

بررسی رفتار بدنه سد مارون با استفاده از نتایج شبکه‌ی ابزار دقیق در دوران ساخت و آب‌گیری

احمد رضا طبیب نژاد^۱، رضا مهین روستا^{۲*}

۱- کارشناس ارشد عمران - مکانیک خاک و پی، شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس

۲- دکترای ژئوتکنیک و مدیر گروه بهسازی پی‌های آبرفتی، شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس

reza.mahinroosta@znu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۵/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۵/۰۶

چکیده- در مقاله‌ی حاضر، نتایج و قرائت‌های دستگاه‌های رفتارنگاری نصب شده در هسته‌ی سد، بررسی و تفسیر شده و براساس این نتایج رفتار بدنه سد در حین عملیات ساخت و همچنین در دوران آب‌گیری و بهره‌برداری کنترل و ارزیابی شده است. این مطالعه از سه بخش عمده شامل ارزیابی وضعیت فشار آب‌ها، تنش‌های درون هسته و بررسی نشست‌ها و تغییر شکل‌های آن تشکیل شده است.

کلیدواژگان: سد مارون، سد خاکی، هسته‌ی رسی، شبکه‌ی رفتارنگاری و ابزار دقیق، کنترل ایمنی و پایداری بدنه‌ی سد

۱- مقدمه

سد مخزنی مارون در استان خوزستان بر روی رودخانه مارون و در ۱۹ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بهبهان احداث شده است. این سد از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی است. ارتفاع سد از پایین‌ترین تراز در بستر رودخانه ۱۷۰ متر، و طول تاج سد ۳۴۵ متر و عرض تاج ۱۵ متر است. طول مخزن سد ۳۰ کیلومتر گنجایش آن ۱۲۰۰ میلیون مترمکعب است. هسته‌ی سد که اندکی مایل است [۱]، در تمام طول خود روی سنگ کف قرار می‌گیرد. سنگ بستر از آهک‌های سازند آسماری ضخیم‌لایه بوده که برای آب بندی آن، به وسیله مجموعه‌ای از گالری‌های تزریق در کف هسته و گالری‌های افقی در تکیه‌گاه‌ها، پرده تزریق و

زه‌کشی اجرا شده است [۲]. مقطع تیپ طبق ساخت بدنه‌ی سد در شکل ۱ نشان داده شده است. عملیات اجرائی بدنه‌ی سد که حدود ۹۷۰ روز به طول انجامیده، از اواخر بهمن ماه ۱۳۷۳ هجری شمسی آغاز و در مهر ماه ۱۳۷۶ به پایان رسید. به منظور ارزیابی رفتار بدنه‌ی سد و همچنین کنترل و بررسی شرایط ایمنی و پایداری آن در حین ساخت و دوران بهره‌برداری، شبکه‌ی رفتارنگاری بدنه‌ی سد طراحی و اجرا شده است. عمده دستگاه‌های رفتارنگاری سد مارون در پنج مقطع عرضی از بدنه و پی سد توزیع شده‌اند. شبکه‌ی الکتریکی فشار رفتارنگاری سد شامل پیزومترهای الکتریکی، سلول‌های الکتریکی فشارکل خاک، پیزومترهای لوله‌ی قائم، لوله‌های انحراف سنج- نشست

آزمایشات انجام شده، در جدول ۱ ارائه شده است [۴].

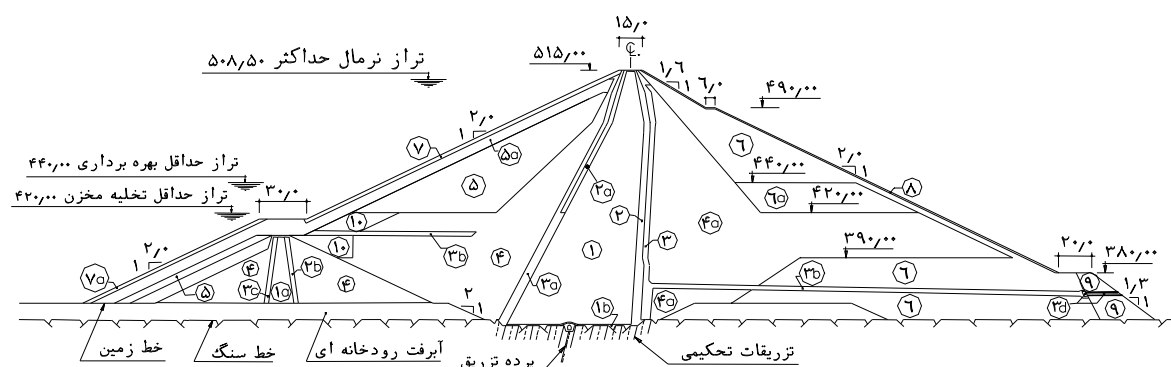
۲- بررسی فشار آب‌های حفره‌ای درون هسته

نتایج حاصل از پیزومترهای الکتریکی نصب شده در سد مارون که دارای سیستم تار مرتعش است، نشان می‌دهد که همه‌ی این ابزارها، روند عمومی مشابهی را برای تغییرات فشار آب حفره‌ای درون هسته در حین ساخت و پس از آب‌گیری از خود نشان داده‌اند. بزرگ‌ترین مقطع عرضی ابزارگذاری سد که بخش عمده بررسی‌های انجام شده در این مطالعه روی آن متمرکز شده است، به همراه شبکه‌ی ابزار دقیق مربوط به آن در شکل ۲ ارائه شده است. هم‌چنین با توجه به اهمیت تغییرات تراز آب مخزن در بررسی رفتار و تفسیر نتایج ابزار دقیق، نمودار تغییرات تراز آب مخزن با زمان، در شکل ۳ نشان داده شده است [۴].

سنج، ردیف‌های کرنش سنج، سامانه‌ی جمع‌آوری و اندازه‌گیری نشت، ابزار اندازه‌گیری تراز آب مخزن و نقاط نشانه‌ی نقشه‌برداری است [۳].

در این مقاله بخشی از نتایج و قرائت‌های حاصل از دستگاه‌های ابزار دقیق که مربوط به یک بازه‌ی زمانی حدود ۲۵۰۰ روزه (از ابتدای خاک‌ریزی تا حدود چهار سال و نیم پس از پایان ساخت) است، گردآوری، طبقه‌بندی و به دقت پردازش و تحلیل شده است [۴].

