



یادداشت فنی

بررسی تغییر مکان‌های پی سد بتنی جیرفت با استفاده از اکستنسومترهای سد

عبداله سهرابی بیدار^{1*}، موسی امین نژاد²

پذیرش مقاله: 93/02/15

دریافت مقاله: 92/03/01

چکیده

بهره‌برداری ایمن از سدها متکی بر سه عامل سلامت سازه، پایش رفتار سد و آمادگی برای شرایط اضطرار است. یکی از روش‌های پایش رفتار سد و اجزاء وابسته آن استفاده از نتایج تجهیزات ابزار دقیق نصب شده در نقاط مختلف سازه است. سد جیرفت یک سد بتنی قوسی است که از داده‌های اکستنسومترهای نصب شده آن به منظور تحلیل رفتار پی طی دوره 20 ساله بهره‌برداری سد استفاده شده است. این سد در 40 کیلومتری شمال شرقی شهر جیرفت و بر روی آهک‌های الیگومیوسن ساخته شده است. اکستنسومترهای سد جیرفت از نوع 4 شاخه‌ای بوده و دارای حداکثر عمق 40 متر می‌باشند که در دو وجه بالادست و پایین دست پی نصب شده‌اند. جابجایی‌های پی سد متأثر از بارگذاری مخزن بوده و منحنی‌های بالآمدگی پی بالادست و نشست پی پایین دست هماهنگی نسبی با تغییرات تراز مخزن دارد. به منظور حذف اثرات تغییرات کوتاه مدت سالیانه در تغییر شکل‌های پی از تابع میانگین متحرک استفاده شده است. بیشترین مقادیر بالآمدگی بالادست و نشست پایین دست در بلوک میانی سد و به ترتیب حدود 8 و 3 میلی‌متر می‌باشد. برخی بلوک‌های در پایین دست سد روند عمومی نشست را نشان می‌دهند که در حال حاضر دارای نرخ کمتر از 0/1 میلی‌متر در سال است. با توجه به دوام و ادامه نشست پایین دست در سالیان اخیر در بلوک‌های مذکور لازم است پایش رفتار سد به طور مرتب به انجام رسیده و هر گونه تغییری در روند جابجایی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: ایمنی سد، بهره‌برداری سد، اکستنسومتر، رفتار پی، نرخ جابجایی، سد جیرفت

1. استادیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، sohrabi@khayam.ut.ac.ir

2. کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دفتر بهره‌برداری از تأسیسات تأمین آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران

* مسئول مکاتبات

1. مقدمه

سدها یکی از انواع سازه‌های بزرگ و مهم می‌باشند که در کنار مزایای بی شمار حاصل از آنها نظیر توسعه کشاورزی، تأمین آب شرب، تولید نیروی برق آبی، کنترل سیلاب و... با توجه به ذخیره حجم عظیمی از آب در دریاچه سد، می‌توانند به عنوان یک خطر بالقوه محسوب شوند. از این حیث توجه به ایمنی سدها در دوران بهره برداری اهمیت ویژه‌ای دارد. سوابق گسیختگی سدهای بزرگ ضمن تأیید پتانسیل خطر ناشی از سدها، تجربیات ارزشمندی را فراروی بهره برداران قرار داده است. در سده گذشته گسیختگی سدهای بزرگی نظیر سن فرانسیس (Rogers, 2006)، مالپاسه (Londe, 1987)، و تتون (Seed and Duncan, 1987) به ثبت رسیده است. علیرغم پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه دانش سدسازی و فناوری‌های مرتبط همچنان اخبار گسیختگی سدهای بزرگ در سالیان گذشته وجود داشته و از جمله آن می‌توان به گسیختگی سد شیخ‌کانگ تایوان (Sugimura et al., 2001) و سدهای زیزون سوریه و گلاشوت آلمان (Chanson, 2009) اشاره نمود. تجربیات اخیر ایمنی سد را مبتنی بر سه مولفه، سلامت و یکپارچگی سازه ای، پایش و بررسی مداوم رفتار سد و سازه‌های وابسته و آمادگی مقابله با شرایط اضطراری معرفی کرده است (Biederman, 1985; Pougatsch et al., 1998). بدیهی است در تدوین و تکمیل این مولفه‌ها، زمین شناسی ساختگاه سد و سازه‌های وابسته نقش بسزایی خواهند داشت. بررسی و تفسیر داده‌های ابزار دقیق یکی از مهمترین فرایندهای پایش سدها و ارزیابی ایمنی در دوره بهره برداری سد محسوب می‌شود. علیرغم اهمیت بسیار زیاد این تجهیزات و داده‌های حاصل از آنها در دوران بهره‌برداری سد، توجه اندکی به این مقوله صورت گرفته و پژوهش‌های انگشت شماری در این زمینه در دسترس است (Ahangari and Noorzad, 2010; Kamali et al., 2012; Mirghasemi, 2006; Sohrabi-Bidar et al., 2010, 2011). پژوهش حاضر به بررسی رفتار پی سد بتنی جیرفت با استفاده از داده‌های حاصل از اکستنسومترهای چند شاخه‌ای پرداخته

