طراحی و رفتارنگاری سدهای آینده نقش کلیدی ایفا کند.

کلید واژه‌ها: سد سنگریزه‌ای، ارزیابی ایمنی، سد مخزنی هراز، فشار منفذی، نشست.

۱. مقدمه

واقعی سد می‌باشد. از این رو بررسی نتایج بدست آمده از ابزار دقیق به کار رفته در سد و مقایسه نتایج بدست آمده از آن با فرضیات اولیه مربوط به طراحی سد، روش مناسبی برای رفتارنگاری سد می‌باشد [۱].

پایداری و ایمنی سدها، علاوه بر روش‌های طراحی و ساخت، به طور قابل توجهی به رفتارسنجی عملکرد آن‌ها در طول دوره‌های ساخت و بهره‌برداری وابسته است. تحقیقات نشان در طول فرآیند ساخت و یا در دوره آغازین بهره‌برداری رخ

بازرسی پیوسته در مورد عملکرد سدها مخصوصاً سدهای خاکی، نه تنها از دیدگاه پیشرفت شناخت رفتار بخش‌های مختلف سد اهمیت دارد بلکه از دیدگاه ایمنی و رفع نواقص احتمالی و کمک به مهار شدن پدیده‌هایی که ممکن است موجب تخریب سد گردد از اهمیت حیاتی برخوردار است. ابزار دقیق به همراه بازدیدهای منظم چشمی بهترین وسیله برای بدست آوردن رفتار می‌دهد که در سدهای خاکی، بیشترین خسارت‌ها و آسیب‌ها

و ارائه مدلی برای بررسی هم‌زمان اثرات فشار آب حفره‌ای، نشست و قوس‌زدگی است. سد هراز به‌عنوان یکی از سدهای خاکی بزرگ ایران با شرایط ژئوتکنیکی پیچیده، که تاکنون در ادبیات پیشین مطالعاتی زمینه رفتارنگاری آن انجام نشده است، بستری مناسب برای این تحلیل‌ها فراهم می‌آورد.

۲. اهداف ابزاربندی و رفتارنگاری سدها

در جهت دستیابی به اهداف ابزاربندی و رفتارنگاری سدها، اهمیت بسیار زیادی به مشاهده و ثبت رفتار سدهای خاکی طی مراحل ساخت و در دوران بهره‌برداری داده می‌شود. بنابراین، ابزارها و وسایل مناسبی در پی تکیه‌گاههای جانبی بدنه و سازه‌های جانبی سد نصب و داده‌های حاصل شده به صورت مستمر تجزیه و تحلیل می‌شوند. این داده‌های ثبت شده می‌توانند توسط طراحان سد و مسئولان بهره‌برداری استفاده شوند و در صورت وجود احتمال وقوع خطر، هشدار لازم را جهت پیشگیری به مسئولان اعلام کنند. وجود این اطلاعات علاوه بر ارزیابی رفتار فعلی سد، ارزیابی صحت پارامترهای پیش‌بینی شده در مرحله طراحی را ممکن می‌سازد و مبنای علمی دقیق‌تری را برای طراحی سازه‌های آینده در اختیار طراحان و مهندسان قرار می‌دهد.

اهدافی که سیستم ابزاربندی دنبال می‌کند عبارتند از:

۱. کنترل صحت فرضیات طراحی.
۲. بررسی عملکرد و رفتار سد و اطمینان از قابل پذیرش بودن رفتار آن.
۳. ارزیابی عملیات اجرایی و ساخت سد.
۴. ارزیابی رفتار سد در زمان اولین آبیگری آن.
۵. پیش‌بینی و تعیین پدیده‌های مخرب در طول بهره‌برداری.
۶. کنترل و جلوگیری از رشد پدیده‌های منفی در پایداری سد.
۷. جلوگیری و یا کاهش صدمات جانی و مالی احتمالی.
۸. اخذ اطلاعات درباره رفتار سد جهت ارائه معیارهای دقیق‌تر برای طراحی‌های مشابه آینده.
۹. تجزیه و تحلیل خطرپذیری.

می‌دهد. در طول فرآیند ساخت، پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح سد و بستر آن، از جمله تنش کل، تنش مؤثر، فشار آب منفذی، و کرنش ناشی از عوامل مختلف مانند حرکات پی، تحکیم مصالح هسته، و تغییرات رطوبت مصالح، به طور مداوم تغییر می‌کنند، که منجر به لزوم رفتارسنجی دقیق سدها می‌شود. این روش‌ها علاوه بر ارزیابی پارامترهای طراحی، کاهش ریسک و کنترل کیفیت در طول فرآیند ساخت، به بررسی دقیق پایداری در طول دوره‌های بهره‌برداری، کوتاه‌مدت و بلندمدت، می‌پردازند [۲].

به منظور افزایش پایداری هیدرولیکی سد خاکی LG در شمال شهر کبک در کانادا، در طول دوره ساخت، اولین آبیگری و بهره‌برداری، فعالیت‌های رفتارنگاری صورت گرفته است. این سد با ارتفاع ۱۲۵ متر و طول تاج ۳۸۰۰ متر، از جمله سدهای بزرگ و مهم می‌باشد. ابزار دقیقی که در این سد استفاده شده است شامل انحراف‌سنج، نشست‌سنج، سلول فشار کل، پیزومتر، و کشیدگی‌سنج می‌باشد. این ابزارها از اهمیت بسزایی برخوردارند زیرا به‌طور مداوم رفتار و عملکرد سد را کنترل و نظارت می‌کنند. استفاده از این ابزارها در سدهای خاکی در سراسر جهان، از جمله سدهای بزرگ، به منظور ارتقاء ایمنی و پایداری آن‌ها، بسیار رایج است [۳].