با توجه به اهمیت ویژه‌ی ناحیه هسته در نحوه عملکرد و چگونگی رفتار عمومی بدنه‌ی سد و هم‌چنین قرارگیری بخش عمده‌ی دستگاه‌های ابزار دقیق، درون هسته‌ی رسی، این تحقیق روی ارزیابی و تفسیر نتایج و قرائت‌های ابزار دقیق موجود در هسته‌ی سد متمرکز شده است. مشخصات عمومی مصالح هسته‌ی سد براساس مستندات، طبق ساخت و نتایج



- مصالح نفوذپذیر گروه ۱ (۱، ۱۵، ۱۶)
نواحی فیلتر (۲، ۲۵، ۲۶)
نواحی انتقالی (۳، ۳۵، ۳۶)
نواحی زهکش (۳۵، ۳۶)

- پوسته‌های شن و ماسه‌ای (۴، ۴۵)
پوسته‌های سنگریزه‌ای ۱۵ و ۱۶ (۵، ۵۵)
پوسته‌های سنگریزه‌ای ۱۱ و ۱۲ (۶، ۶۵)
پوشش‌های محافظ بالادست (۷، ۷۵)

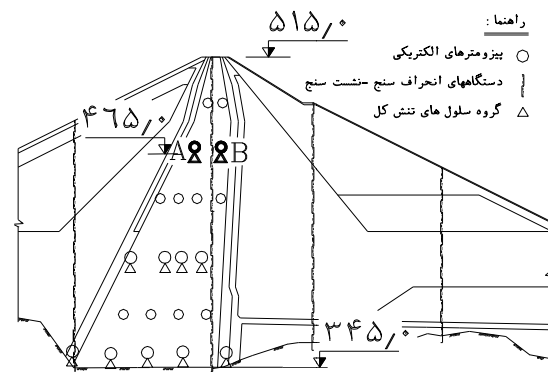
- پوشش محافظ پایین دست (۸)
مصالح سنگریزه‌ای مخلوط با سیمان (۹)
مصالح شن و ماسه‌ای مخلوط با سیمان (۱۰)

شکل (۱) مقطع نمونه طبق ساخت بدنه سد مارون

جدول (۱) مشخصات عمومی مصالح هسته سد

نوع مصالح	عبوری از الک ۲۰۰ (%)	حداکثر اندازه دانه‌ها (mm)	متوسط شاخص خمیری (%)	دانسیته خشک متوسط (t/m ³)	رطوبت متوسط (%)
CL	۷۵ تا ۱۰۰	۱/۵	۱۶	۱/۷۱	۱۶/۵

لازم به توضیح است که تغییرات زمان در این نمودار بر حسب روز و از تاریخ شروع عملیات خاکریزی بدنه محاسبه شده است.

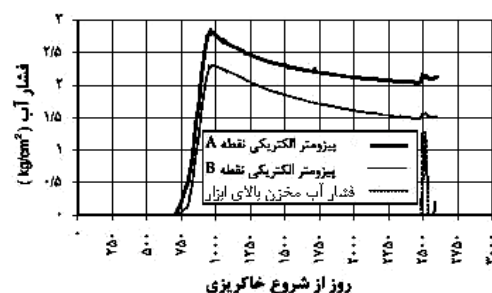


شکل (۲) مقطع بیشینه ابزارگذاری بدنه ی سد



شکل (۳) تغییرات تراز آب مخزن نسبت به زمان

به عنوان نمونه، نمودارهای تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقابل زمان برای دو پیزومتر الکتریکی A و B که در ترازهای فوقانی هسته‌ی سد (تراز ۴۶۵ متر) و در مقطع بیشینه نصب شده‌اند، به همراه نمودار تغییرات فشار آب مخزن، در بالای تراز نصب ابزار در شکل ۴ نشان داده شده است [۴].

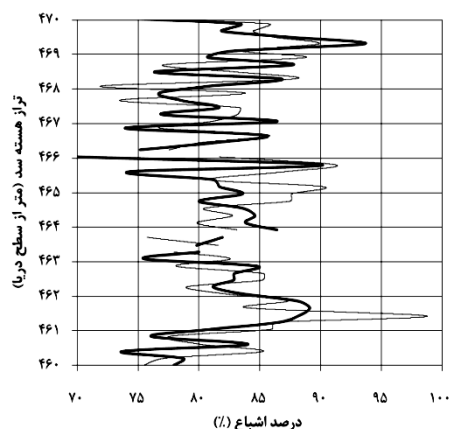


شکل (۴) تغییرات فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان در نقاط A و B

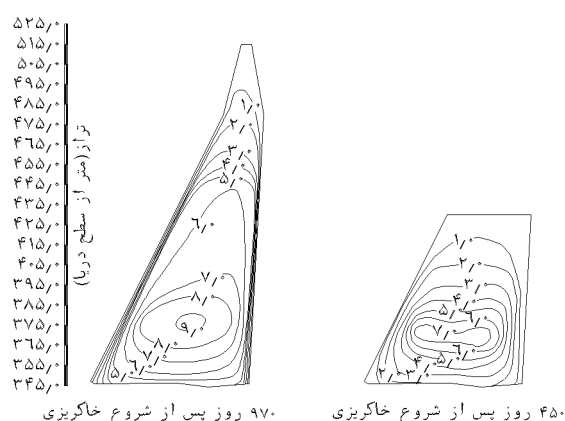
با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشینه فشار آب منفذی در حدود تاریخ پایان ساخت سد (حدود ۹۷۰ روز از شروع خاکریزی)، ثبت شده است. این امر نشان دهنده‌ی این واقعیت است که نفوذپذیری مصالح هسته‌ی رسی، به اندازه‌ای کوچک است که حتی در پیزومترهای واقع در نواحی مرزی هسته که طول زه‌کشی نسبتاً کمی دارند، نرخ افزایش فشار آب منفذی در اثر ساخت بدنه‌ی سد، بیش‌تر از سرعت زه‌کشی و تخلیه فشار آب بوده است. هم‌چنین پس از پایان ساخت بدنه‌ی سد، با پایان عملیات خاکریزی، زه‌کشی و تخلیه فشار آب آغاز شده و نمودارها روند نزولی پیدا می‌کنند. این قسمت از نمودار نشان دهنده‌ی روند کند تحکیم مصالح هسته رسی است. با دقت در این نمودار ملاحظه می‌شود که روند زه‌کشی فشار آب حفره‌ای در نقطه B اندکی سریع‌تر از نقطه‌ی A است، که این اختلاف می‌تواند ناشی از فاصله‌ی زه‌کشی بیش‌تر (حدود دوبرابر) نقطه A نسبت به نقطه‌ی B باشد. هم‌چنین شکل ۴ نشان می‌دهد که با وجود هم‌تراز بودن این پیزومترها و بارگذاری یکسان خاکریزی بر روی آن‌ها، مقادیر فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده در نقطه‌ی A بیش از مقادیر مربوط به نقطه‌ی B است. با توجه به این‌که این اختلاف حتی در نخستین قرائت‌های انجام شده قابل تشخیص است، به نظر می‌رسد اختلاف فشار آب‌های اندازه‌گیری شده عمدتاً ناشی از تغییرات تصادفی درصد رطوبت اجرا شده‌ی مصالح هسته (در دامنه‌ی مجاز) در یک تراز و در نقاط مختلف است. تغییرات مذکور، می‌تواند منجر به ایجاد اختلاف بین مقادیر درصد اشباع و در نتیجه پارامتر B اسکمپتون^۱ مصالح واقع در یک تراز شده و از شروع بارگذاری باعث بروز اختلاف بین مقادیر فشار آب اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف شود. هرچند فاصله‌ی

1- Skempton B Value

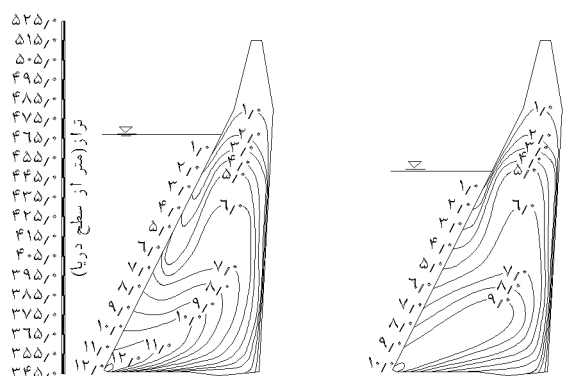
آب‌گیری (روز ۱۸۵۰) و ۳۵ ماه پس از آب‌گیری (روز ۲۶۰۰) ترسیم شده و در شکل ۶ ارائه شده است (روزها از شروع خاک‌ریزی محاسبه شده است) [۴].



