

آنالیز پایداری بدنه و پی سد بتنی دوقوسی زاینده‌رود با استفاده از نتایج ابزار دقیق و شبیه‌سازی عددی

لهراسب فرامرزی^{۱*}؛ آیین حریت^۲

چکیده

حفاظت، نگهداری و پایش رفتار سد، تشخیص خرابی و تعمیر به موقع آن برای پیشگیری از وقوع خطرات احتمالی و افزایش طول عمر سد چه در زمان ساخت و چه در زمان بهره‌برداری توسط ابزار دقیق انجام می‌شود. در این مقاله داده‌های ابزار دقیق سد زاینده‌رود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با مقایسه نتایج حاصل از ابزارهای مختلف، وضعیت پایداری سد، پی و تکیه‌گاه‌ها ارزیابی شده است. در پایان شبیه‌سازی عددی پی و بدنه با در نظر گرفتن محل دقیق ابزار با استفاده از روش اجزای مجزا انجام شد. اثر سختی برشی و نرمال بر جابجایی‌های بدنه و پی بررسی شده و مقادیر واقعی آنها به عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی عددی انتخاب شد. در این تحقیق معیار تسلیم موهر کولمب برای درزه‌های بین بلوک‌ها و در مرز سنگ پی و بدنه استفاده شد و مقایسه بین تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار و مقادیر محاسبه شده بوسیله شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و همخوانی خوبی بین نتایج دیده شد. نتایج حاصل از تحلیل رفتارنگاری ابزار و شبیه‌سازی عددی نشان داده است که رفتار سد منظم و پایدار است و به دلیل ضعیف بودن وضعیت زمین‌شناسی جناح راست، جابجایی‌های بدست آمده در مقایسه با جناح چپ دارای مقادیر بیشتری است.

کلمات کلیدی

ابزار دقیق، جابجایی، سختی برشی و سختی نرمال، سنگ پی، شبیه‌سازی عددی

Stability Analysis of Zayandeh-Rud Double arc Dam Body and Foundation Using the Results of Instrumentation and Numerical Modeling

L. Faramarzi and A. Horiyat

ABSTRACT

The instrument performs protection, preservation and control dam behavior, failure detection and timely treatment to prevent the occurrence of the risks and increase the longevity of the dam during construction and operation. In this paper, Zayandeh-Rud dam instrumentation data were analyzed and the stability condition of the dam, foundation and abutments are evaluated. Finally, considering the position of the instruments the distinct element method was employed. The effect of shear and normal stiffness on body and foundation displacements was investigated and the actual values of the shear and normal stiffness were selected as the input model. In this study, Mohr-Coulomb criterion are used for joint behaviors, which are defined as boundary between rock foundation and dam body and boundary between concrete arch blocks, and comparison between measured and calculated values by numerical models has been investigated and good agreement between the results obtained. Results of numerical modeling and measurements have shown that the dam body and foundation are stable. Due to poor geological condition of right wall of dam,

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۳/۲۴

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۱/۳/۸

^{۱*} نویسنده مسئول و استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان: lfaramarzi@cc.iut.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد معدن؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان: ae19_ho@yahoo.com

the displacements obtained in comparison with the left wall are higher. Also demonstrates that stress and deformation of dam body and foundation, strongly influenced by variation of lake water level.

KEYWORDS

Instrumentation, displacement, shear and normal stiffness, rock foundation, distinct element method

۱- مقدمه

سد سازه‌ی زیربنایی و سرمایه‌ی ملی یک کشور محسوب می‌شود و ساخت آنها هزینه‌های بسیاری همراه دارد. از دیدگاه دیگر، خرابی سد می‌تواند موجب حوادث ناگواری شود. در میان انواع سدهای مختلف، طراحی سدهای بتنی دوقوسی به دلیل هندسه و عملکرد پیچیده، حساس‌تر و دشوارتر است. این سدها به دلیل سختی کم بدنه و وابستگی زیاد به پی و تکیه‌گاهها، نسبت به تغییرشکل‌های حاصل از نیروهای استاتیکی و دینامیکی، بسیار حساس هستند [۱].

برای پیش‌رفت رفتار سدهای بتنی قوسی، ضروری است بارهای وارد بر سد و تغییرشکل‌های بدنه و پی، اندازه‌گیری شود. با توجه به اینکه سدهای بتنی قوسی رفتاری یکپارچه با پی دارند، بنابراین جابجایی‌های بدنه و پی مهم‌ترین عامل نشان‌دهنده رفتار اینگونه سدها است. به این دلیل، نصب ابزارهای مانند انحراف‌سنج‌های مستقیم و معکوس، شیب‌سنج‌ها، زهکش‌ها و استفاده از شبکه ژئودتیک در سدهای بتنی قوسی استفاده می‌شود [۲].

بر اساس آمار کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ جهان در سال ۱۹۷۳ دلایل شکست سدهای بتنی، به میزان ۲۹٪ ناشی از سرریز سیلاب از تاج سد، ۵۳٪ ناشی از مسائل پی و ۱۸٪ به علت اشکالات ساخت و سایر عوامل، گزارش شده است. همان طوری که دیده می‌شود بیش‌ترین درصد شکست در سدهای بتنی، ناشی از مسائل پی بوده است. این شکست‌ها به یکباره رخ نمی‌دهند و شرایط تحقق آن‌ها به تدریج مهیا می‌شود. از این رو با ابزاربندی مناسب و اندازه‌گیری‌های به موقع و مداوم، روند شکست سد قابل شناسایی و تشخیص بوده و با اقدام به موقع بهسازی و تعمیر، می‌توان این روند را پیش و از بروز شکست سد جلوگیری نمود و یا حداقل خسارت وارده را کاهش داد [۲].