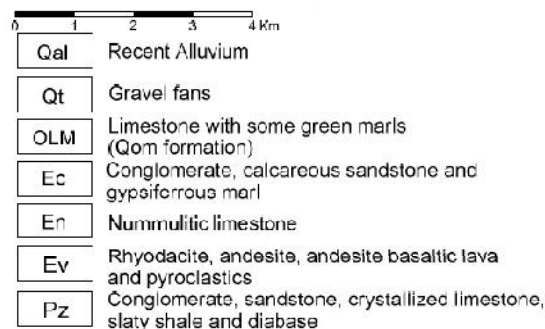
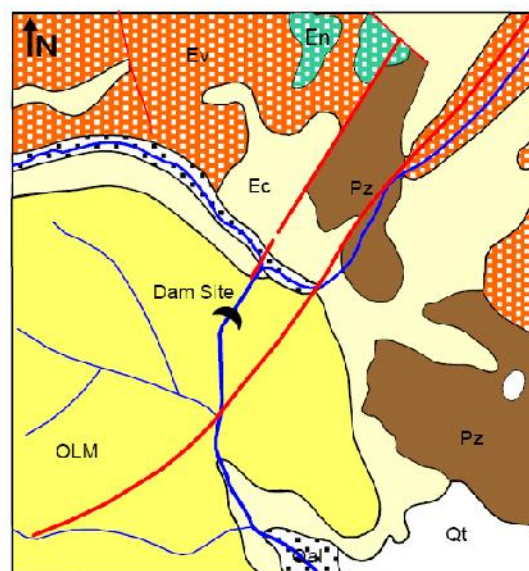
است. علیرغم وجود تجربه چندین سال بهره‌برداری از سدهای بتنی کشور، تجربیات منتشر شده‌ای از رفتار پی سدها در دوران آبیگری و بهره‌برداری منتشر نشده است. وجود چنین تجربیاتی از رفتارهای متعارف پی سدها در دوران آبیگری و بهره‌برداری می‌تواند به شناسایی رفتارهای نابهنجار پی سد در موارد مشابه کمک نموده و از بروز حوادث و خطرات احتمالی جلوگیری نماید.

2. ویژگی‌های زمین شناسی ساختگاه سد

سد جیرفت در 40 کیلومتری شمال شرقی شهر جیرفت (سبزواران) احداث شده است. گستره ساختگاه سد جیرفت از نظر ساختاری در زون ایران مرکزی قرار گرفته است. شکل 1 نقشه زمین شناسی ساده شده محدوده سد جیرفت را بر اساس نقشه زمین‌شناسی ورقه سبزواران (باباخانی، 1371) و اسفندقه (شهرکی قدیمی، 1370) نشان می‌دهد. قدیمی‌ترین برونزدهای سنگی در محدوده ساختگاه سد از سنگ‌های کنگلومرا، ماسه سنگ، آهک‌های کریستالین، شیل‌های اسلیتی و دیاباز می‌باشد که متعلق به دوران پالئوزوئیک و دوره‌های پیش از پرمین (دونین تا کربنیفر) هستند. در بخش‌های شمالی محدوده ساختگاه سنگ‌های آذرین آتشفشانی دوره ائوسن از جنس ریوداسیت، آندزیت و آندزیت بازالت همراه با رسوبات آذرآوری گسترش دارد. بر روی این رسوبات آتشفشانی، در برخی از نقاط آهک‌های نومولیتی شاخص ائوسن دیده می‌شود. سنگ‌های آتشفشانی دوره ائوسن با رسوبات کنگلومرای، ماسه سنگ‌های آهکی و مارن‌های گچ دار ائوسن پایانی پوشیده می‌شود. جدیدترین برونزدهای سنگی ساختگاه متعلق به سازند قم با سن الیگومیوسن می‌باشد که دارای ترکیب سنگ شناسی متنوعی از آهک و مارن هستند. نهایتاً پادگانه‌ها در مناطق کم ارتفاع و رسوبات جوان عهد حاضر در بستر رودخانه‌ها سنگ‌های قدیمی تر را می‌پوشانند (شهرکی قدیمی، 1370).