شکل (۵) تغییرات درصد اشباع در مقابل ارتفاع، برای دو ناحیه‌ی مجاور هم در نزدیکی مقطع بیشینه هسته رسی



۹۷۰ روز پس از شروع خاک‌ریزی ۴۵۰۰ روز پس از شروع خاک‌ریزی



شکل (۶) منحنی‌های هم فشار آب حفره‌ای (برحسب kg/cm^2) در روزهای ۴۵۰، ۹۷۰، ۱۸۵۰ و ۲۶۰۰ روز پس از شروع خاک‌ریزی

زه‌کشی بیش‌تر نقطه A در مقایسه با نقطه B نیز می‌تواند تاحدودی در ایجاد اختلاف یادشده مؤثر باشد.

در فرایند کنترل کیفی عملیات خاک‌ریزی و تراکم هسته، مقادیر درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک برجای مصالح در نواحی مختلف باندهای خاک‌ریزی تعیین و ثبت شده است. با استفاده از این اطلاعات و روابط وزنی-حجمی مقادیر درصد اشباع در دو ناحیه‌ی مجاور واقع در محدوده‌ی میانی دره (در نزدیکی مقطع بیشینه مورد بررسی در این تحقیق)، محاسبه شده است، تغییرات درصد اشباع در مقابل ارتفاع هسته برای محدوده‌ی ترازهای مربوط به نقاط A و B در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد اشباع در حوالی این دو نقطه بین ۷۵ تا ۹۰ درصد متغیر بوده است. لازم به توضیح است مقادیر وزن مخصوص خشک برجای مصالح هسته در محدوده‌ی یادشده تغییرات اندکی داشته و بین $1/72$ و $1/79$ با متوسط $1/74$ متر تن بر متر مکعب اندازه‌گیری شده است.

نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که از حدود ۲۵۰۰ روز پس از شروع خاک‌ریزی که تراز آب مخزن از رقوم نصب پیزومترهای مورد بررسی بالاتر رفته است، یک جهش کوچک در فشار آب حفره‌ای در پیزومترها مشاهده می‌شود. هرچند با توجه به این‌که ابزارهای مورد بررسی، درون هسته قرارداشته و مستقیماً در زیر ناحیه‌ی نوسانات سطح آب مخزن واقع نشده‌اند، تغییرات فشار آب حفره‌ای نسبتاً جزئی بوده و عمدتاً ناشی از تغییر تنش کل در اثر فشار عمومی آب مخزن بر بدنه سد است. بر اساس نتایج و قرائت‌های پیزومترهای الکتریکی نصب شده در مقطع بیشینه هسته‌ی سد، خطوط هم فشار آب حفره‌ای در چهار مقطع زمانی رسیدن خاک‌ریزی به نیمه‌ی ارتفاع سد (روز ۴۵۰)، پایان ساخت (روز ۹۷۰)، ۱۰ ماه پس از

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

که در آن u فشار آب حفره‌ای اضافی، t زمان، z مکان و c_v ضریب تحکیم است که با رابطه‌ی زیر به نفوذپذیری k وزن مخصوص آب γ_w و ضریب تراکم‌پذیری حجمی m_v مرتبط می‌شود:

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2)$$

طبیعی است که در استفاده از رابطه‌ی بالا تنها باید قسمت کاهنده در فشار آب حفره‌ای مورد توجه قرار گیرد. با توجه به منحنی‌های شکل ۴، مقدار درصد تحکیم پس از ۴/۵ سال از پایان ساخت سد، تقریباً برابر با ۳۰ درصد می‌شود که با توجه به شکل‌های ارتباط ضریب زمان بدون بعد T_v با درصد تحکیم متوسط [۶]، با فرض توزیع سینوسی، مقدار این ضریب حدود ۰/۱ می‌شود. رابطه ضریب زمان بدون بعد و ضریب تحکیم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (3)$$

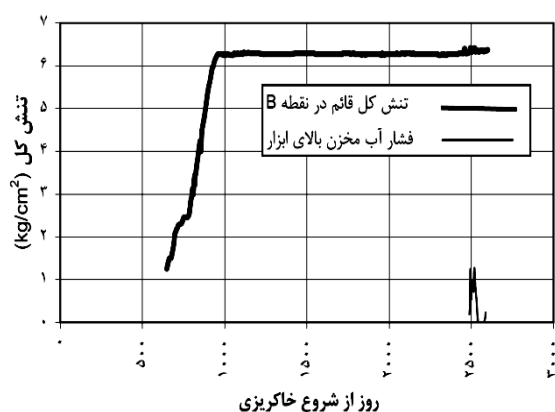
با توجه به طول مسیر تراوش H در پیژومترهای بالا، و زمان تحکیم ۴/۵ سال و رابطه‌های ۲ و ۳، مقدار نفوذپذیری هسته‌ی سد در محدوده‌ی این پیژومترها حدود 5×10^{-8} cm/s به دست می‌آید که بسیار عدد کوچکی است.

با توجه به نفوذپذیری بسیار کم مصالح هسته‌ی رسی، روند زه‌کشی فشار آب حفره‌ای اضافی ناشی از ساخت در هسته به اندازه‌ای کند است که با گذشت حدود چهار سال و نیم از پایان عملیات ساخت، کماکان فشار آب حفره‌ای درون هسته با فشار آب‌های مخزن به تعادل نرسیده و به خصوص در نیمه پایین دست آن بیش از مقادیر مربوط به حالت تراوش پایدار است. این بدان معناست که در برخی موارد، در انجام تحلیل‌های پایداری بدنه‌ی سدهای

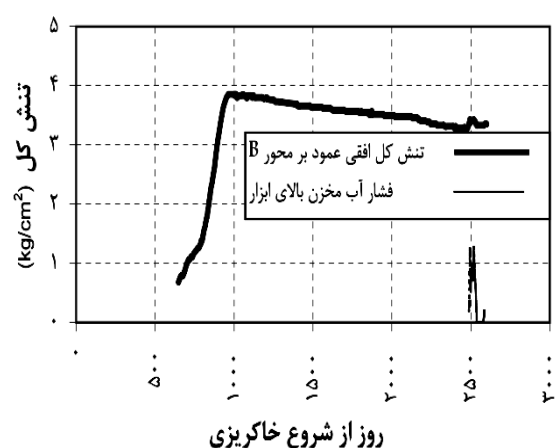
با مقایسه‌ی خطوط هم‌فشار آب حفره‌ای در تاریخ‌های رسیدن به نیمه‌ی ارتفاع و پایان ساخت بدنه‌ی سد، روند افزایش فشار آب منفذی در حین ساخت بدنه، قابل تشخیص است. مقدار بیشینه فشار آب در زمان‌های مربوط به نیمه‌ی ارتفاع و پایان ساخت بدنه‌ی سد به ترتیب برابر ۷ و $9 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ بوده است که در محدوده‌ی میانی عرض هسته و در حدود یک پنجم پایینی ارتفاع سد به وجود آمده است. با توجه به این میزان فشار آب حفره‌ای، مقدار بیشینه ضریب فشار آب حفره‌ای، u ، معادل ۰/۳۲ می‌شود که با پیش‌بینی نخست در مرحله طراحی مطابقت خوبی دارد [۵].