بررسی سوابق مطالعات در این زمینه نشان می‌دهد که در ابتدا روش‌های ژئودتیک برای رفتارنگاری سدها توسط بخش ژئودزی سازمان نقشه‌برداری سوئیس پیشنهاد شد. در سال ۱۹۲۰ این سازمان برای ارائه نتایج اندازه‌گیری‌های ژئودتیک در سدها برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های اولیه، تحقیقاتی را در این زمینه انجام داد. سپس در سال ۱۹۲۱ برای تعیین تغییرشکل‌ها در نقاط مرجع مشخص شده در سدها، از این ابزار استفاده نمودند [۲].

سد فرانسوی آمریکا در سال ۱۹۲۸، منجر به پیشرفت روش‌های ژئودتیک توسط لنگ در سال ۱۹۲۹ در سوئیس شد. اولین مقاله منتشر شده توسط او در سال ۱۹۲۹ شامل توسعه و چگونگی نصب شبکه‌های رفتارنگاری و انجام بررسی‌های لازم در این زمینه است. همچنین او در مورد شکست جانبی و مشکلات شکستگی‌های بزرگ در امتداد تاج سد، اخطار داد. تا آن زمان بحث رفتارنگاری سدها فقط به بررسی‌های ژئودتیک خلاصه می‌شد [۵].

کشف ابزارهای ژئوتکنیکی، به عنوان وسیله‌ای برای ثبت مشاهدات صحرائی، در فاصله سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ اتفاق افتاد و بازرسی‌ها از دهه ۶۰ میلادی شروع شد. اولین بازرسی در سدها، در کشور آمریکا انجام شده است که با استفاده از روش‌های سنتی با توجه به فناوری، و تنوع ابزارهای دقیق آن زمان شروع شد [۶].

به طور کلی، در ۵۰ سال اول بعد از روی کار آمدن این ابزار، ابزارهای مکانیکی و هیدرولیکی، برتری داشتند ولی بدنبال آن ابزارهای الکترونیکی دقیقی پا به عرصه گذاشتند. به عنوان مثال می‌توان به ساخت انحراف‌سنج‌های الکترونیکی در سال ۱۹۵۸ و افزایش دقت آنها تا 10^{-8} رادیان توسط بلوم و صالح در سال ۱۹۸۶ و ابزارهای با دقت کمتر از یک نانو رادیان در زمان حاضر اشاره نمود [۲].

رفتارنگاری سازه‌های بزرگی مانند سد، برای پیش‌پایداری آنها، افزایش طول عمر و جلوگیری از آسیب‌های جانی و مالی ضروری است [۷].

با تحلیل و ارزیابی روند تغییرات اندازه‌گیری‌های حاصل از رفتارنگاری سدها به کمک ابزار دقیق، شبیه‌سازی عددی و روشهای تحلیلی، در بسیاری از موارد می‌توان پدیده‌هایی که در حال فرسایش، تضعیف و تخریب سد هستند را پیش از وقوع مشخص نموده، یا اثر آنها را کاهش داد و در پایان خسارات احتمالی وارده را به حداقل ممکن رساند [۸].

در زمینه تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی قوسی به کمک روشهای عددی تحقیقاتی زیادی با استفاده از روش اجزاء محدود، تئوری بلوکی و روش اجزای مجزا انجام شده است [۱۶-۹].

برای انجام این مهم، در این مقاله نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها بوسیله ابزار دقیق نصب شده در سد زاینده‌رود، تحلیل و

سنی متعلق به ژوراسیک هستند. این سنگها در واقع هسته تاقدیسی هستند که پس از فرسایش، دشت آبادچی بر روی آن بنا شده و رودخانه زاینده‌رود از آن عبور می‌نماید. سنگ‌های موجود در تکیه‌گاه راست سد شامل تناوبی از سریسیت شیست، میکاشیست حاوی مسکویت، شیست سیلیسی و کوارتزیت با بین لایه‌هایی از شیست گرافیتی به رنگ خاکستری تیره تا سیاه به ضخامت تقریبی ۲ متر هستند. در تکیه‌گاه چپ سد، سنگ‌ها بیش‌تر شیست‌های سیلیسی، میکاشیست و کوارتزیت به همراه لایه‌های نازکی از شیست آهکی و سنگ آهک هستند. سنگ‌های موجود در محل سد اکثراً دارای شیستوزیته بوده و یا متورق هستند ولی شیست‌های آهکی و کوارتزیت‌ها به صورت توده‌ای دیده می‌شوند [۴].

۴- خصوصیات ژئومکانیکی سنگ بستر و خواص مکانیکی بتن استفاده شده در سد زاینده‌رود

در محل ساختگاه سد، تعداد ۱۹ گمانه اکتشافی با مغزه-گیری پیوسته به طول کل ۱۲۲۶ متر، آزمایش‌های فشار آب در بیش‌تر گمانه‌ها، حفر چهار گالری اکتشافی (دو گالری در هر تکیه‌گاه سد)، انجام ۹ آزمایش بارگذاری برجا در گالری‌ها، برداشت مقاطع ژئوسایزیمیک در روی تکیه‌گاه‌های چپ و راست، برداشت میکروسایزیمیک در هر گالری و برداشت ژئوالکتریک انجام شده است.

آزمایش‌های فشار آب، نشان دهنده نفوذپذیری متوسط در زون سطحی توده سنگ بوده که با افزایش عمق، بسیار کم شده است. در اغلب گمانه‌های اکتشافی، سنگ کف با هوازگی کم تا متوسط در اعماق ۸ تا ۱۲ متری و سنگ سالم در اعماق ۱۲ تا ۱۸ متری دیده شده است. بنابراین سنگ نفوذناپذیر، با مقادیر لوژن کمتر از یک واحد لوژن، در اعماق ۱۰ تا ۲۷ متری مشاهده شده است. نتایج آزمایش‌های بارگذاری برجا در گالری‌های حفر شده نیز مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی نسبتاً بالایی را نشان داده‌اند به طوری که توده سنگ، علیرغم دارا بودن شیستوزیته، لایه بندی ورقه ای و شکستگی، در اعماق ۱۲ تا ۲۰ متری متراکم و سالم است [۴].