1184 متر و تراز تاج سد 1188/5 متر می‌باشد. عرض سد در پی 17 متر و در تاج سد 5 متر است. ساخت سد در اوائل دهه 60 آغاز و عملیات ساختمانی بدنه سد و نصب تجهیزات در اواخر سال 1371 به پایان رسید. شکل 2 پلان سد جیرفت و مقطع قائم آن را نشان داده است. برای انحراف آب در طی دوره ساخت از دوتونل تکیه گاه چپ استفاده شده است.

به منظور بازرسی بدنه سد و اندازه‌گیری تجهیزات ابزار دقیق نصب شده در بدنه و پی سد 6 گالری افقی در ترازهای مختلف سد و تکیه‌گاه‌ها اجرا شده است. به منظور پیش رفتار از تجهیزات مختلفی شامل پاندول مستقیم و معکوس، شیب سنج، پیزومتر، اکستنسومتر، ترمومتر، درزسنج و ایستگاه‌های سنجش دبی نشت استفاده شده است. شکل 2 همچنین محل و تراز نصب اکستنسومترهای پی سد جیرفت را نشان داده است. چنان که مشاهده می‌شود، اکستنسومترهای نصب شده در تکیه‌گاه چپ در سه تراز مختلف و اکستنسومترهای نصب شده در تکیه‌گاه راست در 2 تراز مختلف قرار گرفته‌اند. همچنین اکستنسومترهای پی سد جهت سنجش پاسخ پی، در پایین‌ترین تراز گالری‌های بازرسی و منطبق بر محل بیشینه ارتفاع سد قرار دارند. در هر یک از ترازهای نصب، با هدف بررسی وضعیت تغییر مکان‌های پی در بالادست و پایین‌دست سد، یک اکستنسومتر به سمت بالادست و یک اکستنسومتر به سمت پایین‌دست سد نصب شده است. اکستنسومترها بر سطح شیب توپوگرافی عمود بوده و با زاویه 45 درجه نسبت به محور سد نصب شده‌اند. این اکستنسومترها از نوع چند شاخه‌ای می‌باشد که امکان بررسی جابجایی نسبی بین نقاط را فراهم می‌نماید. شکل 3 نمایی از چگونگی عملکرد یک اکستنسومتر چند شاخه‌ای را نشان می‌دهد. انتهای میله اکستنسومتر با استفاده از تزریق دوغاب به بدنه سنگی متصل می‌گردد. میزان جابجایی سر آزاد میله در سطح گمانه، تغییر مکان نسبی بین سر گمانه و نقطه عمقی را نشان خواهد داد. در صورتی که نقطه عمقی ثابت در نظر گرفته شود (این فرض به خصوص هنگامی که نقطه انتهایی خارج از حوزه تنش سازه است قریب به واقعیت



شکل 1. زمین‌شناسی ساختگاه سد جیرفت (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ورقه سبزواران و اسفندقه)