با گذشت ۱۰ ماه از شروع آب‌گیری (روز ۱۸۵۰) و بالا آمدن سطح آب مخزن تا حدود تراز ۴۴۸/۵ متر، مقادیر فشار آب منفذی در نیمه‌ی بالادست هسته‌ی رسی برای به تعادل رسیدن با فشار آب مخزن، افزایش یافته و در ترازهای پایین به حدود 10 kg/cm^2 رسیده است، در حالی که در نواحی نزدیک به مرز پایین دست هسته، در اثر فرآیند تحکیم، فشار آب‌های منفذی تا حدودی زه‌کشی شده و کاهش یافته‌اند. همین روند تغییرات تا حدود روز ۲۶۰۰ با گذشت حدود ۲ سال و ۱۱ ماه از شروع آب‌گیری ادامه داشته است، به طوری که مقدار بیشینه فشار آب در پاشنه‌ی بالادست هسته رسی به حدود 12 kg/cm^2 رسیده و مقادیر فشار آب منفذی در مرز پایین دست هسته‌ی رسی نیز با ادامه‌ی فرایند کند تحکیمی هسته، اندکی کاهش یافته است. دلیل کاهش کم فشار آب حفره‌ای در هسته‌ی رسی پس از ساخت سد را می‌توان به نفوذپذیری بسیار کم هسته‌ی رسی مرتبط دانست برای این منظور از تئوری تحکیم ترزاقی استفاده می‌شود. ترزاقی [۶]، معادله‌ی دیفرانسیل زیر را برای بیان تغییرات فشار آب حفره‌ای نسبت به زمان و مکان معرفی کرد:

است که با بالا آمدن نسبتاً سریع سطح آب و اعمال فشار جانبی آب بر بدنه‌ی سد، رخ داده است.



شکل (۷) تغییرات تنش کل قائم نسبت به زمان در نقطه B



شکل (۸) تغییرات تنش کل افقی عمود بر محور نسبت به زمان در نقطه B

همان‌گونه که در شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود، پس از پایان ساخت بدنه، با توقف بارگذاری ناشی از خاکریزی و کاهش تدریجی فشار آب حفره‌ای ناشی از تحکیم، تنش کل قائم تقریباً ثابت مانده و تنش کل افقی روند کاهشی دارد. در مورد تنش کل قائم می‌توان گفت با توجه به آنکه خاکریزی بدنه سد به اتمام رسیده است، تنش کل قائم چندان افزایش نمی‌یابد. در حالی‌که در مورد تنش کل افقی

خاکی با هسته‌ی رسی، علاوه بر شرایط بارگذاری معمول و متداول، باید حالت بارگذاری خاصی که در آن مخزن سد آب‌گیری شده و کماکان درصدی از فشار آب‌های حفره‌ای پایان ساخت نیز درون هسته‌ی سد باقی مانده و زه‌کشی نشده است، مد نظر قرار گرفته و پایداری بدنه در این شرایط کنترل شود.

۳- بررسی تنش‌های درون هسته

فشارسنج‌های سد مارون که مانند پیزومترهای الکتریکی آن دارای سیستم تار مرتعش است، در گروه‌های پنج تایی نصب شده‌اند. هر گروه از فشارسنج‌ها در پنج جهت نصب شده و می‌تواند، تنش کل قائم، تنش کل افقی عمود بر محور سد، تنش کل افقی موازی با محور سد و تنش کل نرمال در امتداد ۴۵ درجه به سمت بالادست و پایین دست را اندازه‌گیری کند [۷]. در حین ساخت بدنه‌ی سد و در اثر بارگذاری ناشی از خاکریزی، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، تنش کل در همه‌ی جهات اندازه‌گیری شده، افزایش یافته و در حدود روز پایان ساخت، به یک مقدار بیشینه رسیده است. به عنوان نمونه، نمودار تغییرات تنش کل نسبت به زمان برای دو سلول فشارسنج نصب شده در نقطه‌ی B که یکی تنش کل قائم و دیگری تنش کل افقی عمود بر محور سد را اندازه می‌گیرند، به ترتیب در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. برای بررسی اثر آب‌گیری مخزن بر مقادیر تنش کل، نمودار تغییرات فشار آب مخزن در بالای تراز نصب ابزار نسبت به زمان نیز در اشکال مذکور ارائه شده است. با بررسی این نمودارها ملاحظه می‌شود که با توجه به قرارگیری این سلول‌های فشار-سنج در نیمه‌ی پایین دست هسته، آب‌گیری مخزن تأثیری جزئی بر مقادیر تنش کل قرائت شده داشته و به‌نظر می‌رسد پاسخ ابزار در مقابل افزایش تراز آب، عمدتاً ناشی از افزایش عمومی فشار جانبی درون هسته

شرایط به گونه‌ی دیگری است.

به طور کلی می‌توان رابطه زیر را بین تنش کل افقی و تنش کل قائم برقرار کرد:

$$\sigma_h = u + (\sigma_v - u) \times k \quad (4)$$

و یا

$$\sigma_h = k\sigma_v + (1-k)u \quad (5)$$

که در آن σ_v و σ_h ، به ترتیب تنش کل قائم و افقی، u فشار آب حفره‌ای و k ، ضریب فشار جانبی است. باتوجه به آن‌که شرایط بارگذاری به گونه‌ای است که خاک در قسمت‌های فوقانی بدنه سد بین شرایط فعال^۱ و نهائیتاً حالت سکون^۲ عمل می‌کند، مقدار $(1-k)$ مقداری مثبت خواهد بود. بنابراین طبق رابطه‌ی بالا با ثابت بودن تنش کل قائم، مقدار تنش کل افقی با کاهش فشار آب حفره‌ای، کاهش خواهد یافت. با توجه به شکل‌های ۴، ۷ و ۸، مقدار ضریب k را می‌توان در طول دوره ۴/۵ سال پس از ساخت سد به دست آورد. برای نمونه با لحاظ کردن تنش قائم، تنش افقی و فشار آب در پایان ساخت در نقطه‌ی B، معادل ۶/۳، ۳/۹ و ۲/۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، مقدار ضریب k معادل ۰/۴ به دست می‌آید. مقدار این ضریب به تدریج کاهش یافته و در انتهای دوره‌ی مورد بررسی به ۰/۳۸ می‌رسد. بنابراین به تقریب می‌توان گفت در هسته‌ی رسی سد مارون، تنش کل افقی به صورت زیر به تنش کل قائم و فشار آب مرتبط می‌شود:

$$\sigma_h = 0/29\sigma_v + 0/61u \quad (6)$$

واضح است که با کاهش فشار آب به دلیل تحکیم هسته‌ی رسی، مقدار تنش افقی کاهش می‌یابد. از آنجائی که فشار

آب حفره‌ای به صورت همه جانبه اثر می‌کند، به طور مستقیم در مقدار تنش کل افقی وارد می‌شود، در حالی که تنش مؤثر افقی تنها درصدی از تنش مؤثر قائم است ($\sigma'_h = k\sigma'_v$). بنابراین فشار آب منفذی می‌تواند درصد عمده‌ای از تنش کل افقی اندازه‌گیری شده را شامل شود. با شروع فرایند تحکیم از یک طرف، فشار آب حفره‌ای کاهش یافته و از طرف دیگر تنش مؤثر افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه‌ی فوق و روند مشاهده شده در تغییرات تنش‌ها و فشار آب حفره‌ای، اثر کاهش فشار آب منفذی نسبت به افزایش تنش مؤثر افقی غالب بوده و نقش مهم‌تری در تغییرات تنش کل افقی ایفا می‌کند. در حالی که در راستای قائم با کاهش فشار آب حفره‌ای، تنش مؤثر قائم نیز تقریباً به همان نسبت افزایش یافته و تغییر قابل توجهی در مقدار تنش کل قائم رخ نمی‌دهد.