خواص مکانیکی بتن مصرفی و سنگ بستر سد زاینده‌رود برای شبیه‌سازی عددی، در جدول (۱) آورده شده است. برای تمام ناپیوستگی‌ها نیز معیار تسلیم کولمب با زاویه اصطکاک ۴۵ درجه و چسبندگی صفر در نظر گرفته شد و سختی نرمال و برشی به ترتیب $10^{12} \times 2/1$ و $10^{12} \times 4/05$ پاسکال بر متر با استفاده از آنالیز برگشتی برای تراز آب ۲۰۱۶ تعیین شده است.

مقایسه شده و وضعیت پایداری سد ارزیابی شده است. در پایان شبیه‌سازی عددی پی و بدنه سد زاینده‌رود با در نظر گرفتن محل دقیق ابزار، بلوک‌های بدنه سد و پیوسته در نظر گرفتن سنگ پی تهیه شده است. سپس تحلیل‌ها بر اساس مشخصات دقیق ژئومکانیکی پی، خواص فیزیکی و مکانیکی بتن و مقادیر واقعی سختی برشی و سختی نرمال بلوک‌های تشکیل دهنده بدنه سد انجام شده است. معیار تسلیم موهر کولمب برای درزه‌های بین بلوک‌ها و در مرز سنگ پی و بدنه استفاده شده و مقایسه بین تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار و مقادیر محاسبه شده بوسیله شبیه‌سازی عددی تحلیل و بررسی شده است.

۲- مشخصات سد زاینده‌رود

سد زاینده‌رود بر روی رودخانه زاینده‌رود در محل آبادچی و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان قرار دارد. این سد با هدف تأمین آب شرب، کشاورزی، صنایع و تامین قسمتی از برق مورد نیاز شهر اصفهان با ساخت نیروگاه برق آبی به ظرفیت ۵۵ مگاوات ساخته شده است. این سد بتنی از نوع دوقوسی ضخیم با مقاطع افقی شلجی و ارتفاع ۱۰۰ متر و طول تاج ۴۵۰ متر است. منحنی شلجی قوس‌ها با توجه به موقعیت طبیعی تکیه‌گاه، سمت راست و همچنین قابلیت تغییرشکل سنگ پی انتخاب شده است. این سد از ۲۸ بخش با مقطع افقی دوزنقه‌ای به عرض ۱۶ متر تشکیل شده است که توسط درزهای ساختمانی "هلیکوئیدال" از یکدیگر جدا شده‌اند. نمایی از سد زاینده‌رود در شکل (۱) آورده شده است [۳].



شکل (۱): نمایی از سد زاینده‌رود

۳- زمین‌شناسی بستر سد

سنگ‌های محدوده سد زاینده‌رود، شامل مجموعه ضخیمی از سنگ‌های سیلیسی با دگرگونی ناحیه‌ای خفیف هستند که از نظر

در بخش تجزیه و تحلیل نتایج، چگونگی تعیین مقادیر سختی برشی و سختی نرمال بین بلوک‌های بدنه سد توضیح داده شده است.

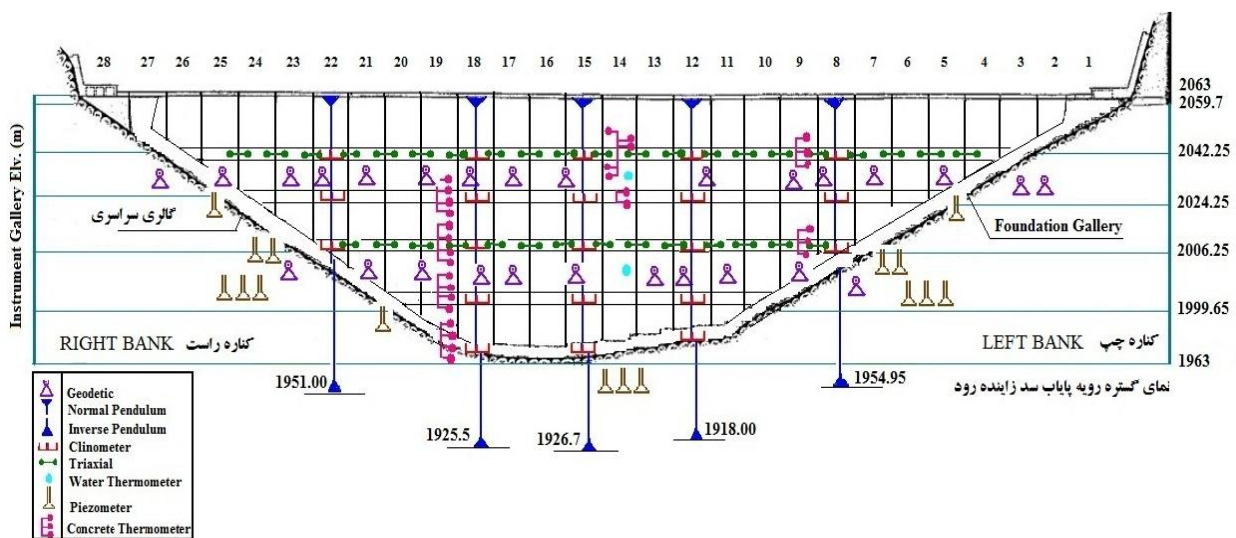
جدول (۱): مشخصات بتن مصرفی و سنگ بستر [۳]

مصالح	ضریب پواسون (ν)	چگالی (ρ) kg/m ³	مدول الاستیسیته (E) N/m ²
بتن	۰/۲	۲۴/۵	۲×10^{10}
سنگ بستر	۰/۲۵	۲۲	$۱/۷ \times 10^{10}$

برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها و جابجایی بدنه و پی سد، تعداد ۵ انحراف‌سنج در بلوک‌های شماره ۸، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۲ نصب شده است. هر بلوک شامل یک انحراف‌سنج مستقیم است که نقطه آویز آن در تاج سد و تراز ۲۰۵۹/۷ قرار دارد و یک انحراف‌سنج معکوس که در پی سنگی، گیردار شده است.