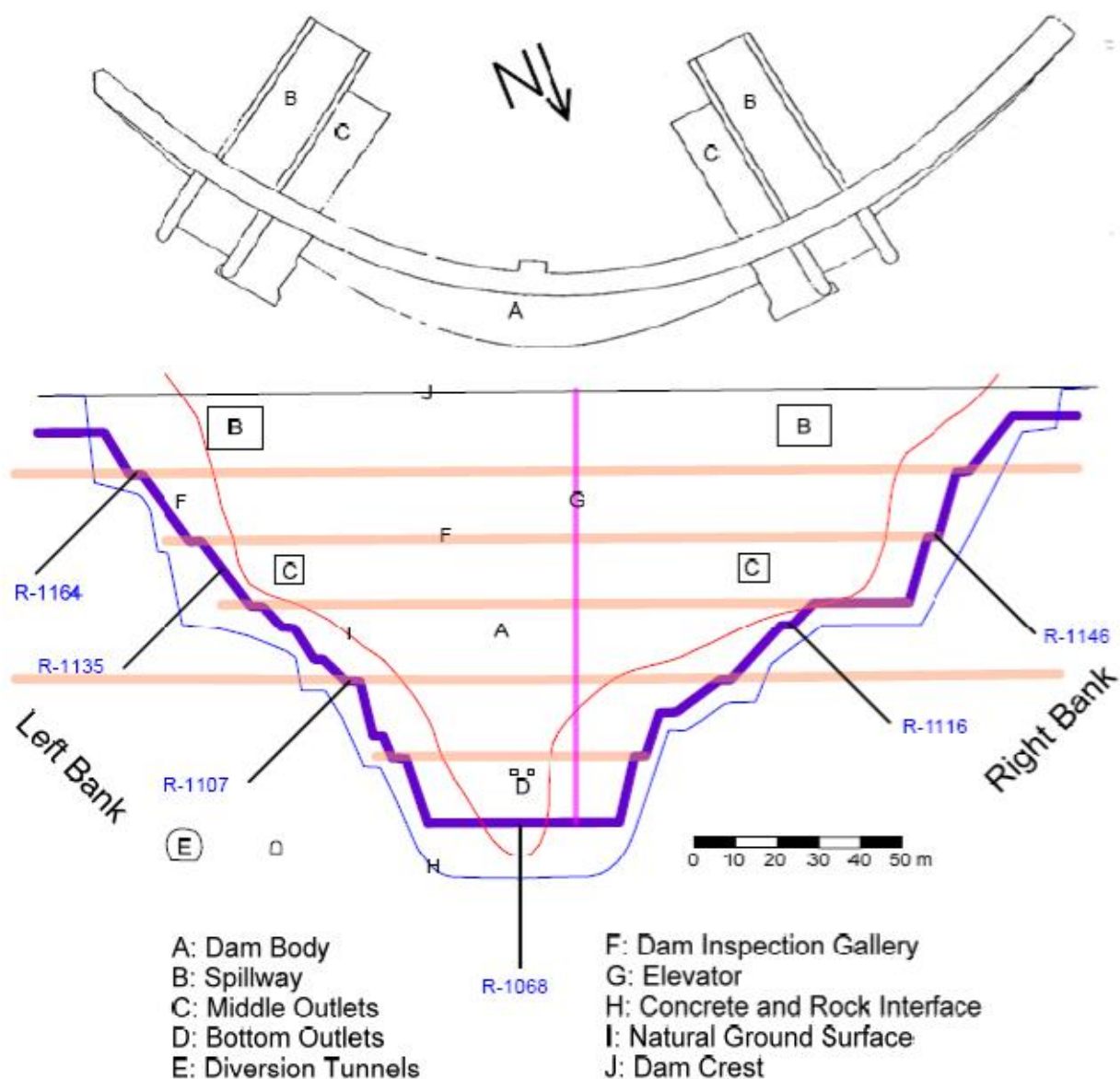
ساختگاه سد جیرفت در مختصات جغرافیایی 57/47 درجه شرقی و 28/86 قرار دارد. محل احداث سد دره‌ای تنگ بوده و پی و تکیه‌گاه‌های سد بر روی آهک‌های سازند قم قرار گرفته است. این آهک‌ها اگرچه از لحاظ مقاومت و ویژگی‌های دگرشکلی دارای شرایط مناسبی هستند، اما به منظور آب‌بندی سد پرده تزریق تا رسیدن به لایه‌های کنگلومرای ائوسن پایانی ادامه یافته است. ضمن آنکه برای بهبود شرایط پی و تکیه‌گاه‌ها تزریق تحکیمی نیز به انجام رسیده است.

3. مشخصات سد جیرفت و اکستنسومترهای پی سد

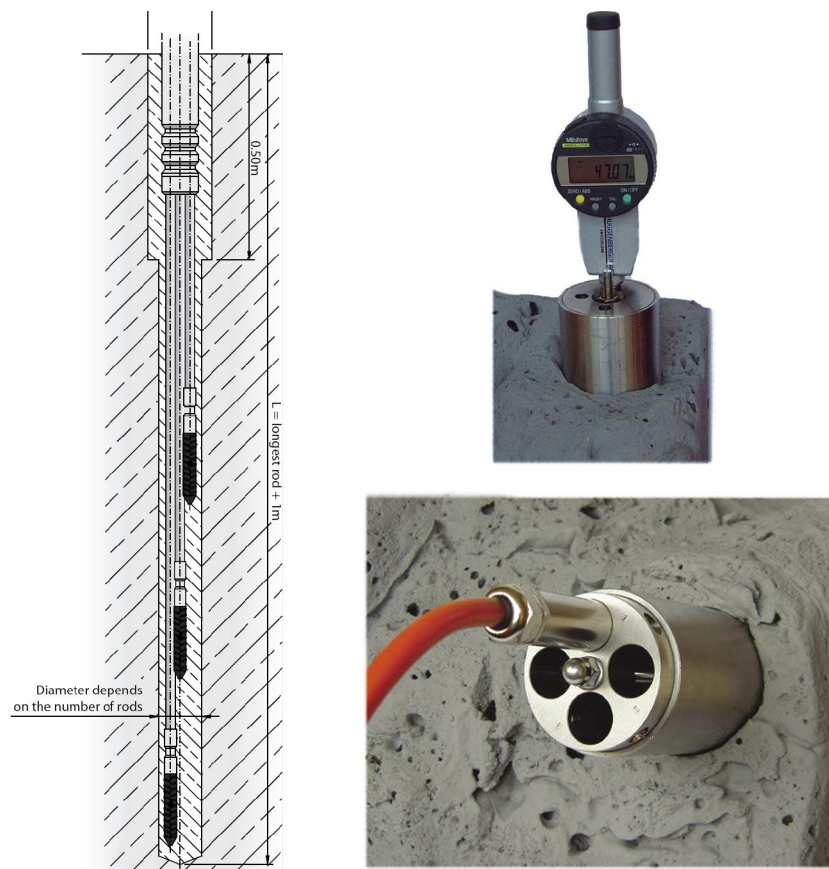
سد جیرفت از نوع بتنی نازک دو قوسی با ارتفاع حداکثر 133 متر از پی و طول تاج 250 متر می‌باشد که امکان ذخیره 425 میلیون متر مکعب آب را فراهم می‌نماید. تراز نرمال سد

