

رفتارنگاری سد کرخه

در دوران ساختمان با استفاده از نتایج ابزار دقیق

حبیب نیرومند^۱
علی اصغر میرقاسمی^۲
مهدی پاکزاد^۳

چکیده:

رفتارنگاری سدها از اهمیت ویژه‌ای در دنیا برخوردار است. در تمام سدهای بزرگ با نصب ابزارهای لازم مقادیر فشارهای منفذی، فشارهای توده خاک و تغییر شکلها در زمان ساخت، اولین آنگیری و دوران بهره‌برداری اندازه‌گیری شده و عملکرد سد مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این مقاله سعی شده است عملکرد سد کرخه که یکی از سدهای خاکی بزرگ ایران بشمار می‌رود با استفاده از نتایج ابزار دقیق و آنالیز برگشتی که توسط نرم‌افزار CA2 انجام گرفته مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

کلمات کلیدی:

سد کرخه، آنالیز برگشتی، رفتارنگاری، ابزار دقیق.

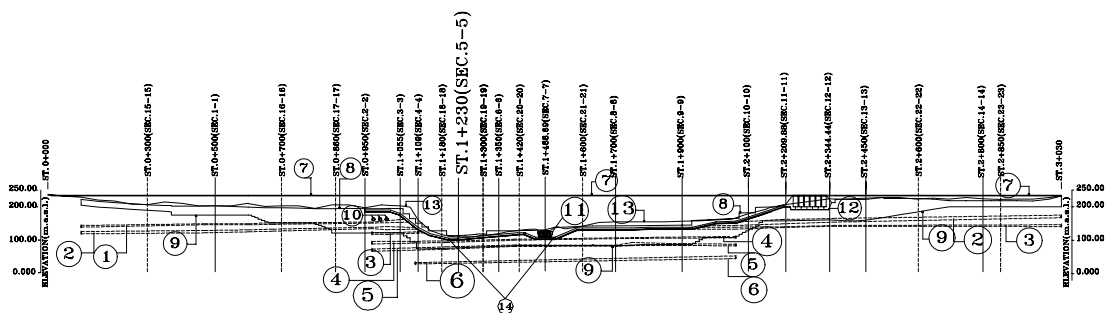
^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
^۳ دکتری مکانیک خاک و پی، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

مقدمه :

تامین آب مورد نیاز انسان امروزه یکی از مشکلات جوامع انسانی به شمار می‌رود. انسان برای رفع این مشکل از راهکارهای زیادی سود می‌جوید. یکی از این راهکارها احداث سد می‌باشد. سدها محلی برای ذخیره و استفاده بهینه از آب می‌باشد. سد به دو نوع اصلی بتنی و خاکی تقسیم می‌شود که هر کدام از این دو نوع نیز دارای تنوع خاص می‌باشد. سدهای بتنی به سدهای بتنی دوقوسی، سدهای وزنی و غیره و سدهای خاکی نیز به سدهای سنگریزه‌ای، سدهای خاکی باهسته رسی و غیره تقسیم می‌شوند. سدهای خاکی بعلاوه رفتار مناسب در مقابل زلزله و در دسترس بودن مصالح ساخت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. رفتارنگاری سد خاکی با توجه به رفتار ویژه خاک که از سه عنصر خاک، آب و هوا تشکیل می‌شود بسیار مهم می‌باشد. یک سد خاکی ابتدا با استفاده از یک دسته مشخصات فنی بر گرفته از نتایج آزمایشگاهی روی منابع قرضه و همچنین تجربه سدهای دیگر، طراحی و تحلیل می‌گردد. در مرحله اجرا بانصب ابزارهای لازم (Instrumentation) مقادیر فشارهای منفذی، تغییر شکلها و فشارهای توده خاک اندازه‌گیری شده و با مقادیر مرحله طراحی مقایسه می‌گردد تا میزان تطبیق تحلیلهای تئوریک که طراحی سد بر پایه آن استوار است با رفتار واقعی سد مشخص شود. در صورت مشاهده مشکل در رفتار سد تعمهیدات لازم برای رفع آن صورت گیرد. همچنین رفتارنگاری می‌تواند تجربه برای طراحی سدها در آینده باشد. با توجه به اهمیت فوق‌العاده‌ای که رفتارنگاری دارد در این مقاله سعی شده رفتار سد کرخه در دوران ساختمان از لحاظ فشارهای منفذی، پدیده قوس زدگی (Arching) و تغییر شکلها هسته مورد بررسی و رفتارنگاری قرار گیرد. [4]