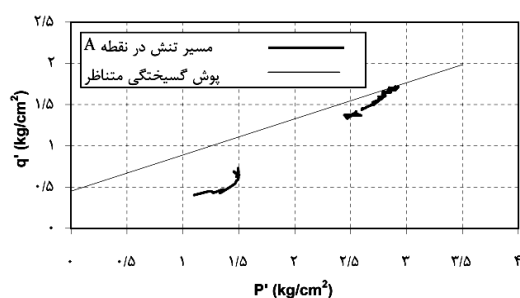
به دلیل اختلاف در خصوصیات تغییر شکل پذیری مصالح ریزدانه‌ی هسته‌ی رسی و مصالح درشت دانه‌ی فیلترها، نواحی انتقالی و پوسته‌های سد، اختلاف نشست بین هسته و نواحی درشت دانه یادشده همواره در سدهای خاکی وجود دارد [۸]. این امر باعث تمرکز تنش‌های برشی در مرز بین نواحی مذکور (مرزهای بالادست و پایین دست هسته رسی) می‌شود. این پدیده را می‌توان با بررسی شرایط تنش‌ی نقاط نزدیک به این نواحی مرزی مورد مطالعه‌ی دقیق‌تر قرار داد. در همین راستا وضعیت تنش‌ی نقاط A و B که در محدوده‌ی نوارهای مرزی یادشده قرار دارند، ارزیابی شده که در ادامه تشریح می‌شود.

با توجه به الگوی ابزارگذاری انجام شده، در کنار هر گروه از سلول‌های سنجش تنش کل، یک پیزومتر الکتریکی نیز نصب شده است. بدین ترتیب با کم کردن مقدار فشار آب اندازه‌گیری شده توسط پیزومتر الکتریکی، از مقادیر تنش کل اندازه‌گیری شده توسط سلول‌های سنجش تنش

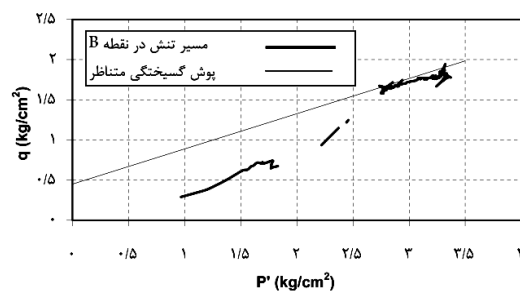
1- Active
2- At rest

المان‌های توده خاک به شرایط گسیختگی به معنی تشکیل سطوح لغزشی و یا باندهای برشی و ناپایداری عمومی بدنه‌ی سد نیست.

با توجه به تجربیه‌ی تشریح شده به‌نظر می‌رسد نصب گروه سلول‌های تنش‌سنج به‌همراه یک پیژومتر در نواحی نزدیک به مرزهای بالادست و پائین‌دست هسته در سدهای خاکی، می‌تواند نقش یک آزمایش مقاومت برشی در محل را ایفا کرده و تخمین قابل قبولی از پارامترهای واقعی و طبق ساخت مصالح (که آثار پیچیده‌ی عوامل مختلف عملی و اجرایی در آن لحاظ شده است)، ارائه دهد.



شکل (۹) مسیر تنش مؤثر در فضای $q'-p'$ برای نقطه‌ی A



شکل (۱۰) مسیر تنش مؤثر در فضای $q'-p'$ برای نقطه‌ی B

۴- بررسی نشست‌ها

در بدنه‌ی سد مارون به‌منظور اندازه‌گیری تغییر شکل‌های بدنه‌ی سد، تعدادی سیستم‌های ترکیبی انحراف سنج-نشست سنج نصب شده است. با توجه به این‌که جابجایی‌های جانبی بدنه‌ی سد نسبتاً کوچک و تحت تأثیر عوامل متعدد و

کل، می‌توان تنش مؤثر را در جهات مربوطه بدست آورد. بر همین اساس برای نمونه در نقاط A و B مقادیر تنش مؤثر در جهات مختلف به‌دست آمده است. سپس با توجه به مشخص بودن وضعیت تنش در این نقاط مقادیر تنش‌های اصلی مؤثر، محاسبه گردیده و مسیرهای تنش مؤثر مربوط در فضای $q'-p'$ ترسیم شده و در اشکال ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

با بررسی این اشکال مشاهده می‌شود، که مسیر تنش برای هر دو گروه سلول‌های فشارسنج واقع در نقاط A و B در ابتدا یک روند افزایشی داشته و پس از مدتی (که برای نقطه‌ی B حدود زمان پایان ساخت بدنه و برای نقطه‌ی A حدود ۴ سال و ۲ ماه پس از پایان ساخت است) به‌طور مشخص روی یک مسیر تقریباً خطی قرار گرفته است. از آنجائی‌که ناحیه خطی مسیر تنش‌های یاد شده شامل حجم قابل ملاحظه‌ای از قرائت‌های ابزار (حدود ۱۸۰۰ قرائت) بوده و هم‌چنین در هر دو نقطه‌ی A و B تقریباً دارای پوش (مجانِب) یکسانی است، بدیهی است روند مذکور تصادفی نبوده. به‌نظر می‌رسد ناحیه‌ی خطی مورد بحث نشان دهنده‌ی پوش گسیختگی مصالح هسته در اطراف این سلول‌های فشارسنج باشد. بر اساس این نتایج در شکل‌های ۹ و ۱۰ یک پوش گسیختگی ترسیم شده که متناظر با پارامترهای مقاومت برشی تحکیم یافته زه‌کشی شده (CD) $C=0.5 \text{ kg/cm}^2$ و $\phi = 26^\circ$ بوده و می‌تواند به عنوان پوش گسیختگی واقعی مصالح هسته به‌شمار آید؛ لازم به ذکر است که این پارامترها با نتایج حاصل از تحلیل‌های برگشتی بدنه‌ی سد هم‌خوانی دارد [۹].