پس از نصب اکستنسومتر اولین قرائت به عنوان قرائت صفر به انجام رسیده و جابجایی انتهای آزاد میله در قرائت‌های بعدی نسبت به قرائت صفر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

خواهد بود) جابجایی سر آزاد میله اکستنسومتر با عکس جابجایی نقطه سطح گمانه متناظر خواهد بود. در قرائت اکستنسومترها موقعیت سر آزاد میله نسبت به یک سطح مبنا با دقت بالا (در حد 0/01 میلی‌متر) سنجیده می‌شود. در عمل،



شکل 2. پلان و مقطع سد جیرفت و موقعیت اکستنسومترهای سد (اداره کنترل و پایداری سد جیرفت، 1390، با تغییرات)



شکل 3. نحوه قرارگیری اکستنسومترهای چند شاخه‌ای (ASCE, 2000) و تجهیزات قرائت آنها

4. بررسی رفتار پی سد

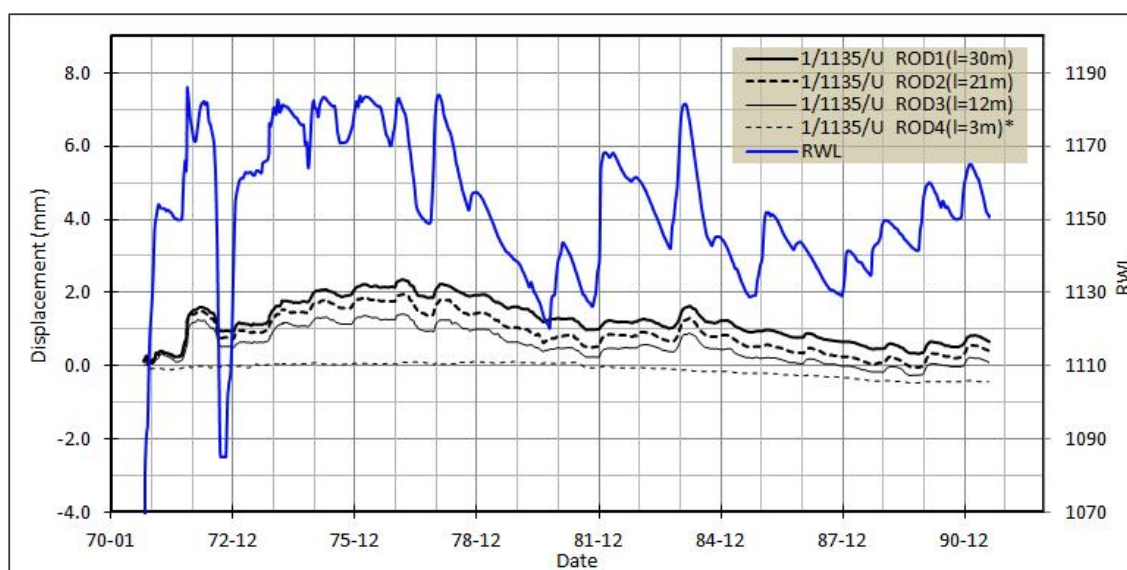
مهمترین عامل موثر در رفتار استاتیکی سدهای بتنی و اجزاء وابسته به آن از جمله پی سد، بارگذاری و باربرداری ناشی از تغییرات تراز مخزن سد می‌باشد که در کنار جابجایی پی سد مورد توجه قرار گرفته است. به منظور بررسی رفتار پی سد جیرفت طی 21 سال بهره‌برداری، داده‌های اکستنسومترهای سد مورد بررسی قرار گرفته است. جدول 1 مشخصات اکستنسومترهای مورد استفاده در این پژوهش را نشان داده است. اکستنسومترها از نوع 4 شاخه‌ای بوده و با تواتر 2 هفته یکبار قرائت گردیده‌اند. طول میله اکستنسومترها در نقاط و شاخه‌های مختلف متفاوت و از حداقل 3 متر در شاخه شماره چهار اکستنسومتر R-1164U تا 40 متر در شاخه شماره یک اکستنسومتر R-1068D تغییر می‌کند. با در اختیار داشتن قرائت صفر اکستنسومترها مقدار جابجایی سطح گمانه نسبت به نقطه انتهایی اکستنسومتر محاسبه شده است.