۵- معرفی ابزار دقیق نصب شده در سد زاینده‌رود

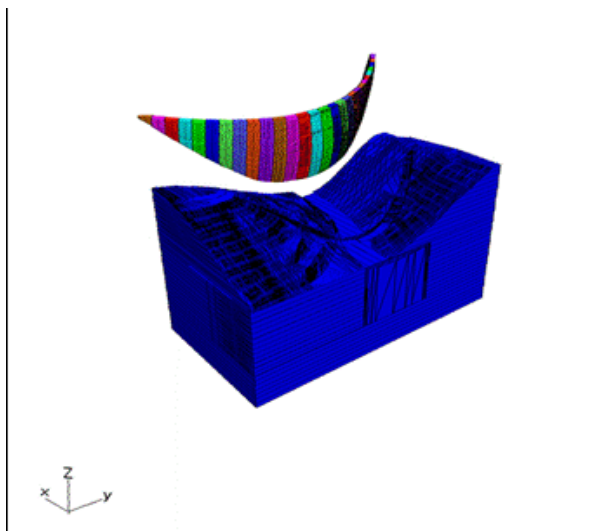
به طور کلی ایمنی سد فقط به طراحی و ساخت آن مربوط نیست، بلکه به رفتارنگاری بدنه و پی در سال‌های اولیه بهره‌برداری و همچنین عملکرد آنها در طول عمر سد وابسته است. بدین منظور بدنه سد، پی و محیط اطراف آن باید به وسایلی برای اندازه‌گیری و پایش پایداری مجهز باشند. اندازه‌گیری‌ها در سد زاینده‌رود از اولین آبرگیری در آذرماه ۱۳۴۸ انجام شد و گزارش‌های سالانه و ارزیابی تفصیلی تا سال ۱۳۶۵ توسط دفتر مهندسين مشاور اشتوکی تهیه و تنظیم شده است. در این مقاله اندازه‌گیری‌های ثبت شده از ابتدای آبرگیری مخزن، سال‌های اولیه بهره‌برداری (۱۹۷۱-۱۹۶۹) و یک دوره ۱۰ ساله از ۲۰۰۷-۱۹۹۶ انتخاب و تحلیل پایداری سد و توده‌سنگ پی انجام شد. شکل (۲)، موقعیت و نوع ابزار دقیق نصب شده در ۲۸ بلوک سد زاینده‌رود، برای پایش رفتار بدنه و پی سد را نشان می‌دهد. ابزارها همه از نوع مکانیکی هستند و نسبت به شرایط آب و هوایی منطقه حساس نیستند.



شکل (۲): ابزار دقیق نصب شده در ۲۸ بلوک سد زاینده‌رود

درزسنج‌های سه محوره در گالری‌های افقی واقع در بدنه سد در ترازهای ۲۰۰۴/۸۵ و ۲۰۴۰/۸۵ در بین درزهای واقع بین بلوک‌ها، برای اندازه‌گیری حرکت بلوک‌ها در جهت‌های مماسی، شعاعی و قائم نصب شده است. دبی زهکش‌ها در گالری‌های افقی در ترازهای ۲۰۰۴/۸۵ و ۲۰۴۰/۸۵ در دو جهت راست و چپ و همچنین در گالری سراسری از بلوک ۱ تا ۲۸ اندازه‌گیری می‌شوند و فشار برکنش در زهکش‌ها به صورت ماهیانه اندازه‌گیری می‌شود. نتایج مربوط به تمام اندازه‌گیری‌ها توسط ابزارهای

در داخل گالری‌های بدنه سد در ترازهای مختلف (شکل‌های ۲ و ۶)، ایستگاه‌های اندازه‌گیری تغییرشکل بدنه و پی در جهت‌های شعاعی (چپ-راست) و مماسی (سراب-پایاب) قرار دارند. برای پایش جابجایی‌های بدنه سد در همه ایستگاه‌های اندازه‌گیری جابجایی توسط انحراف‌سنج‌ها، شیب‌سنج‌هایی نیز در جهت‌های گفته شده قرار گرفته است که نتایج آنها زمان ایجاد تغییرشکل‌های غیرطبیعی، بخصوص در نواحی نزدیک پی، بسیار اهمیت دارد.

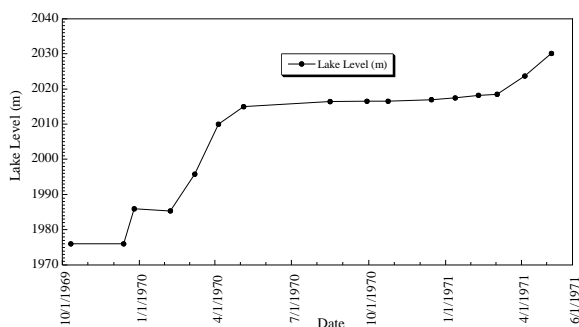


شکل (۳): شبیه‌سازی عددی سد زاینده‌رود در نرم‌افزار 3DEC

۷- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج مربوط به تمام اندازه‌گیری‌ها توسط ابزارهای نصب شده در سد، پی و تکیه‌گاه‌ها در سال‌های ۱۹۷۱-۱۹۶۹ و ۲۰۰۷-۱۹۹۴ برای بلوک مرکزی (بلوک شماره ۱۵) پس از تجزیه و تحلیل کامل، ارائه و با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است. در شکل‌های (۴) و (۵) تغییرات تراز آب مخزن در سال‌های ۱۹۷۲-۱۹۶۹ و ۲۰۰۷-۱۹۹۴ نشان داده شده است. در سال‌های ۱۹۷۱-۱۹۶۹ بالا آمدن سطح آب روند نسبتاً منظمی را نشان می‌دهد.