حجت انصاری و همکاران، دقت داده‌های تنش اندازه‌گیری شده توسط سلول‌های فشار کل نصب شده در سد گتوند با ارتفاع ۱۸۰ متر، عرض تاج ۱۷ متر و طول تاج ۷۶۰ متر از نظر شرایط سازگاری تنش با استفاده از فرضیات مختلف مورد بررسی قرار دادند؛ همچنین، آن‌ها عواملی که بر دقت سلول‌های فشار کل تأثیر گذارند از جمله ویژگی‌های خاک اطراف و تکنیک‌های نصب را مورد ارزیابی قرار دادند [۴].

نریمانی و همکاران با استفاده از داده‌های ابزاردقیق و تحلیل برگشتی به پیش‌بینی پایداری هیدرومکانیکی سد ستارخان پرداختند و فشار منفذی و نشست آن در بخش‌های مختلف سد ستارخان را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها سناریوهای تخلیه سریع مخزن را نیز مورد مطالعه قرار دادند [۵].

این تحقیق به بررسی فشار آب حفره‌ای، قوس‌زدگی و نشست که از جمله پارامترهای کلیدی سد محسوب می‌شوند، پرداخته است. درحالی‌که مطالعات متعددی در خصوص رفتارنگاری سدهای بزرگ انجام شده است، تحلیل هم‌زمان این پارامترها کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف این پژوهش، تحلیل جامع داده‌های ابزار دقیق سد هراز

۳. پروژه مورد مطالعه

۳-۱. معرفی سد هراز

سد مخزنی هراز در کشور ایران و در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شهر آمل، روی رودخانه هراز واقع شده است. سد مخزنی هراز از نوع خاکی با هسته رسی و مخلوط (GC) می‌باشد. طول تاج سد ۳۷۳ متر، ارتفاع سد از پی ۱۵۰ متر، حجم مخزن ۲۳۰ میلیون متر مکعب، تراز تاج سد ۵۰۸ متر از سطح دریا و بستر رودخانه در محل محور سد دارای تراز ۳۸۶ متر از سطح دریا می‌باشد.



شکل (۱). ساختگاه و اجزاء وابسته سد مخزنی هراز.

۳-۲. شرایط زمین شناسی طرح

سنگ بستر بخش اعظم مخزن سد، که حدود ۸۰ درصد آن را تشکیل می‌دهد، شامل سنگ‌های شیلی، ماسه سنگی، سیلتستونی، آهک مارنی و دولومیتی متعلق به سازندهای دورود، روته و نسن به سن پرمین هستند. بخش ابتدایی آن نیز، حدود ۲۰ درصد، شامل سنگ‌های آهکی، دولومیتی، آهک مارنی و شیل است که متعلق به سازند الیکا زیرین و به سن تریاس زیرین می‌باشند.

با توجه به وضعیت هیدروژئولوژیکی سنگ بستر، تنوع در سنگ‌شناسی واحدهای سنگی مختلف تفاوت‌هایی از دیدگاه تراوایی و آبگذری ایجاد کرده است. سازند الیکا، که به عنوان مهمترین واحد سنگی در ساختگاه و محدوده ابتدایی مخزن شناخته می‌شود، به دلیل تغییرات سریع لیتولوژیکی، به لحاظ رفتار هیدروژئولوژیکی همگن نیست. این ناهمگنی در حفاری‌های گمانه‌های اکتشافی محدوده ساختگاه سد نیز به خوبی مشاهده شده است.

میزان نفوذپذیری، در جهت عمق، پس از عبور از سنگ‌های آهکی و دولومیتی بالایی و رسیدن به لایه‌های زیرین سازند مذکور، که شامل سنگ‌های مارنی و شیلی است، به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. نفوذپذیری سنگ‌های مربوط به سازندهای پرمین (دورود، روته و نسن) عموماً در حد متوسط تا کم است. در این مجموعه

سنگ‌ها، شکستگی‌ها و خردشدگی‌های توده سنگ عموماً سطحی است و میزان نفوذپذیری، در جهت عمق، به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۳-۳. مقاطع ابزاربندی سد هراز

برای کنترل و بررسی رفتار سد در حین ساخت، آگیری و زمان بهره‌برداری هفت مقطع ابزاربندی به نام‌های ۲-۲، ۴-۴، ۶-۶، ۸-۸، ۱۰-۱۰، ۱۲-۱۲ و ۱۴-۱۴ در طول بدنه سد هراز تعریف شده است.

۳-۴. مشخصات کلی مقاطع ابزاربندی

برپایه اطلاعات ارائه شده در جدول ۱، در مجموع ۲۵۴ ابزار در بدنه سد نصب می‌گردد. بیشترین تعداد این ابزارها در مقطع ۸-۸ نصب شده‌اند، مقطع ابزاربندی ۸-۸ در شکل ۲ قابل مشاهده است.

جدول (۱). مشخصات کلی مقاطع ابزاربندی بدنه سد هراز.

ردیف	نام مقطع	فاصله از مبدا (km)	تعداد کل ابزار
۱	۲-۲	۶۶.۵	۲۰
۲	۴-۴	۱۱۶.۵	۳۶
۳	۶-۶	۱۶۶.۵	۴۸
۴	۸-۸	۲۱۶.۵	۵۹
۵	۱۰-۱۰	۲۶۶.۵	۵۲
۶	۱۲-۱۲	۳۱۶.۵	۲۶
۷	۱۴-۱۴	۳۶۶.۵	۱۳



شکل (۲). مقطع ابزاربندی ۸-۸.

۴. رفتارنگاری داده ها

رفتارنگاری سدهای خاکی عموماً بر پایه سه محور اساسی: فشارهای پیژومتری و نشست، توزیع تنش در بدنه سد و تغییر شکل‌های بدنه سد به انجام می‌رسد. بسته به هر مورد خاص ممکن است تجهیزات رفتارسنجی متفاوتی برای اندازه‌گیری این پارامترها به کار رفته باشد.