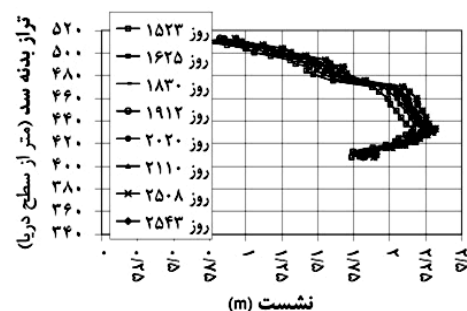
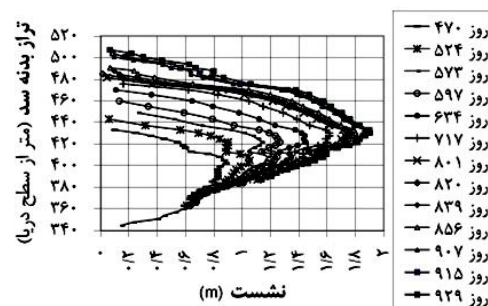
به‌نظر می‌رسد مصالح اطراف این سلول‌های فشارسنج، بر اساس الگوی طبیعی رفتار بدنه سد و عمدتاً به‌دلیل نشست‌های نامساوی بین هسته‌ی رسی و پوسته‌ها، به شرایط گسیختگی رسیده‌اند. هرچند، رسیدن تعدادی از

در این شکل، تاریخ‌ها برحسب روز و از زمان شروع عملیات خاک‌ریزی بدنه محاسبه شده‌اند. با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تغییر شکل و نشست مصالح هسته درحین خاک‌ریزی و ساخت بدنه، دارای یک روند تقریباً یکنواخت بوده است. هر چند در حدود ۶ ماه آخر قبل از پایان ساخت (از حدود روز ۸۰۰ به بعد) با محدود شدن ناحیه‌ی خاک‌ریزی و سطح بارگذاری، نرخ نشست‌های مذکور کاهش یافته است. این روند تغییر شکل پس از پایان ساخت بدنه و توقف خاک‌ریزی (در حدود روز ۹۷۰) باز هم کندتر شده به‌طوری‌که در فاصله قرائت‌های روزهای ۹۲۹ (نزدیک پایان ساخت) تا ۱۵۲۳ با گذشت بیش از یک سال و نیم، تنها نشستی حدود ۲۵ سانتی‌متر در هسته‌ی سد رخ داده است.

با شروع آب‌گیری مخزن در حدود روز ۱۵۴۰، نشست جزئی حدود ۶ سانتی‌متر در همه صفحات مغناطیسی نشست سنج مشاهده می‌شود. این امر با توجه به نفوذپذیری کم مصالح هسته و فاصله‌ی آن از ناحیه‌ی نوسانات سطح آب مخزن، منطقی و قابل توجیه به‌نظر می‌رسد. روند نشست هسته در تاریخ‌های بعدی بسیار کند شده و پروفیل‌های نشست بسیار به یک‌دیگر نزدیک شده‌اند.

در یک توده‌ی خاک، با حرکت از پایین‌ترین تراز توده به طرف بالا، از طرفی مقدار خاک زیر نقطه‌ی مورد بررسی (مقدار مصالح تراکم‌پذیر زیر نقطه که عامل افزایش‌دهنده‌ی نشست است) بیش‌تر می‌شود. از طرف دیگر مقدار سربار (باری که منجر به تراکم و نشست توده شده و عامل افزایش‌دهنده‌ی نشست است) کاهش می‌یابد. این دو اثر در یک توده‌ی خاک همگن تقریباً در حدود ترازهای میانی آن به تعادل می‌رسند، پس می‌توان نتیجه گرفت که بیشینه نشست در یک توده‌ی خاک همگن، در حوالی وسط ارتفاع لایه رخ خواهد داد. این امر با مشاهده‌ی نمودارهای شکل

پیچیده‌ای بوده‌اند و هم‌چنین از آن‌جائی که هسته‌ی سد از نظر تغییر مکان جانبی تقریباً در محور تقارن و ناحیه‌ی خنثی واقع شده است، پس این مطالعه روی جابجائی‌های قائم (نشست‌ها) متمرکز شده است [۴]. برای اندازه‌گیری نشست در راستای لوله‌های انحراف سنج، به هریک از اتصالات تلسکوبی لوله‌ها، یک صفحه مغناطیسی متصل شده که اطراف آن را مصالح تراکم شده‌ی بدنه‌ی سد فراگرفته است. با نشست یا انبساط خاک، صفحات مغناطیسی نیز جابجا شده. با استفاده از یک عمقیاب الکتریکی مخصوص که نوار آن با دقت مدرج شده است، می‌توان وضعیت صفحه و نشست مصالح اطراف آن را در هر لحظه تعیین کرد [۸]. موقعیت این نشست سنج‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودارهای تغییرات نشست نسبت به ارتفاع حاصل از دستگاه نشست سنج نصب شده در هسته‌ی رسی و مقطع بیشینه، در حین ساخت و پس از آب‌گیری در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل (۱۱) تغییرات نشست نسبت به ارتفاع در هسته‌ی سد در تاریخ‌های مختلف

۱۱ قابل تشخیص است، به‌طوری‌که با توجه به همگن بودن مصالح هسته، نمودارهای نشست-ارتفاع برای این ناحیه دارای یک مقدار بیشینه بوده که در حوالی ترازهای میانی مقطع ایجاد شده است.

بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، بیشینه نشست هسته‌ی سد که در مقطع بیشینه ابزارگذاری (شکل ۲) رخ داده، حدود $2/3$ متر بوده که تقریباً "در نیمه‌ی ارتفاع سد (حدود تراز 430) به‌وجود آمده است. از این مقدار $1/9$ متر آن مربوط به دوران ساخت بوده و $0/4$ متر باقیمانده، ترکیب نشست تحکیمی هسته و نشست به‌دلیل فرایند آب‌گیری می‌باشد. همان‌طور که در بحث نفوذپذیری هسته گفته شد، پس از $4/5$ سال از ساخت سد تنها 30 درصد تحکیم انجام شده است؛ بنابراین انتظار می‌رود با ادامه روند خروج فشار آب حفره‌ای اضافی، نشست تحکیمی هسته سد تا $1/15$ ادامه پیدا کند و نهایتاً جابجایی بیشینه در میانه هسته‌ی رسی به بیش از 3 متر برسد. لازم به ذکر است که در فاز مطالعات، میزان بیشینه نشست در هسته رسی در پایان ساخت سد 4 متر پیش‌بینی شده بود [۵] که کمی بیش‌تر از مقادیر حاصل از رفتارنگاری است.

مقادیر بیشینه نشست پوسته‌های بالادست و پائین دست سد که در مقطع بیشینه ابزارگذاری (شکل ۲) رخ داده، براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده به‌ترتیب حدود $1/4$ و $1/16$ متر بوده، که برای مقایسه ارائه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود با توجه به تغییر شکل‌پذیری کم‌تر مصالح درشت دانه‌ی پوسته‌ها، در این نواحی، نشست‌ها و تغییر شکل‌های کوچک‌تری نسبت به مصالح هسته رسی رخ داده است.