بیش‌ترین مقدار بالا آمدن سطح آب، تراز ۲۰۳۰/۰۲ متر است که تقریباً ۳۰ متر زیر سطح بیشینه تراز نرمال، یعنی ۲۰۵۹/۷ قرار دارد. در سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۷ بیش‌ترین تراز آب مخزن، مربوط به سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۶ و ۲۰۰۶ است که به ترتیب ۲۰۶۱/۵۳، ۲۰۶۲/۵۸ و ۲۰۶۰/۴۷ می‌باشد. سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ سال‌های آبی خشک بوده‌اند که در این دوره سطح آب دریاچه به کم‌ترین مقدار یعنی ۲۰۱۱/۲۸ متر در اول ۲۰۰۱ رسیده است (شکل (۵)).



نصب شده در بدنه سد، پی و تکیه‌گاه‌ها، در بخش تحلیل نتایج آورده شده و با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی مقایسه شده است.

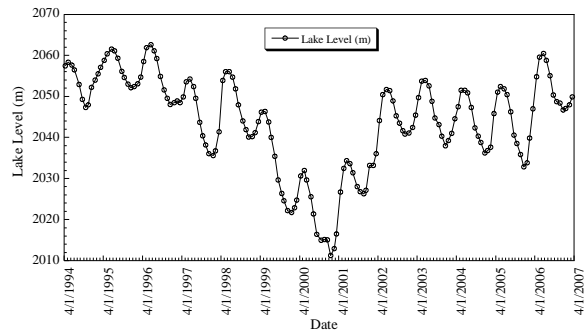
۶- شبیه‌سازی سه بعدی سد زاینده‌رود با استفاده از نرم افزار 3DEC

شبیه‌سازی هندسی اولیه سد زاینده‌رود، با در نظر گرفتن مشخصات دقیق شعاع قوس‌های بدنه در نرم‌افزار اتوکد ساخته شد. با استفاده از توپوگرافی محدوده، تکیه‌گاه‌های چپ و راست و بستر آن تا عمق سه برابر ارتفاع سد ساخته شد. سپس برای ساخت بلوک‌های مورد استفاده در 3DEC، بدنه سد مانند مراحل ساخت به وسیله بلوک‌هایی به عرض ۱۶ متر و تغییر زاویه بیشینه ۰/۳ درجه در هر ۲ متر ارتفاع، به تعداد ۱۷۳۲ بلوک برای بدنه سد تقسیم‌بندی شد. علاوه بر بدنه سد، بلوک‌بندی تکیه‌گاه‌ها و بستر نیز انجام شد.

در پایان، سد، پی و تکیه‌گاه‌ها با ابعاد ۵۴۴×۳۰۴×۳۱۵ به وسیله ۲۵۹۷ المان شبیه‌سازی شد. برای بررسی اثر درزه‌های اصلی در بدنه، پی و تکیه‌گاه‌ها، مشخصات هندسی از جمله امتداد، شیب و محل آنها شبیه‌سازی شده است. شکل (۳) نمایی از شبیه‌سازی عددی سد زاینده‌رود بوسیله نرم‌افزار 3DEC را نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است. پس از شبیه‌سازی و وارد نمودن مشخصات بلوک‌ها و سطوح ناپیوستگی‌ها و اعمال وزن سد، پس از گذشت ۴ ساعت شبیه‌سازی عددی به تعادل رسید. سپس فشار هیدرواستاتیک پشت سد و فشار بالابرنده در کف سد در ترازهای مختلف مخزن شبیه‌سازی شد و تحلیلهای لازم انجام شد. از آنجا که سدهای قوسی رفتاری یکپارچه با پی دارند، جابجایی‌های بدنه سد و پی مهم‌ترین عامل نشان دهنده رفتار سد هستند. بدین منظور در شبیه‌سازی عددی در نقاطی منطبق بر محل اندازه‌گیری بوسیله انحراف‌سنج‌ها و شیب‌سنج‌ها، جابجایی در جهات سراب-پایاب (x) و چپ-راست (y) و در نقاط منطبق بر محل نصب درزسنج سه محوره در جهات x و y و z و با تغییر سطح آب دریاچه محاسبه شده است.

شکل (۴): تغییرات تراز آب مخزن در سال‌های ۱۹۶۹-۱۹۷۲



شکل (۵): تغییرات تراز آب مخزن در سال‌های ۱۹۹۴-۲۰۰۷

۸- تغییر شکل‌ها و جابجایی‌ها در بدنه و پی سد

۸-۱- انحراف‌سنج‌های مستقیم و معکوس

برای تمام جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها مبنایی در نظر گرفته می‌شود که آن را اندازه‌گیری اولیه یا اندازه‌گیری صفر می‌نامند. این اندازه‌گیری در اولین آنگیری مخزن انجام شده و به عنوان اندازه‌گیری پایه تعریف می‌شود.

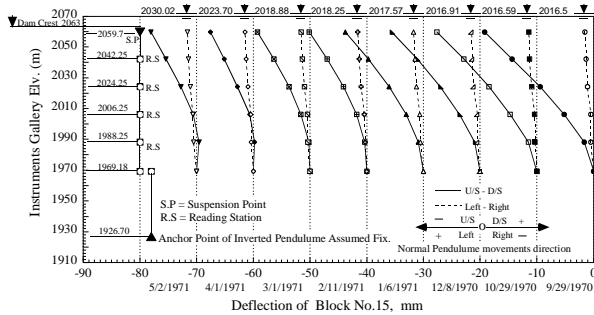
حرکت به سمت بالادست و پایین‌دست دره، جابجایی شعاعی و حرکت به سمت چپ و راست دره، جابجایی مماسی نامیده می‌شود. رابطه بین علامت تغییر شکل و جهت آن در انحراف‌سنج مستقیم بدین صورت تعریف شده است که تغییر شکل به طرف پایین‌دست مثبت و تغییر شکل به سمت بالادست منفی، تغییر شکل به طرف جناح چپ مثبت و تغییر شکل به طرف جناح راست منفی است.