رفتارنگاری سدهای خاکی اغلب بر اساس سه محور اساسی، شامل فشارهای پیژومتری، نشست، و تغییرات شکل بدنه سد، انجام می‌شود. در مورد مقطع ۸۸ که بزرگترین و حساس‌ترین مقطع سد هراز است، در کیلومتر ۲۱۶.۵ واقع شده است. بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۱، در این مقطع، مجموعاً ۶۸ ابزار برای نصب طراحی شده است. این ابزارها شامل ۲۷ عدد سلول فشارسنج، ۲۲ عدد پیژومتر خاک، ۱۶ عدد پیژومتر سنگ، ۵ عدد پیژومتر لوله قائم، ۴ عدد سیستم ترکیبی انحراف سنج - نشست سنج، و ۸ عدد پیلار نقشه‌برداری می‌باشد.

۴-۱. بررسی تنش و قوس‌زدگی در بدنه سد

برای اولین بار، لافکویست در سال ۱۹۵۱ وجود و اهمیت پدیده قوس‌زدگی و یا انتقال تنش در سدهای سنگریزه‌ای را گزارش داده است [۶]. یکی از مسائل مشکل‌ساز در سدهای خاکی غیرهمگن، پدیده قوس‌زدگی در هسته است که باید در مراحل اولیه طراحی مورد بررسی قرار گیرد. در سدهای خاکی غیرهمگن، نشست هسته معمولاً بیشتر از نشست پوسته است، این موضوع به دلیل تفاوت در ویژگی‌های مصالح در هسته و پوسته رخ می‌دهد. هسته در هنگام نشست به پوسته فشار اعمال کرده و پوسته در حکم تکیه‌گاهی برای هسته رفتار می‌کند، در نتیجه، مقداری از تنش هسته به پوسته منتقل می‌شود و از تنش موجود در هسته کاسته می‌شود. پدیده قوس‌زدگی که همان انتقال فشار می‌باشد، شکست هیدرولیکی را به ویژه در زمان آگیری نشان می‌دهد.

برای به دست آوردن میزان قوس‌زدگی از ضریبی به نام ضریب قوس‌زدگی استفاده می‌شود که برابر است با:

$$A.C = \frac{\sigma_v}{\gamma \cdot h}$$

که در آن A.C: ضریب قوس‌زدگی

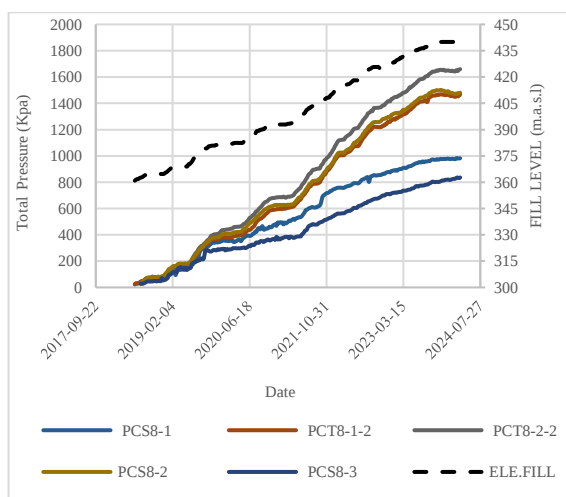
σ_v : تنش قائم در داخل هسته

γ : وزن مخصوص، h: ارتفاع خاکریزی می‌باشد.

در سد هراز برای محاسبه ضریب قوس‌زدگی و ضریب فشار آب منفذی وزن مخصوص مصالح بدنه سد بشرح زیر می‌باشد:

- وزن مخصوص مصالح هسته رسی: ۲۰۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب
- وزن مخصوص مصالح پوسته (سنگریزه): ۲۴۵۰ کیلو گرم بر متر مکعب
- وزن مخصوص مصالح فیلتر و زهکش: ۱۹۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب

هر چه مقدار ضریب قوس‌زدگی کوچکتر باشد، نشانگر عدم انتقال تنش حاصل از خاکریز به طبقات پایین است و مقادیر بزرگتر ناشی از انتقال وزن لایه‌های بالایی به بخش‌های زیرین است. مقادیر ضریب قوس‌زدگی بیشتر از ۱ مبین انتقال بار از سایر بخش‌ها به نقطه اندازه‌گیری تنش می‌باشد. به دلیل تفاوت مشخصات مصالح هسته و پوسته، تنش از هسته به پوسته منتقل شده و قوس‌زدگی کلی رخ می‌دهد. همچنین، به دلیل تفاوت مشخصات مکانیکی مصالح ترانشه، نصب سلول فشار نسبت به هسته، پدیده قوس‌زدگی موضعی را ایجاد می‌کند، که باعث می‌شود سلول فشار کل تنش کمتری را نسبت به واقعیت قرائت کند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، فشار کل با افزوده شدن سربار ناشی از خاکریزی بدنه افزایش می‌یابد. آخرین فشار کل ثبت شده در این تراز در مرکز هسته ابزار (۲-۸-۲-۸) PCT می‌باشد که به میزان ۱۶۵۵ کیلوپاسکال می‌باشد.



شکل (۳). نمودار تغییرات فشار کل برای سلول‌های فشار افقی برحسب زمان (مقطع ۸-۸)

در زمان افزایش فشار آب حفره‌ای، از ابزارهای مکانیکی مانند پی پیزومتر کاساگرانده نیز برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. این ابزار به دلیل تجمع آب در ناحیه فیلتری خود، در زمان افزایش فشار آب حفره‌ای، به زمان بیشتری برای زهکشی آب نیاز دارد. از طرفی، در زمان کاهش فشار آب حفره‌ای، عملکرد مناسب و به موقعی از خود نشان نمی‌دهد، زیرا زهکشی آب از داخل مصالح رسی به دلیل زمان‌بر بودن این فرآیند، به‌طور کامل انجام نمی‌شود.