جدول 1. مشخصات اکستنسومترهای مورد استفاده (اداره کنترل و پایداری سد جیرفت، 1390)

شناسه اکستنسومتر	شماره بلوک	طول شاخه‌ها			
		R1	R2	R3	R4
R-1164U	0	30	21	12	3
R-1164D	0	39	30	21	12
R-1135U	1	30	21	12	3
R-1135D	1	36	27	18	9
R-1107U	2	37	27	17	7
R-1107D	2	37	27	17	7
R-1068U	7	38	28	18	8
R-1068D	7	40	31	22	13
R-1116U	13	35	25	15	5
R-1116D	13	38	28	18	8
R-1164U	14	33	23	13	3
R-1164D	14	36	27	18	9

گمانه و نقطه عمقی میله با بیشترین طول به ثبت رسیده است. نقطه انتهایی میله دارای کمترین طول در داخل بتن قرار گرفته و جابجایی نسبی نزدیک به صفر را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین جابجایی نسبی در عمق 3 تا 12 متر بین انتهای ثابت میله دارای کوتاه‌ترین طول و میله بلندتر رخ داده است. جابجایی نسبی بین اعماق 12 تا 21 و 21 تا 30 اندک و عموماً ثابت بوده است.

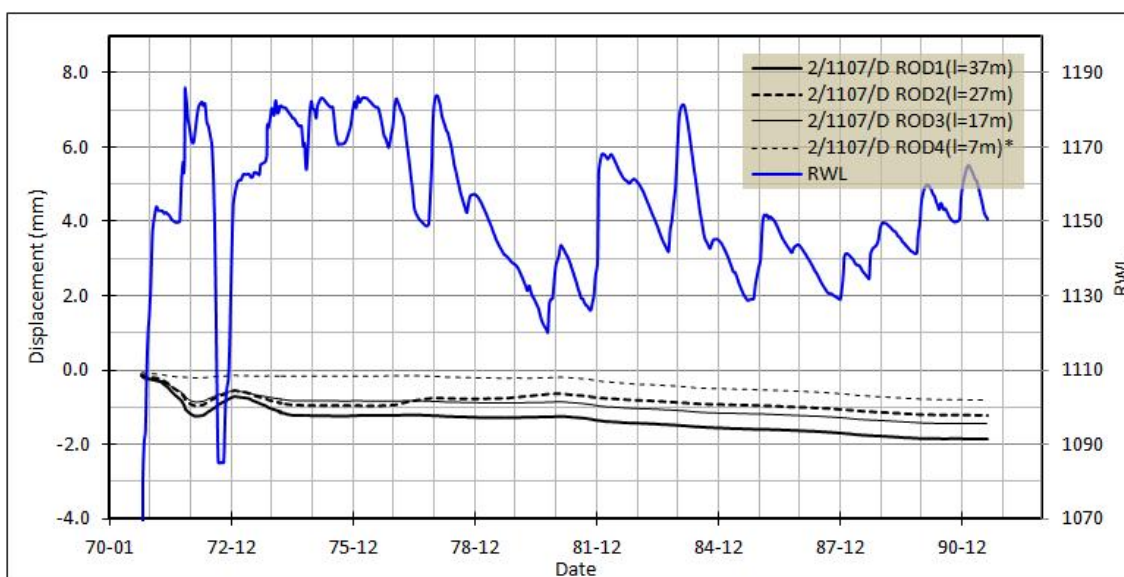
شکل 4 به عنوان نمونه جابجایی سطح گمانه نسبت به نقاط انتهایی اکستنسومترهای R-1135U را نشان می‌دهد. این اکستنسومتر به سمت بالادست سد قرار دارد. همزمان با شروع آبیگری در اثر چرخش پی به سمت پایین‌دست، پی سد به سمت بالا حرکت کرده است. این نمودار جابجایی سطح گمانه اکستنسومتر در نقطه اندازه‌گیری (محل گالری بازرسی) نسبت به نقاط عمقی ثابت اکستنسومترها را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود، بیشترین جابجایی‌های نسبی بین سطح