در سد زاینده‌رود انحراف‌سنج‌های مستقیم در بلوک‌های شماره ۸، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۲ نصب شده و در ترازهای مختلف ارتفاع سد، تغییرات انحراف‌سنج اندازه‌گیری شده است. انحراف-سنج مستقیم برای اندازه‌گیری حرکات جسم سد به کار می‌رود. بنابراین حرکت انحراف‌سنج تابع دو حرکت شعاعی و مماسی بدنه است.

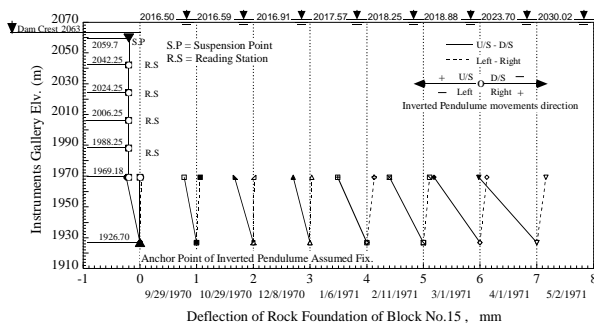
شکل (۶) نقطه آویز انحراف‌سنج‌ها و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری و جابجایی سد در بلوک مرکزی (بلوک ۱۵) را توسط انحراف‌سنج مستقیم نشان می‌دهد. منحنی‌هایی که با خطوط پیوسته به هم وصل شده‌اند جابجایی شعاعی و منحنی‌هایی که به صورت خط چین رسم شده‌اند جابجایی‌های مماسی بدنه سد را نسبت به تغییرات تراز آب مخزن که در بالای شکل آورده شده است را نشان می‌دهند. جابجایی‌ها در بلوک ۱۵ نسبت به راستای قائم روند منظم و منطقی را نشان می‌دهد. تغییر شکل مماسی در بلوک ۱۵ کوچک است که این موضوع به روشنی در شکل (۶) نشان داده شده است. انحراف‌سنج معکوس برای اندازه‌گیری

حرکت پی سد به کار می‌رود. شکل (۷) جابجایی پی بلوک مرکزی، (بلوک ۱۵) که توسط انحراف‌سنج معکوس به دست آمده است را نشان می‌دهد. جابجایی‌های شعاعی و مماسی پی بلوک ۱۵ روند منطقی را نشان می‌دهند.

تغییر شکل‌ها همه با علامت مثبت بیان شده‌اند و این نشان می‌دهد که با اضافه شدن بار به پی و حرکت پی به سمت سراب، انحراف‌سنج حرکتی به سمت پایاب را نشان می‌دهد. با افزایش تراز آب، حرکت سد به سمت پایاب خواهد بود، این حرکت در پی و بلوک شماره ۱۵ به روشنی دیده می‌شود (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل (۶): جابجایی شعاعی و مماسی سد در بلوک ۱۵

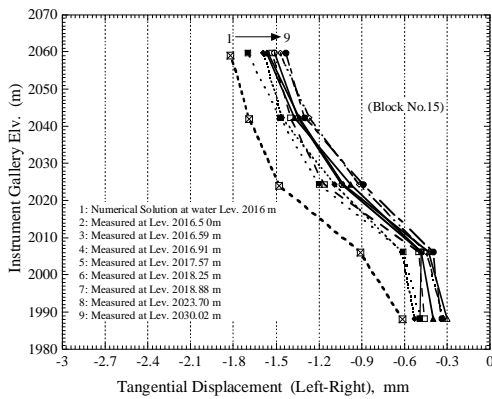


شکل (۷): جابجایی شعاعی و مماسی پی در بلوک شماره ۱۵

جدول (۲) بیش‌ترین تغییر شکل‌های شعاعی و مماسی در بلوک ۱۵ را در تراز آب ۲۰۳۰/۰۲ و ۲۰۳۱/۴۳ و ۲۰۶۲/۵۸ نشان می‌دهد. بیش‌ترین جابجایی، مربوط به سال ۱۹۹۶ است که بیش-ترین تراز آب مخزن، ۲۰۶۲/۵۸ بوده است. سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۱ سال‌های آبی خشک بوده‌اند که در این سال‌ها جابجایی بدنه به سمت سراب به طور کامل مشهود است. روند جابجایی‌ها با توجه به تغییرات سطح آب دریاچه نشان می‌دهد که سد دارای رفتار منظم و در وضعیت پایداری قرار دارد.

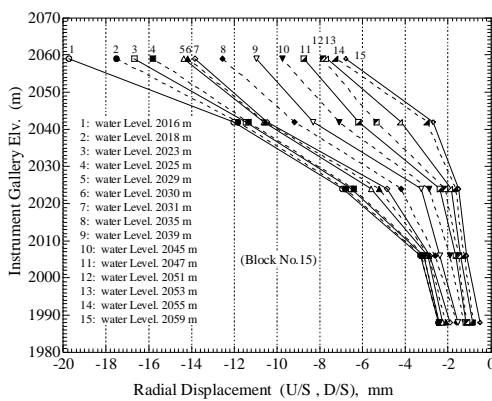
جدول (۲): بیش‌ترین جابجایی شعاعی و مماسی در بلوک شماره ۱۵،

گالری تراز ۲۰۵۹/۷



شکل (۹): تغییر شکل مماسی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در تراز ۲۰۱۶ و مقدار اندازه‌گیری شده توسط ابزار در تراز ۲۰۱۶/۵

در شبیه‌سازی عددی فوق در نقاطی منطبق بر محل اندازه‌گیری انحراف سنج‌های مستقیم، جابجایی در جهات X و Y با تغییر سطح آب دریاچه برای بلوک ۱۵ محاسبه شد که مقادیر جابجایی شعاعی و مماسی برای این بلوک به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. مقایسه بین تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق و مقادیر محاسبه شده بوسیله شبیه‌سازی عددی، همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. شکل (۱۲) نتایج بدست آمده توسط انحراف سنج‌های مستقیم و شبیه‌سازی عددی با تغییرات تراز آب مخزن در سالهای ۲۰۰۷-۱۹۹۴ را برای بلوک شماره ۱۵ نشان می‌دهد.