طرح مسئله :

سد کرخه، بر روی رودخانه کرخه در جنوب غربی ایران در استان خوزستان در حال احداث می‌باشد. این سد ۳۰۳۰ متر طول و ۱۲۸ متر ارتفاع و حجم مخزنی حدود ۷ میلیارد مترمکعب دارد. سد فوق خاکی با هسته رسی مخلوط می‌باشد که بر روی سازند بختیاری با تناوب کنگلومرا و گل سنگ در حال احداث است. برای رفتارنگاری این سد در ۲۳ مقطع ابزارهای دقیق نصب شده است. این ابزارها شامل پیزومترها، سلولهای اندازه‌گیری فشارکل توده خاک، نشست سنجها و انحراف سنجها می‌باشد. شکل (۱) مقطع طولی از سد و محل مقاطعی را که ابزارهای دقیق در آن قرار دارند نشان می‌دهد.



LEGEND:

- | | |
|------------------------------|---|
| ① MUDSTONE NO. (+4) | ⑧ TOP OF CUT-OFF WALL |
| ② MUDSTONE NO. (+3) | ⑨ BOTTOM OF CUT-OFF WALL |
| ③ MUDSTONE NO. (+2) | ⑩ POWER TUNNEL |
| ④ MUDSTONE NO. (-1) | ⑪ DIVERSION CULVERT |
| ⑤ MUDSTONE NO. (-2) | ⑫ SPILLWAY |
| ⑥ MUDSTONE NO. (-3) | ⑬ ORIGINAL GROUND SURFACE |
| ⑦ TOP OF DAM CREST EL. 234.0 | ⑭ PUMPING STATIONS AND FLOW MEASUREMENT DEVICES |

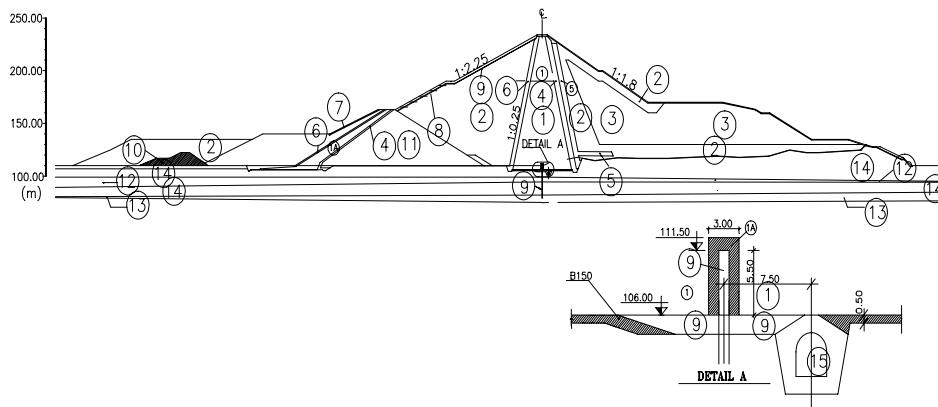
شکل ۱: محل قرار گیری مقاطع ابزار دقیق در امتداد محور سد کرخه

دز این مقاله به بررسی عملکرد بدنه سد پرداخته شده و در مورد پیزومترهای پی به مقاله‌ای که در بخش مراجع آورده شده رجوع شود . برای بررسی عملکرد سد در دوران ساختمان علاوه بر نتایج ابزار دقیق یک آنالیز برگشتی با استفاده از نرم‌افزار CA2 که بر پایه روش اختلاف محدود صریح می‌باشد انجام گرفته است . در این تحلیل از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر کولمب استفاده شده است [3]. مشخصات مصالح از روی نتایج آزمایشهای که بر روی خاکریز آزمایشی انجام گرفته بدست آمده است . جدول (۱) مشخصات مصالح سد را نشان می‌دهد . [2]

مشخصات مصالح	وزن مخصوص (KPa/m^3)	مدول الاستیسته (KPa/m^2)* 10^4	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	چسبندگی (KPa/m^2)	زاویه اتساع (deg)
هسته رسی مخلوط زهکشی نشده (uu)	20.2	3.5	0.40	6	70	2
پوسته	20.5	10.2	0.27	39	0	10
فیلتر و مصالح انتقالی	19.5	7	0.25	35	0	8
گلسنگ (-۲)	19.5	12	0.23	22	70	5
کنگلومرای بین گلسنگ (-۲) و (-۱)	22	100	0.30	39.4	5	12
گلسنگ (-۱)	19.5	12	0.23	22	70	5
کنگلومرای بین گلسنگ (-۱) و (+۲)	22	80	0.30	39.4	85	12

جدول ۱: مشخصات مصالح بکار رفته در سد کرخه

تحلیل فوق بر روی مقطع (۵-۵) که در ایستگاه (۱+۲۳۰) قرار دارد انجام گرفته است (شکل ۲). تحلیل در محیط تنش کل بوده و مقادیر فشار توده خاک و نشست هسته بدست آمده است .