شکل 4. جابجایی در اکستنسومتر R-1135U

نسبت به نقاط انتهایی میله‌های اکستنسومتر R-1107D در پایین‌دست را پس از اعمال تابع میانگین متحرک نشان می‌دهد. به طور کلی در پایین‌دست سد دامنه جابجایی‌ها در مقایسه با بالادست کمتر بوده و چنان که انتظار می‌رود با شروع آبیگری و چرخش پی سد، اکستنسومترهای پایین‌دست نشست اندکی را نشان می‌دهند. بیشترین جابجایی در پی سد جیرفت، بالاآمدگی حدود 8 میلی‌متری در بالادست در محل بلوک میانی سد و نشست حدود 3 میلی‌متری پی در پایین‌دست همان بلوک می‌باشد.

علاوه بر تغییرات کلی روند جابجایی که متأثر از دوره‌های ترسالی و خشکسالی است، جابجایی‌های پی سد دارای تغییرات کوتاه مدت یک ساله متأثر از تغییرات کوتاه مدت تراز دریاچه و متناسب با آن بوده است. با هدف بررسی روند دراز مدت تغییرات پی سد، اثرات تغییرات کوتاه مدت با تابع میانگین متحرک حذف شده است. برای این منظور از تابع میانگین متحرک با درجه 24 (متناسب با میانگین تعداد قرائت‌های سالیانه) استفاده شده است. شکل 5 به عنوان نمونه جابجایی سطح گمانه (پی سد در محل گالری بازرسی تحتانی)



شکل 5. مقادیر جابجایی پس از اعمال تابع میانگین متحرک در اکستنسومتر R-1107D

بارگذاری سد تظاهر خواهد نمود. در یک رفتار ارتجاعی انتظار می‌رود، محدوده جابجایی‌های پی در چرخه‌های بارگذاری و باربرداری ثابت باشد. در سد جیرفت روند دائمی نشست پی سد در برخی از اکستنسومترها پایین‌دست سد نمونه‌ای از تغییر شکل‌های دائمی و برگشت ناپذیر می‌باشد. بررسی نرخ جابجایی سالیانه نشان می‌دهد، در بالادست سد اگرچه مقادیر نرخ جابجایی متأثر از تغییرات تراز مخزن می‌باشد، اما همواره روندی کاهشی داشته است. در پایین‌دست سد نرخ جابجایی وابستگی اندکی به تغییرات تراز مخزن نشان داده و پس از آگیری کامل در سال‌های اولیه بهره‌برداری به شدت کاهش یافته و در حال حاضر نرخ نشست کمتر از 0/1 میلی‌متر در سال است.

5. نتیجه گیری

در این مقاله نمونه‌ای از رفتار پی یک سد بر اساس داده‌های اکستنسومترهای نصب شده در بالادست و پایین‌دست پی مورد بررسی قرار گرفت. تغییر شکل‌های پی سد متأثر از بارگذاری مخزن بوده و با افزایش تراز مخزن و چرخش سد به سمت پایین‌دست، بالا آمدگی پی در بالادست و نشست آن در پایین‌دست مشاهده شده است. بیشترین مقادیر بالا آمدگی

مهمترین تغییر رخ داده در جابجایی‌های نسبی پی سد تغییر روند عمومی جابجایی‌ها با شروع خشکسالی رخ داده در اواخر دهه 70 می‌باشد. همگام با کاهش تراز مخزن در این دوره در وجه بالادست نشست پی رخ داده است. با توجه به کاهش تراز مخزن و باربرداری از بدنه و پی سد و چرخش سد به سمت بالادست انتظار می‌رود بالا آمدگی پی در پایین‌دست رخ دهد. اگرچه در اغلب اکستنسومترهای نصب شده پایین‌دست شواهدی از بالا آمدگی اندک پی دیده می‌شود، اما برخی از اکستنسومترها همچنان ادامه نشست را نشان می‌دهند. با افزایش تراز مخزن در دوره بعدی ترسالی مجدداً بالا آمدگی در بالادست و افزایش نشست پی در پایین‌دست قابل مشاهده می‌باشد. در دوره خشکسالی انتهایی نیز اکستنسومترهای سد در بالادست سد نشست پی را نشان می‌دهند اما نتایج اکستنسومترهای پایین‌دست بر خلاف انتظار همچنان روند نشست را نشان می‌دهد؛ اگرچه مقادیر نشست بسیار کوچک می‌باشد.