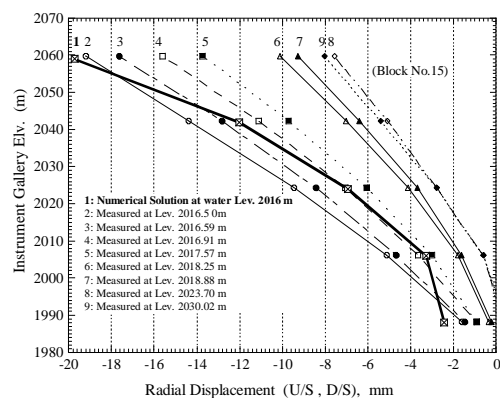


شکل (۱۰): جابجایی شعاعی محاسبه شده با شبیه‌سازی عددی برای بلوک ۱۵

تراز دریاچه (متر)	جابجایی مماسی (میلی‌متر)	جابجایی شعاعی (میلی‌متر)	تاریخ
۲۰۳۰/۰۲	-۱/۵۹	-۸/۰۳	۱۹۷۱/۵/۲
۲۰۶۲/۵۸	-۱/۱۵	۸/۹۴	۱۹۹۶/۶/۱۷
۲۰۳۰/۰۲	-۱/۴۹	-۵/۳	۲۰۰۰/۴/۱۳
۲۰۳۱/۴۳	-۱/۴۹	-۱۸/۰۰	۲۰۰۱/۸/۱۲

۹- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و نتایج حاصل از ابزار

شبیه‌سازی عددی پی و بدنه سد زاینده رود با در نظر گرفتن محل ابزار دقیق، بلوک‌های بدنه سد و پیوسته در نظر گرفتن سنگ پی انجام شد. سپس تحلیل‌ها بر اساس مشخصات دقیق ژئومکانیکی پی و خواص مقاومتی مصالح بتن، انجام شد. معیار تسلیم موهر کولمب برای درزه‌های بین بلوک‌ها و در مرز سنگ پی و بدنه استفاده شد و مقادیر سختی نرمال و سختی برشی $(k_s \text{ و } k_n)$ بلوک‌های بدنه سد، با استفاده از روش تحلیل برگشتی در تراز آب ۲۰۱۶ تعیین شد. به این صورت که با تغییر سختی نرمال و برشی در محدوده مجاز، اختلاف بین مقدار جابجایی‌های محاسبه شده توسط شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق به حداقل رسید. در شکل‌های (۸) و (۹) مقایسه بین تغییر شکل شعاعی و مماسی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در تراز ۲۰۱۶ و مقدار اندازه‌گیری شده در تراز ۲۰۱۶/۵ توسط ابزار نشان داده شده است. نموداری که به صورت توپر مشخص شده نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی است.



شکل (۸): مقایسه بین تغییر شکل شعاعی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در تراز ۲۰۱۶ و مقدار اندازه‌گیری شده در تراز ۲۰۱۶/۵

وضعیت مطلوبی دارد.

با استفاده از پردازش داده‌های بدست آمده از ابزار دقیق، مشخص شد که طرف چپ سد وضعیت زمین‌شناسی مطلوب-تری در مقایسه با جناح راست آن دارد و بدلیل ضعیف بودن توده‌سنگ پی و وجود گسل و شکستگی در جناح راست، تغییرشکل مماسی در جناح راست بیش‌تر است.

انحراف‌سنج شماره ۱۵ رفتار بلوک بتنی مرکزی بدنه سد را نشان می‌دهد و تنها بلوکی است که تغییرشکل شعاعی قابل توجهی دارد و پایش رفتار تغییرشکل‌پذیری آن بسیار مهم است و بدلیل مرکزیت آن، تغییرشکل مماسی در این بلوک کوچک است که این موضوع به روشنی در شکل‌های (۹) و (۱۱) نشان داده شده است.

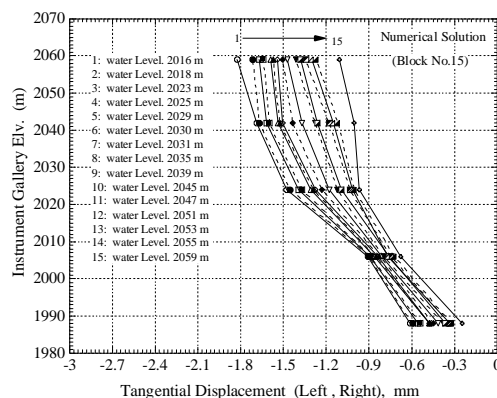
در شبیه‌سازی عددی سه بعدی در نقاطی منطبق بر محل اندازه‌گیری انحراف‌سنج‌های مستقیم، جابجایی در جهات (سراب-پایاب) و (چپ-راست) با تغییر سطح آب دریاچه، محاسبه شد. مقایسه بین تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار و مقادیر محاسبه شده به‌وسیله شبیه‌سازی عددی، هم-خوانی خوبی را نشان می‌دهد.