در مرحله احداث سدهای خاکی، موضوع فشار آب حفره‌ای از جمله مسائل مهمی است که توسط پژوهشگران و طراحان مورد توجه قرار می‌گیرد. این فشار آب موجود در خاک می‌تواند ایمنی و پایداری سد را تحت تأثیر قرار دهد و به همین دلیل، دانستن مقدار آن در بررسی و تخمین و افزایش پایداری بدنه سد ضروری است.

در این مرحله از ساخت سد، فشار آب مربوط به آب مخزن سد و حرکت زه نیست، بلکه مربوط به شرایط تراکم خاک و وجود آبهای درون منافذ خاک در هنگام احداث سد می‌باشد. در این حالت، وضعیت خاک اشباع کامل نیست، بنابراین بررسی فشار آب حفره‌ای در این شرایط به حالت غیر اشباع خاک وابسته است.

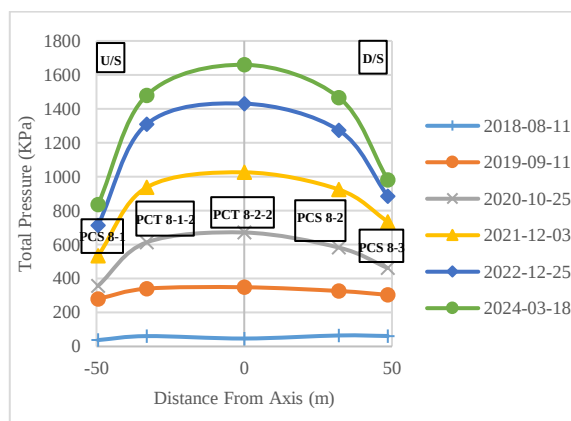
برای اندازه‌گیری ضریب فشار آب حفره‌ای برای حالت واقعی، از فرمول زیر استفاده شده است:

$$Ru = \frac{P}{\sigma}$$

که در آن: P : فشار آب اندازه‌گیری شده توسط پیزومتر و σ : تنش اندازه‌گیری شده توسط سلول فشار کل می‌باشند. همچنین برای اندازه‌گیری ضریب فشار آب حفره‌ای برای حالت تئوریک از فرمول زیر استفاده شده است:

$$Rut = \frac{P}{\sum \gamma \cdot h}$$

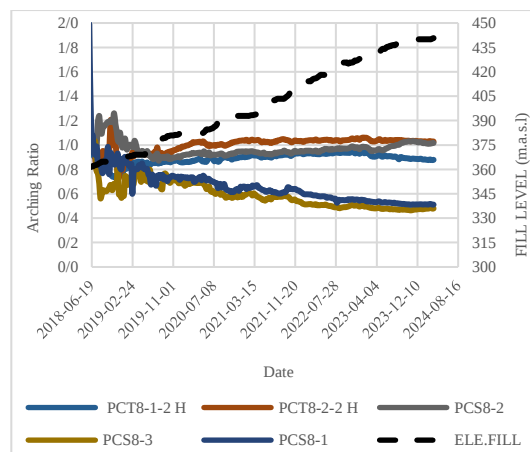
که در آن: P : فشار آب اندازه‌گیری شده توسط پیزومتر، γ : وزن مخصوص مرطوب خاک و h : ضخامت خاکریز روی پیزومتر می‌باشند. ضریب فشار آب حفره‌ای از طریق پیزومتر الکتریکی خاک (EP) و فشار سلول خاک که در مجاور هم نصب شده‌اند، مطابق روابط بالا بدست می‌آید.



شکل (۴). تغییرات فشار کل در مقابل فاصله از محور سد هراز

در مقطع ۸-۸

در شکل ۵، ضریب قوس زدگی در ناحیه هسته نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به مقادیر محاسبه شده، حداقل ضریب قوس زدگی که بیانگر بیشترین میزان قوس زدگی (Arching) می‌باشد، مربوط به ابزار ۱-۲ PCT8 در تراز ۳۶۰ و برابر ۰.۴۸۰ محاسبه شده است.



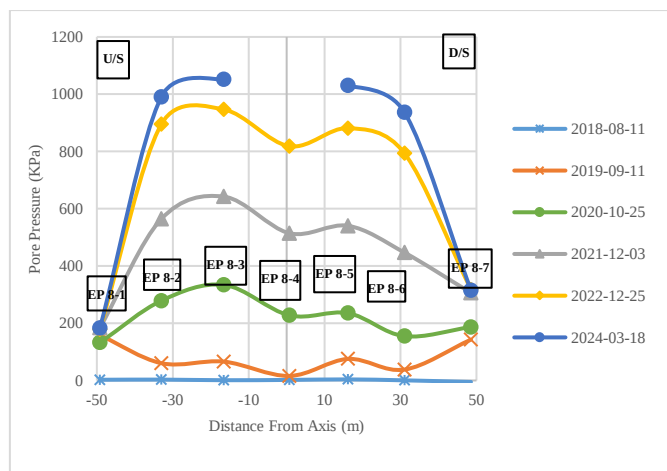
شکل (۵). نمودار تغییرات ضریب قوس زدگی (Ar) بر حسب

زمان (مقطع ۸-۸)

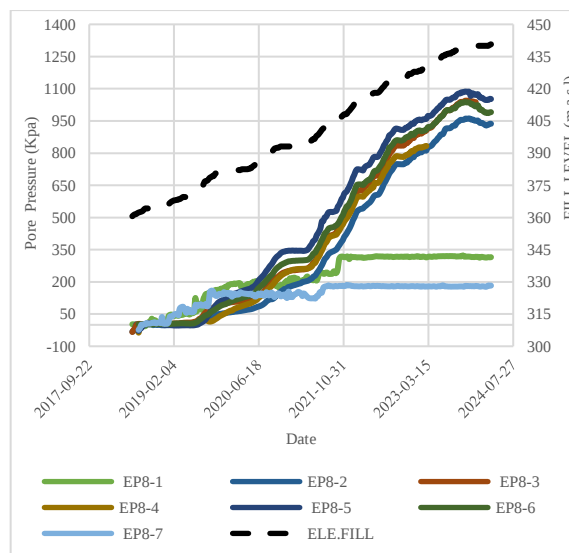
۴-۲. بررسی فشار آب حفره‌ای

برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در مصالح خاکریزی، ابزار پیزومتر الکتریکی (EP) استفاده می‌شود. این ابزار در زمان افزایش و کاهش فشار آب حفره‌ای، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد. در زمان نصب ابتدایی، فشار آب حفره‌ای را به صورت عدد منفی نشان می‌دهد که با افزایش سربار و فشار آب حفره‌ای در محل نصب، به تدریج از مقدار منفی به سمت مقداری مثبت تغییر می‌کند.