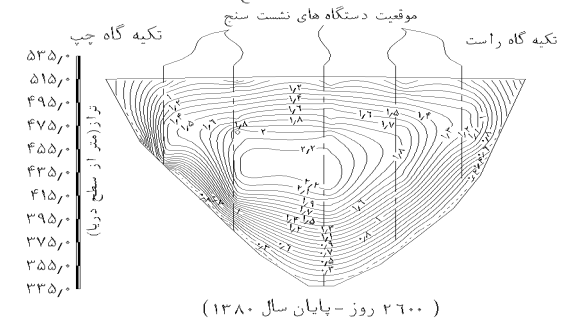
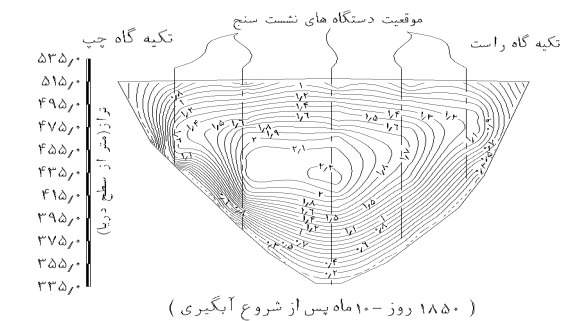
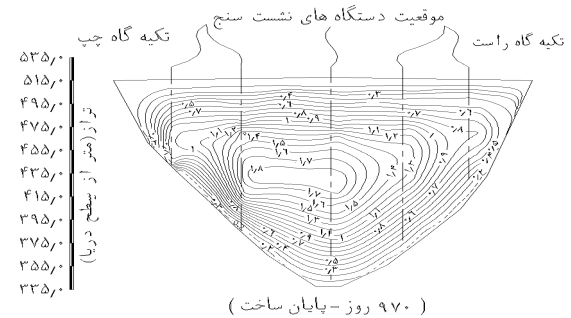
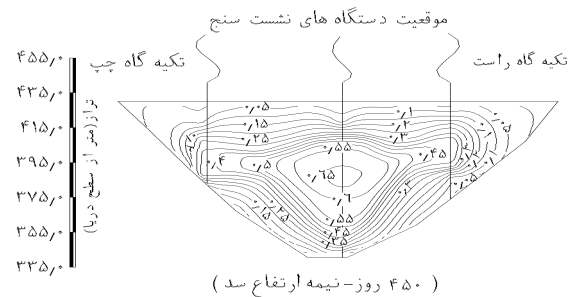
مصالح فیلتر و ناحیه‌ی انتقالی که در دو طرف هسته‌ی رسی قرار گرفته‌اند، دارای تغییر شکل‌پذیری کم‌تری نسبت به مصالح رسی هسته است. قسمت‌های کناری هسته‌ی رسی که در مجاورت این مصالح قرار می‌گیرند، به‌دلیل اصطکاک

موجود در مرز مصالح، تا حدودی روی مصالح فیلتر و ناحیه‌ی انتقالی تکیه کرده و کم‌تر از نواحی میانی هسته‌ی رسی نشست می‌کنند. بدین ترتیب در یک هسته‌ی کاملاً قائم، مقدار بیشینه نشست در هر تراز باید در حوالی وسط عرض هسته که در دورترین فاصله از مصالح فیلتر قرار گرفته است، رخ دهد.

از آن‌جائی‌که هسته سد مارون کمی به‌سمت بالادست متمایل است، اصطکاک ایجاد شده در مرز هسته و فیلتر پایین‌دست بیش‌تر بوده و باعث می‌شود تا محل نقطه‌ی نشست حداکثر کمی به‌سمت بالادست متمایل شود. بنابراین با توجه به نقشه، طبق ساخت ابزارگذاری در شکل ۲ و موقعیت قرارگیری لوله‌ی نشست سنج، به‌نظر می‌رسد، دستگاه‌های نشست سنج نصب شده در هسته مقادیر بیشینه مطلق نشست ایجاد شده در هسته‌ی رسی را ثبت نکرده و مقادیر اندازه‌گیری شده کمی کم‌تر از بیشینه نشست‌های به‌وجود آمده است.

برای نمایش تغییرات نشست هسته‌ی رسی در مقطع دره، منحنی‌های هم‌نشست هسته در مقطع طولی دره و در محل محور سد در شکل ۱۲، ارائه شده است. این منحنی‌ها بر اساس اطلاعات ثبت شده توسط دستگاه‌های نشست سنجی که در پنج مقطع ابزارگذاری درون هسته نصب شده‌اند، در زمان‌های مربوط به نیمه‌ی ارتفاع سد (حدود روز 450)، پایان ساخت بدنه‌ی سد (حدود روز 970)، 10 ماه پس از شروع آب‌گیری (حدود روز 1850) و 35 ماه پس از شروع آب‌گیری (حدود روز 2600) ترسیم شده‌اند. موقعیت پنج دستگاه نشست سنج نصب شده در هسته‌ی رسی که از اطلاعات آن‌ها در ترسیم این کنتورها استفاده شده نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که نشست هسته‌ی رسی در مقطع دره تقریباً متقارن بوده و مقدار بیشینه نشست در محدوده‌ی

میانی دره و در حوالی مقطع بیشینه رخ داده است.



شکل (۱۲) منحنی های هم نشست هسته (برحسب متر) در مقطع طولی دره در روزهای مختلف از شروع خاکریزی

ملاحظه می شود که بخش عمده ی نشست ایجاد شده از شروع خاکریزی بدنه تا آخرین قرائت ها، در حین ساخت

بدنه ی سد به وجود آمده و نشست های ایجاد شده پس از پایان ساخت، سهم کمتری از نشست کل را شامل می شوند. این امر مؤید این واقعیت است که اصلی ترین بارهای وارده بر بدنه ی سد، بارگذاری ناشی از خاکریزی خود بدنه در حین ساخت آن است و بارگذاری های پس از پایان ساخت مانند آبگیری مخزن، در صورت اجرای مناسب پوسته ی بالادست، آثار کمتری بر تغییر شکل ها و جابجایی های بدنه ی سد دارند.

۵- کرنش های هسته در راستای طولی دره

با توجه به عرض کم دره ی محل سد مارون و شیب نسبتاً تند نشیمنگاه هسته ی سد، امکان نشست نابرابر در امتداد طولی (به موازات محور سد) وجود داشته است. این نشست نابرابر موجب حرکت بدنه ی سد به سمت مرکز دره و ایجاد کرنش کششی در راستای طولی هسته می شود که می تواند منجر به بروز ترک های عرضی در قسمت فوقانی هسته شود [۱۰]. برای رفتارنگاری این پدیده، مجموعاً ۵۸ عدد کرنش سنج الکتریکی در چهار ردیف به موازات محور سد، در رقومهای فوقانی و نزدیک به تکیه گاه ها (دو ردیف در تراز ۴۷۵ و دو ردیف در تراز ۴۹۵) نصب شده است. با توجه به نتایج ابزار مذکور، روند کلی تغییرات کرنش در چهار ردیف کرنش سنج یادشده مشابه یکدیگر بوده و به عنوان نمونه، تغییرات کرنش در هسته ی رسی و در امتداد موازی با محور سد، در مقابل فاصله از تکیه گاه، برای دستگاه های کرنش سنج واقع در جناح راست - تراز ۴۷۵ متر، در شکل ۱۳ ارائه شده است. با توجه به این شکل و براساس روند کلی تغییرات کرنش در طول دره که توسط دیگر کرنش سنج ها نیز ثبت شده است، در مجاورت تکیه گاه ها، کرنش ها از نوع کششی بوده و با فاصله گرفتن از تکیه گاه به سرعت از مقدار

حدود ۷ متر اندازه‌گیری شده است؛ پس این کرنش تنها بیانگر کرنش متوسط توده‌ی خاک در فاصله‌ی مذکور بوده و الزاماً برابر بیشینه کرنش موضعی به‌وجود آمده در ناحیه مذکور نیست. بنابراین با توجه به این‌که مقادیر بیشینه کرنش‌های کششی عمدتاً در مجاورت تکیه‌گاه‌ها رخ می‌دهند، برای ایجاد امکان ارزیابی دقیق‌تر مقادیر این کرنشها، استفاده از تعداد حسگرهای بیش‌تر و کاهش فاصله‌ی بین آنها در این نواحی می‌تواند مفید باشد.