یکی از عوامل اصلی تهدید ایمنی سدها در طی دوران بهره برداری رفتار پلاستیک و جابجایی برگشت ناپذیر پی تحت بارهای مخزن سد می‌باشد (Lombardi, 2004). این مسئله به صورت تغییر مقادیر جابجایی‌های پی در طی چرخه‌های

میلی متر در سال بوده است. اگرچه نرخ نشست مورد اشاره بسیار کوچک می باشد، اما با توجه به دوام آن در طی چند سال گذشته لازم است پایش رفتار سد به طور مرتب به انجام رسیده و هر گونه تغییری در روند جابجایی ها مد نظر قرار گیرد.

بالادست و نشست پایین دست در بلوک میانی سد و به ترتیب حدود 8 و 3 میلی متر می باشد. بخشی از تغییر شکل های پی سد جیرفت، غیر ارتجاعی و برگشت ناپذیر می باشد. به خصوص در پایین دست سد نشست مداوم با نرخ بسیار کم وجود دارد. مقادیر نرخ نشست در سالیان اخیر کمتر از 0/1

منابع

- اداره کنترل و پایداری سد جیرفت، 1390. گزارش رفتار نگاری سد جیرفت، شرکت سهامی آب منطقه ای کرمان. وزارت نیرو.
- باباخانی، ع.ر. و همکاران، 1371. نقشه زمین شناسی ورقه سبزواران، نقشه های زمین شناسی ایران سری 1:250000. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، وزارت صنایع و معادن.
- شهرکی قدیمی، ع.، 1370. نقشه زمین شناسی و شرح زمین شناسی ورقه اسفندقه، نقشه های زمین شناسی ایران سری 1:100000. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، وزارت صنایع و معادن.
- Ahangari K., Noorzad A., 2010, Use of casing and its effect on pressure cells. *Mining Science and Technology*, 20(3): 384-390.
- ASCE, 2000, Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance, American Society of Civil Engineers, pp. 712.
- Biederman R., 1985. Dam safety in Switzerland, *Swiss Dams – Monitoring and Maintenance*. Swiss National Committee on Large Dams, Switzerland.
- Chanson H., 2009. Embankment Overflow Protection Systems and earth Dam Spillways, In: *Dams: Impacts, Stability and Design*, Editors: Walter P. Hayes and Michael C. Barnes, Chap 4, pp. 101-132.
- Kamali B.H., Ahangari K., Hosseini Shirvani M., 2012. Displacements Prediction in Double-Arch Dam Rock Abutment Using SPSS Software Based on Extensometer Readings Case study: Karun 4 Concrete Dam. *Iran Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(22): 4607-4616.
- Lombardi G., 2004. *Advanced Data Interpretation for Diagnosis of Concrete Dams, Structural Safety Assessment of Dams*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Italy.
- Londe P., 1987. The Malpasset Dam Failures. *Engineering Geology*, 24:295-329.
- Mirghasemi A.A., 2006. Karkheh Dam Instrumentation System-Some Experiences, *Geotechnical News*, 24(1): 32-36.
- Pougatsch H., Müller R.W., Kobelt A., 1998. Water alarm concept in Switzerland". *Proceedings of the International Symposium on new Trends and Guidelines on Dam Safety*, Barcelona, Spain, Berga ed.. Balkema, Rotterdam, pp. 235-242.
- Rogers J.D., 2006. Lessons learned from the St Francis dam failure. *Geostrata*, 6 (2): 14-17.
- Seed H.B., Duncan J.M., 1987. The Failure of Teton Dam. *Engineering Geology*, 24:173-205.
- Sohrabi-Bidar A., Noorbakhsh S.M.M, Amin-Nejad M., 2011. On Accuracy of inclinometers measured data in Sabalan Dam, Iran. *Proceedings of 79th Annual Meeting of International Commission on Large Dams*, 29 May– 3 June, Lucerne, Switzerland.
- Sohrabi-Bidar A., Noorbakhsh S.M.M., Imanshoar F., 2010. State of Stress on the Karkheh Dam using Instrumentation Data. *78th Annual Meeting of the International Commission on Large Dams*, 23 – 26 May, Hanoi, Vietnam.
- Sugimura Y., Miura S., Konagai K., 2001. Damage to Shihkang dam inflicted by faulting in the September 1999 Chi-Chi earthquake. In: *Proc. Workshop on Seismic Fault-induced Failures*, ed. Konagai et al., Univ. of Tokyo, Japan.