می‌باید که نشان‌دهنده افزایش فشار آب حفره‌ای است. بیشترین فشار آب حفره‌ای در این تراز مربوط به آخرین قرائت ثبت شده است و معادل ۱۰۵۲ کیلوپاسکال است و مربوط به پیزومتر -5-EP8 می‌باشد.

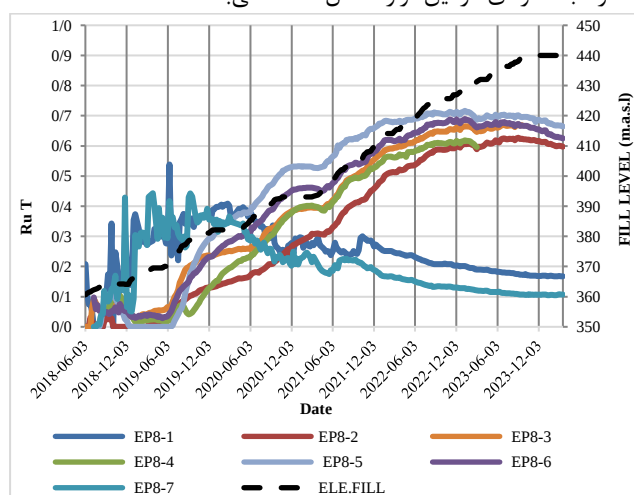


شکل (۷). تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقابل فاصله از محور سد هراز در مقطع ۸-۸



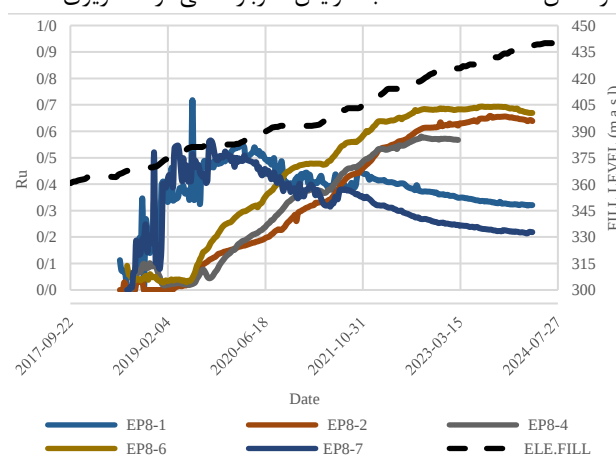
شکل (۶). نمودار تغییرات فشار آب منفذی برای پیزومترهای الکتریکی برحسب زمان (مقطع ۸-۸)

ضریب فشار آب حفره‌ای نیز در حال افزایش است. بیشترین ضریب فشار آب حفره‌ای در این تراز معادل 0.67 می‌باشد.



شکل (۹). نمودار تغییرات ضریب فشار آب حفره‌ای تئوریکال Rut بر حسب زمان (مقطع ۸-۸)

در شکل ۸، تغییرات ضریب فشار آب حفره‌ای (Ru) در تراز ۳۶۰ متر نشان داده شده است. با افزایش سربار ناشی از خاکریزی،



شکل (۸). نمودار تغییرات ضریب فشار آب حفره‌ای Ru بر حسب زمان (مقطع ۸-۸)

۳-۴. نشست

تغییر مکان قائم یا نشست سدهای خاکی به دو مؤلفه نشست در دوران ساخت و پس از آن تقسیم می‌شود. نشست در طول ساخت ناشی از بارگذاری تدریجی روی لایه‌های زیرین خاک توسط لایه‌های جدید است که به طور متوالی ساخته می‌شوند. بدین

نشست در هسته

نشست در هسته متأثر از وزن خاکریز، سرعت خاکریزی، خواص و نوع خاک، درصد رطوبت، روش تراکم و هندسه هسته است. نشست متفاوت هسته و پوسته ناشی از متفاوت بودن تراکم‌پذیری مصالح آن‌هاست.

نشست در پوسته

نشست در پوسته به روش ساخت و ویژگی‌های مصالح بستگی دارد و عوامل مؤثر بر آن عبارتند از جنس لایه، روش تراکم، میزان رطوبت، و متغیرهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری مصالح. یکی از پدیده‌های اصلی مورد انتظار در سدهای خاکی، پدیده نشست است که پدیده‌ای مستمر است و همزمان با ساخت سد در لایه‌های خاکریزی شروع می‌شود. لذا سنجش و ارزیابی نشست بدنه سد، همزمان با مراحل اجرا ضروری است.

میزان نشست تابع پارامترهای مختلفی از جمله جنس مصالح و نحوه اجرا بوده و تابع زمان است. بخش قابل توجهی از نشست حین اجرا و در مراحل ابتدایی پس از پایان خاکریزی اتفاق می‌افتد و پس از آن به تدریج نرخ نشست کاهش می‌یابد. پدیده نشست در سدهای خاکی با دو مشخصه، میزان نشست و نرخ نشست، قابل ارزیابی است. نشست می‌تواند به صورت کلی یا تفاضلی محاسبه شود. نشست کلی نشست یک نقطه یا صفحه نسبت به نقطه مبنا و نشست تفاضلی یا بین صفحه‌ای نشست هر صفحه نسبت به صفحه پایینی می‌باشد.