۶- نتیجه‌گیری

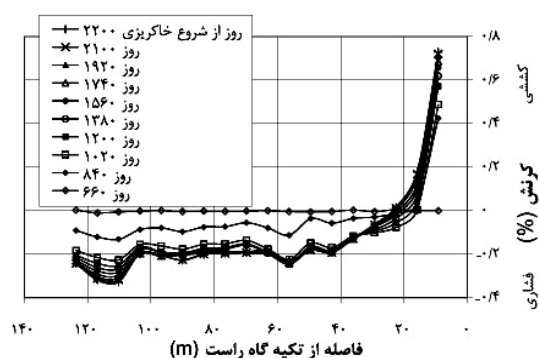
با توجه به بررسی‌ها و مطالعه‌ی انجام شده، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- مهم‌ترین بارهای وارد بر بدنه‌ی سدهای خاکی در شرایط عادی ساخت و آب‌گیری، بارگذاری ناشی از خاک‌ریزی خود بدنه است. به‌طوری‌که بخش اعظم تغییرات ایجاد شده در مقادیر تنش‌ها، فشار آب‌های حفره‌ای و هم‌چنین جابجائی‌ها و تغییرشکل‌های بدنه، در حین ساخت سد رخ می‌دهند و بارگذاری‌های پس از ساخت، نقش کم‌تری در ایجاد تغییرات یادشده دارند.

- بخشی از اختلافات مشاهده شده بین قرائت‌های پیرومترهای هم تراز نصب شده در هسته سدهای خاکی که تقریباً دارای شرایط بارگذاری و طول زه‌کشی یکسانی هستند، می‌تواند ناشی از تفاوت بین درصد رطوبت‌های اولیه‌ی مصالح هسته در نواحی مختلف بوده که باعث اختلاف در درصد اشباع و در نتیجه پارامتر B اسکمپتون مصالح شود.

- با توجه به نفوذپذیری کم مصالح هسته، آثار تغییرات تراز آب مخزن بر روی پیرومترهای نصب شده در هسته، به‌صورت تغییرات تنش کل مشاهده می‌شود، که این تغییرات در سدهای خاکی با هسته‌ی قائم و یا نزدیک به

کرنش‌های کششی کاسته شده و پس از عبور از یک ناحیه‌ی خنثی، کرنش‌ها به صورت فشاری درآمده و به سمت مرکز دره مقدار آنها بتدریج اندکی افزایش می‌یابد. این روند تغییرات، مؤید الگوی عمومی حرکت بدنه‌ی سد به سمت مرکز دره است [۱۰]. بر مبنای داده‌های ثبت شده، مطابق شکل ۱۳، بیشینه کرنش کششی در جناح راست در تراز ۴۷۵ و در فاصله‌ی حدود ۹ متری از تکیه‌گاه اندازه‌گیری شده که مقدار آن با گذشت زمان به تدریج افزایش یافته و در آخرین قرائت به حدود ۰/۷۲ درصد رسیده است. در این‌جا نیز نتایج نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از کرنش کل اندازه‌گیری شده در حین ساخت بدنه‌ی سد به‌وجود آمده است. بیشینه کرنش فشاری در جناح چپ در تراز ۴۷۵ متر در فاصله‌ی حدود ۸۸ متری از تکیه‌گاه اندازه‌گیری شده که مقدار بیشینه آن در آخرین قرائت حدود ۰/۵۷ درصد است، که منحنی‌های مربوط با توجه به مشابه بودن روند تغییرات برای پرهیز از تکرار مباحث ارائه نشده است.



شکل (۱۳) تغییرات کرنش در هسته‌ی رسی در امتداد موازی با محور سد، نسبت به فاصله از تکیه‌گاه راست در تراز ۴۷۵ متر

لازم به توضیح است که بیشینه کرنش کششی ثبت شده در مجاورت تکیه‌گاه‌ها با استفاده از تغییر فاصله‌ی نسبی بین صفحات متصل به یک حسگر [۱۱] و در طولی

مارون، تهران، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، بهمن ۱۳۶۵.

- [6] Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics*, New York, Wiley, 1943.
- [7] Dunnicliff, J., *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, A Wiley-Interscience publication, 1988.
- [8] Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D., *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, Balkema. Rotterdam., 1992.
- [9] MahinRoosta, R., Tabibnejad, A.R., *Back Analyses of Maroon Embankment Dam*, Proc. of 16th ICSMGE, Osaka, Japan, 1893-1896, 2005.
- [10] Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F. & Clevenger, W.A., *Earth and Earth-Rock Dams*, A Wiley-Interscience publication, 1963.
- [11] ASCE Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance, *Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance*, ASCE, 2000.

قائم، به دلیل عدم قرارنگرفتن مستقیم ابزار در زیر ناحیه، نوسانات سطح آب، جزئی است.

- با توجه به اختلاف نشست قابل توجه بین هسته و فیلترها، به نظر می رسد نصب گروه سلول های تنش سنج به همراه یک پیزومتر در نواحی نزدیک به مرز بالادست و پائین دست هسته در سدهای خاکی، می تواند نقش یک آزمایش مقاومت برشی در محل را ایفا کرده و تخمین قابل قبولی از پارامترهای واقعی و طبق ساخت مصالح (که آثار پیچیده ی عوامل مختلف عملی و اجرایی در آن لحاظ شده است)، ارائه دهد.

۷- مراجع

[۱] گزارش فنی نهایی مطالعات مرحله ی دوم سد مخزنی مارون، تهران، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، گزارش شماره ی ۱۷۶۱۰۷۰-۳۰۰۰-۶۰۰، ۱۳۶۵، ص ۲۰-۶۸

[۲] گزارش نهایی مطالعات مرحله دوم زمین شناسی مهندسی سد مخزنی مارون، تهران، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، گزارش شماره ی ۳۱۱۰-۵۳۸-۱۷۶۱۰۷۰، ۱۳۶۵، ص ۱۶-۵

[۳] گزارش بازرسی تفصیلی بدنه سد مخزنی مارون و شبکه ابزار دقیق، تهران، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، گزارش شماره ی ۳۱۷۰-۴۱۶۱-۱۷۸۰۲۰، ۱۳۸۲، ص ۳۶-۴

[۴] گزارش ارزیابی تفصیلی ایمنی و پایداری بدنه سد مخزنی مارون، تهران، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، گزارش شماره ی ۳۱۷۰-۳۱۷۰-۱۷۸۰۲۰، ۱۳۸۲، ص ۸۵-۱۸

[۵] گزارش تجزیه و تحلیل استاتیکی، پایداری و رفتار سد

«Research Note»

Evaluation of Marun Dam Behavior During the Construction and Operation Period Using Instrumentation System Data

A.R. Tabibnejad¹, R. Mahin Roosta^{2*}

1. M.Sc in Geotechnical Engineering, Mahab Ghods Consulting Engineers, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Zanzan University, Zanzan, Iran

reza.mahinroosta@znu.ac.ir

Abstract:

Marun dam with a height of 170m is one of the largest embankment dams in Iran. The dam is a zoned rockfill dam with a central clay core. Due to the importance of safety and stability control of the dam body, a complete monitoring network including different instrumentation systems, has been designed and installed in the dam body.

In this paper, the data obtained from the instruments, installed in the clay core, were processed and interpreted. Based on the outcomes, the behavior of the dam body during the construction in the impounding stage and operation period was evaluated and discussed. This study consists of three major parts including: the pore pressure distributions, stress states conditions in the clay core and evaluation of its settlements and deformations in the dam body.

Keywords: Marun dam, Embankment dam, Clay core, Monitoring network and instrumentation, Stability control.