در این تحقیق همه تحلیل‌ها بر روی سد زاینده‌رود انجام شد، که بخشی از آنها در این مقاله ارائه شده است. برای رسیدن به اطمینان بیشتر نسبت به نتایج بدست آمده از عملکرد ابزار دقیق و کالیبره کردن شبیه‌سازی عددی توسط نتایج ابزار دقیق، انجام این تحلیل‌ها بر روی سدهای بزرگ در کشور ضروری به‌نظر می‌رسد. تحلیل‌های انجام شده در این تحقیق بدون در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها بوده است، هرچند اثر ناپیوستگی‌ها توسط معیار تسلیم الاستوپلاستیک و خواص ژئومکانیکی سنگ پی، بطور ضمنی لحاظ شده است، ولی به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر، در نظر گرفتن اثر ناپیوستگی‌ها بر تنش‌ها و تغییرشکل‌های بدنه سد موثر است.

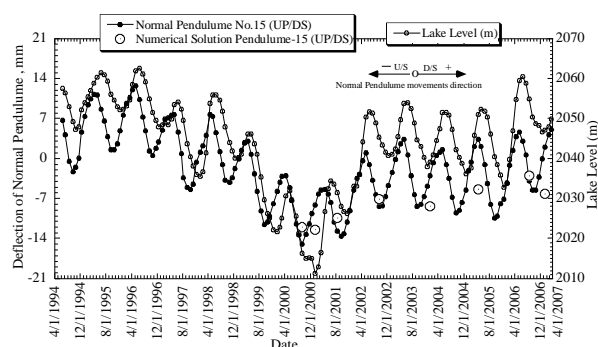
۱۱- تقدیر و تشکر

بدینوسیله از آقایان مهندس طباطبایی، مهندس سلحشور و دکتر مرتضی طبایی که برای گرفتن داده‌های ابزار دقیق سد ما را یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

[۲] حریت، آیین، آنالیز رفتارنگاری سد زاینده رود در دوران بهره برداری با استفاده از نتایج ابزار دقیق. دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.



شکل (۱۱): جابجایی مماسی محاسبه شده با شبیه‌سازی عددی برای بلوک ۱۵



شکل (۱۲): مقایسه بین تغییرشکل‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار و مقادیر محاسبه شده با شبیه‌سازی عددی برای بلوک ۱۵

با مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و جابجایی-های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق، نتیجه‌گیری شد که، در صورت تعریف درست هندسه، شرایط مرزی و تعیین درست داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی عددی می‌توان به جواب قابل قبولی رسید.

۱۰- نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داده است که تغییرات تراز آب اثر زیادی در تنش‌ها و تغییرشکل‌های بدنه سد و سنگ پی دارد.

تجزیه و تحلیل‌های انجام شده بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۹۷۱-۱۹۶۹ و ۲۰۰۷-۱۹۹۴ و همچنین مقادیر جابجایی‌ها در بلوک‌های تشکیل دهنده بدنه سد و توده‌سنگی پی، نشان می‌دهد که سد رفتار منظم داشته و از نظر پایداری

۱۲- مراجع

[۱] حسین زاده، آرش، تحلیل عددی سه بعدی تنش- کرنش سدهای بتنی قوسی با مدلسازی دقیق تر محدوده سنگ پی (مطالعه موردی سد کارون ۳). دانشکده فنی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، پایان نامه کارشناسی ارشد،



- C. X. She., "Deformation and stability of the right arch dam abutment of the DANJING hydro-power project", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 41, No 3, 2004.
- A. Shahkarami, M. Delfrouzi and H. Salarirad., "Study of compression and tension factors of safety with a 3D FEM model for an arch dam and rock foundation; a case study of the karun III arch dam in IRAN", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 41, No 3, 2004.
- X. Yu, Y.F Zhou, and S.Z Peng., "Stability analyses of dam abutments by 3D elastoplastic finite-element method: a case study of Houhe gravity-arch dam in china", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 42, PP. 415-430, 2005.
- S. Chen, M. Xu, I. Shahrour and P. Egger., "Analysis of arch dams using couple trial load and block element methods", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 11, 2003.
- J. V Lemos., "Modeling of arch dams on jointed rock formations", *Proc. ISRM Int. Symp. Eurock 96*, Turin, ed. G. Barla, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, PP. 519-526, 1996.
- D. D Curtis, E.B Kollgard and S.H Fischer., "Non-linear static and dynamic analysis of the Cushman arch dams using distinct elements", *Acres int*, Canada, 2002.
- [۱۱] طرح کنترل پایداری سدهای کشور، سد بتنی قوسی زاینده رود- پیوست شماره ۲/۱ گزارش ارزیابی تفصیلی کنترل و پایداری سد، مؤسسه تحقیقات منابع آب (تماب)، ۱۳۶۴.
- [۱۲] طرح کنترل پایداری سدهای کشور، سد بتنی قوسی زاینده رود-گزارش زمین شناسی، پیوست شماره ۲/۴- گزارش ارزیابی تفصیلی پایداری سد، مؤسسه تحقیقات منابع آب (تماب)، ۱۳۶۶.
- [۱۳] J. M. "Overview of Geodetic Deformation Measurements of Dams", ANCOLD conference, 2006.
- [۱۴] Safety Evaluation of Existing Dams, Bureau of Reclamation, Denver 1983.
- [۱۵] J. Dunicliff, *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [۱۶] Instrumentation, Design standards, U.S.B.R, No.13, Chapter 11..
- [۱۷] L. Xiaomin, R. Qingwen and W. Ailing., "On stability of dam body and abutment rock mass of Xiluodu arch dam", *New Developments in Dam Engineering*, PP. 573-578, 2004.
- [۱۸] Z. Yin, S. Qiangxi, R. Qingwen and Y. Tiantang., "Study on reinforcement of stability of abutments and foundation of arch dam", *New Developments in Dam Engineering*, PP. 1103-1110, Wieland, 2004.