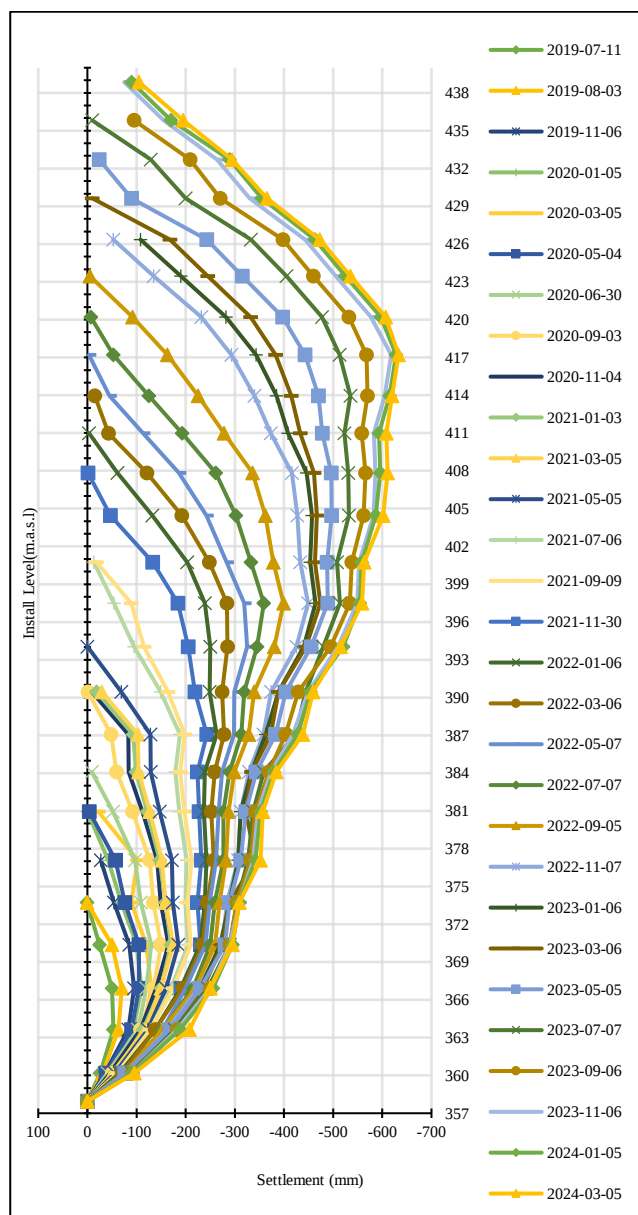
ترتیب، در هر مرحله از خاکریزی، لایه‌های زیرین اجازه نشست پیدا می‌کنند و نشست بیشینه تقریباً در تراز میانی سد جای می‌گیرد. نشست حاصل در هسته نیز به دلیل استهلاک فشار آب حفره‌ای و تحکیم مصالح است. پس از ساخت سد، نشست‌ها ادامه پیدا می‌کنند، اما مقدار آن با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

نرخ نشست عموماً در مراحل اولیه خاکریزی زیاد بوده ولی پس از پایان خاکریزی بدنه و با گذشت زمان به تدریج کاهش یافته و در دراز مدت به سمت صفر میل می‌نماید. نقطه مبنای اندازه‌گیری، در انتهای لوله در نظر گرفته می‌شود. در مواردی که نقطه مبنایی غیر از انتهای لوله در نظر گرفته و یا دسترسی به نقطه انتهایی لوله وجود ندارد، می‌بایستی مشخصات دقیق نقطه مبنا معرفی و دلایل این انتخاب تشریح شده باشد. طبق تحقیقات صورت گرفته، میزان نشست در انتهای ساخت در محدوده 0/01H الی 0/02H می‌باشد [۷] (H ارتفاع سد به متر است).

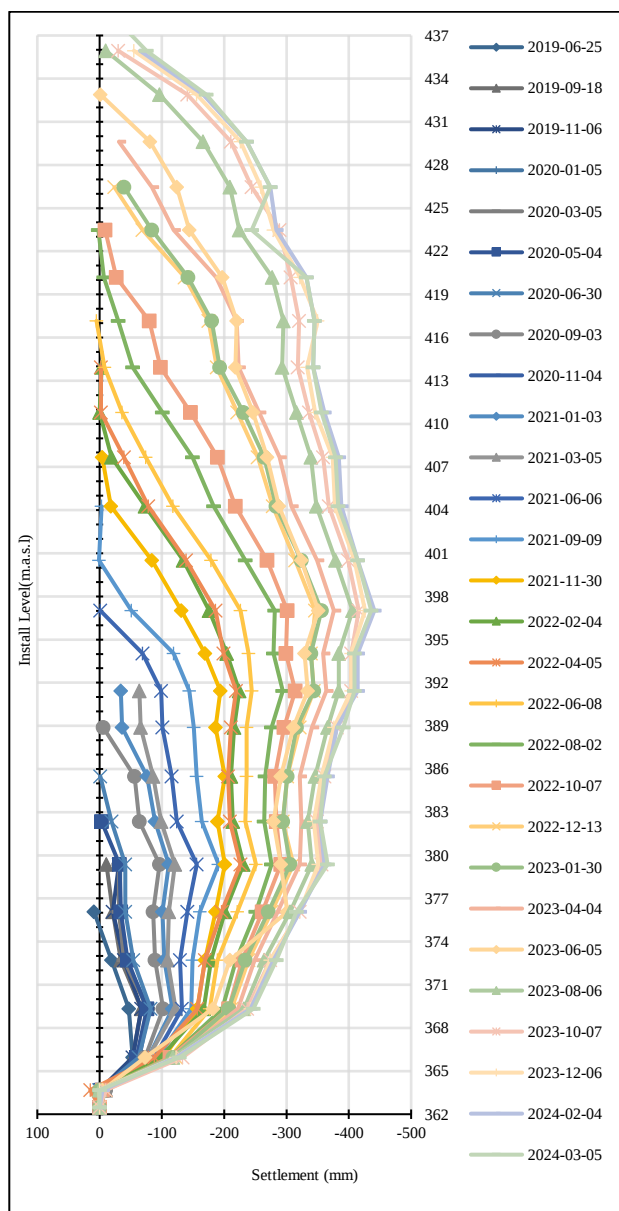
برای بررسی تغییرشکل‌های قائم سد هراز در مقطع ۸-۸ چهار نشست سنج در هسته و پوسته در نظر گرفته شده که با افزایش تراز خاکریزی نصب آن‌ها ادامه دارد. یک نشست سنج در پوسته بالادست، یک عدد در هسته رسی و دو عدد در پوسته پایین‌دست قرار دارند.

مجموعه انحراف سنج نشست سنج IS8-1 در پوسته بالادست بدنه سد نصب شده است و بیشترین مقدار نشست در این ناحیه که تاکنون قرائت شده است، ۴۴۱ میلیمتر بوده است. همچنین بیشترین نشست در هر دوره از قرائت نسبت به ارتفاع خاکریزی در این ابزار نیز به میزان ۰.۶۸ می‌باشد.

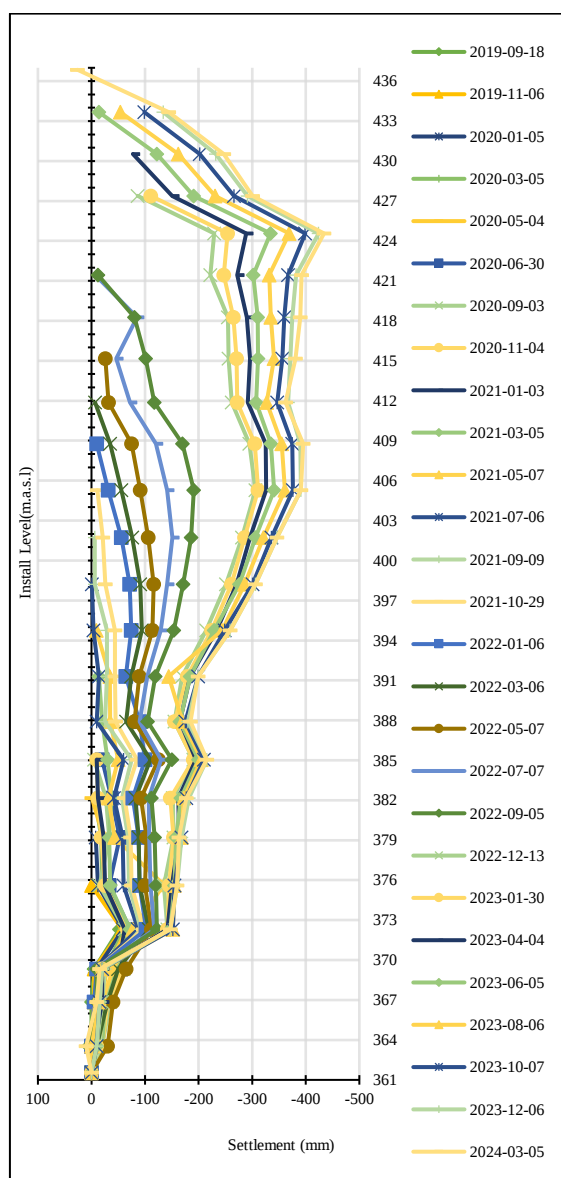
مجموعه انحراف سنج نشست سنج IS8-2 در مرکز هسته بدنه شروع شده است و بیشترین مقدار نشست هسته در این ناحیه که تاکنون قرائت شده است، ۶۳۳ میلیمتر بوده است. همچنین نسبت بیشترین نشست به ارتفاع خاکریزی نیز به میزان ۰.۸۹ می‌باشد.



شکل (۱۱). نمودار تغییرات نشست صفحات لوله نشست سنجی
IS8-2 با فرض ثابت بودن تراز سرلوله



شکل (۱۰). نمودار تغییرات نشست صفحات لوله نشست سنجی
IS8-1 با فرض ثابت بودن تراز سرلوله



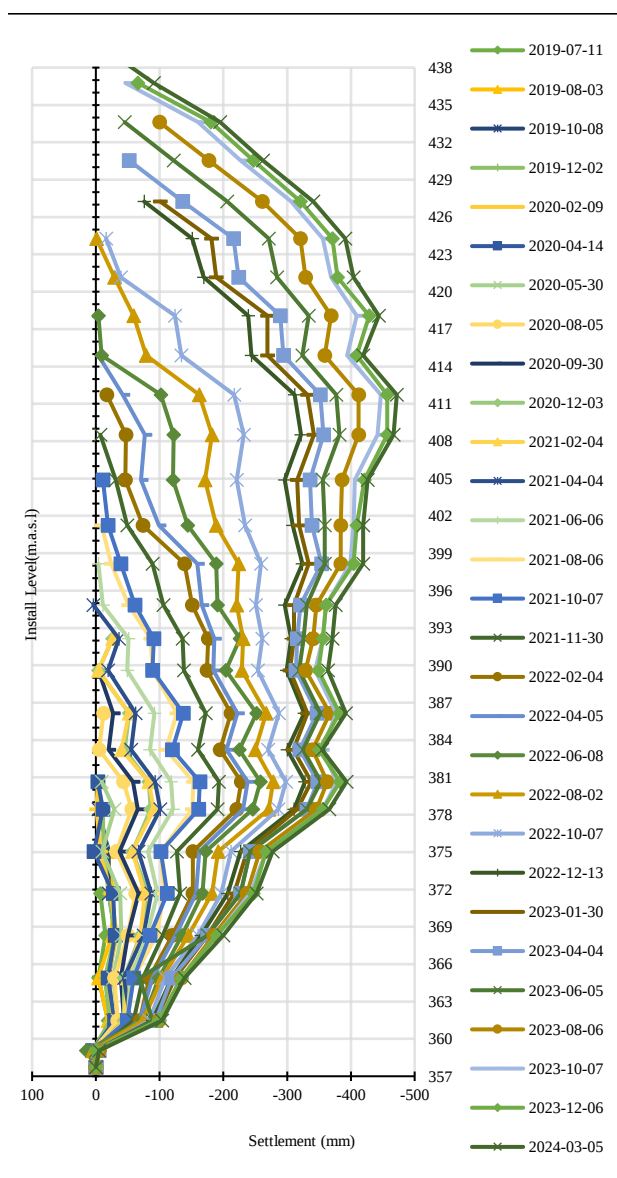
شکل (۱۳). نمودار تغییرات نشست صفحات لوله نشست سنجی I-8-U-4

تحلیل همبستگی بین فشار آب حفره ای، نشست و قوس-زدگی نشان می‌دهد که این پارامترها به صورت مستقیم تحت تأثیر یکدیگر هستند. به ویژه، افزایش فشار آب حفره ای منجر به افزایش نشست و کاهش ضریب قوس‌زدگی شده است.

۵. نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج به دست آمده از رفتارسنجی سد هراز در حین ساخت، مشاهدات زیر برآورد شده است:

- مقادیر فشار آب منفذی در پی و بدنه سد، فشار کل در سلولهای فشارسنج، و همچنین مقادیر تغییر مکان بدنه و پی سد در تمامی مقاطع در حد مجاز قرار دارد.



شکل (۱۴). نمودار ماکزیم نشست صفحات لوله نشست سنجی IS-8 نسبت به ارتفاع خاکریزی

مجموعه انحراف سنج نشست سنج IS8-3 در پوسته پایین دست بدنه سد نصب شده است و بیشترین مقدار نشست در این ناحیه که تاکنون قرائت شده است، ۴۷۲ میلیمتر بوده است. همچنین بیشترین نشست در هر دوره از قرائت نسبت به ارتفاع خاکریزی در این ابزار نیز به میزان ۰.۶۲ می‌باشد.

ابزار IS8-4 در پوسته پایین دست بدنه سد نصب شده است و بیشترین مقدار نشست در این ناحیه که تاکنون قرائت شده است، ۴۳۴ میلیمتر بوده است. همچنین بیشترین نشست در هر دوره از قرائت نسبت به ارتفاع خاکریزی نیز به مقدار ۰.۷۴ می‌باشد که با توجه به مقادیر نشست‌های متعارف دیگر سدهای دنیا که میان ۱ تا ۲ درصد ارتفاع خاکریزی است، بیشترین نشست سد هراز در محدوده معمول قرار دارد.

۵. مراجع

- [1] Dunncliff, J., Green, Gordon E. (1993), "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field performance" publication, Wiley & son.
- [2] Rashidi, S. Haeri. (2017). "Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 709-725.
- [3] Szostak, A. & Massiera, M., 2004- Modeling of Deformations during Construction of a Large Earth Dam in the La Grande Complex, Canada, Technical Science, pp.7-13.
- [4] Hojjat Ansari, A., Mirghasemi, A. A., & Niromand, H. (2013). Accuracy of Stress Data Measured by Earth Pressure Cells Installed in Embankment Dams. *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development*, 18-19 December 2013, Tabriz, Iran.
- [5] Narimani, S., Davarpanah, S. M., & Sattarvand, J. (2016). Prediction of Hydro-mechanical Stability of Dam: Using Calibrated Model from Back Analysis and Monitoring Data. *Civil Engineering Journal*, Vol. 2, No. 8, August.
- [6] Lofquist, B. 1955. "Discussion of Cracking in Dams." *Proceeding of 5th ICOLD Conference*, vol. 3, 21. Paris.
- [7] Kutzner, C. (1997), "Earth and rockfill dams, principles of design and construction", Publication, A.A, Balkema.

مقادیر نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق اعداد ۶۳۳، ۴۴۱ و ۴۷۲ میلیمتر را برای نشست در هسته، پوسته بالادست و پوسته پایین‌دست نشان می‌دهد. بیشترین نشست هسته در دوران ساخت حدود ۰.۸۹ درصد ارتفاع خاکریزی سد به دست آمده که با توجه به مقادیر نشستهای متعارف دیگر سدهای دنیا که میان ۱ تا ۲ درصد ارتفاع سد است، بیشترین نشست سد هراز در محدوده معمول است.

با توجه به تفاوت سختی مصالح هسته با فیلتر و پوسته، قوس‌زدگی میان هسته و فیلتر، و فیلتر و پوسته مشاهده می‌شود. این تفاوت در ترازهای بالاتر به علت درصد رطوبت کمتر و عرض کم هسته بیشتر است. ضریب قوس‌زدگی در هسته سد ۰.۴۸ در پوسته بالادست سد هراز محاسبه شده است که در محدوده تغییرات معمول سدهای بزرگی مانند سد تهم با ارتفاع ۱۲۳ متر بین ۰.۲ تا ۰.۸۸ و در سد کرخه با ارتفاع ۱۳۰ متر بین ۰.۴۵ تا ۱ گزارش شده است.

مقدار حداکثر ضریب R_u اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق به میزان ۰.۶۷ می‌باشد که در قسمت بالادست هسته اتفاق افتاده است.

براساس مشاهدات انجام شده در سد هراز طی دوران ساخت، مقادیر فشار آب حفره‌ای، قوس‌زدگی و نشست در محدوده مجاز قرار داشته‌اند. تحلیل هم‌زمان این پارامترها اطلاعات ارزشمندی برای بهبود طراحی و رفتارنگاری سدها ارائه می‌دهد.