- | | |
|---|--|
| 1. Impervious core (mudstone mixed with sandy gravel) | 1A. Impervious core (mudstone) |
| 2. Sandy gravel | 3. Conglomerate or sandy gravel |
| | 5. Gravel filter and drain |
| 6. Sand-gravel filter | 4. Sand filter |
| 8. U/S slope protection using soil cement | 7. U/S slope protection using limestone riprap |
| 10. Pre-coffer dam | 9. Plastic concrete cut off wall |
| 12. Mudstone no. (-1) | 11. Main cofferdam |
| 14. Conglomerate | 13. Mudstone no. (-2) |
| | 15. Inspection gallery |

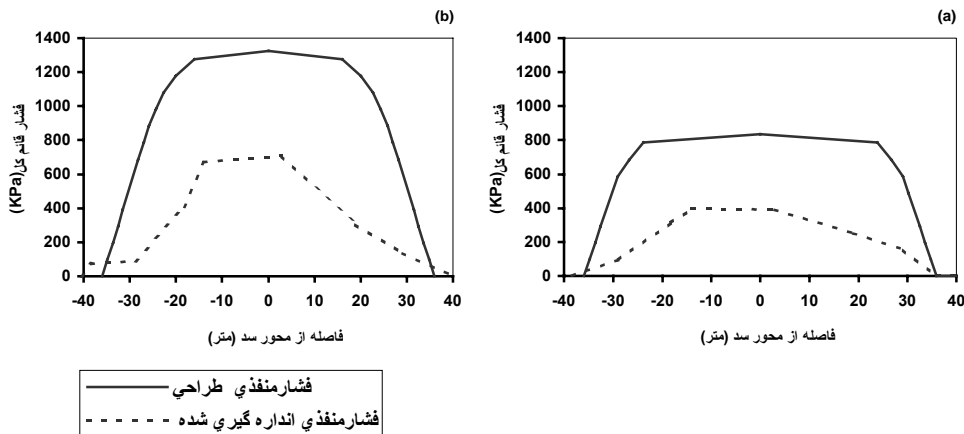
شکل ۲: مقطع عرضی سد در ایستگاه (۱+۲۳۰)

نتایج تحلیل

بررسی فشارهای منفذی در داخل هسته :

در شکل (۳) مقادیر فشارهای منفذی در مقطع (۵-۵) در محل اتصال هسته به پی در زمانی که ۵۴ و ۸۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده را نشان می‌دهد .

با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌شود که روند کلی فشار در داخل هسته با روند فشارها در زمان طراحی مطابقت دارد .



شکل ۳: مقادیر فشارهای منفذی بدست آمده از طراحی و اندازه گیری شده در مقطع عرضی (۵-۵) ایستگاه (۱+۲۳۰) در محل اتصال هسته به پی ۵۴-a متر از ارتفاع سد اجرا شده ۸۴-b متر از ارتفاع سد اجرا شده .

اما مقادیر فشارهای منفذی در زمان اجرا به مراتب از مقادیر فشار منفذی در زمان طراحی کمتر می‌باشد . کم بودن مقادیر فشار منفذی در دوران ساختمان با توجه به عوامل زیر می‌باشد: [5]

الف - پیش‌بینی زمان ساخت : مدت زمان اجرایی سد کرخه در زمان طراحی ۲۹ ماه در نظر گرفته شده بود که در عمل این مدت احتمالاً بیش از ۴۰ ماه به طول خواهد انجامید .

ب - استفاده از مصالح رس مخلوط به جای رس خالص : در طراحی سد کرخه مصالح هسته از رس خالص فرض شده بود که به علت قابلیت تراکم پذیری زیاد رس خالص مقادیر فشار منفذی زیادی بدست آمده بود ولی در عمل به خاطر استفاده از مصالح رس مخلوط که قابلیت تراکم پذیری آن از رس خالص کمتر است مقادیر فشار منفذی ایجاد شده در هسته سد کمتر بوده است . همچنین استفاده از مصالح رس مخلوط باعث افزایش نفوذ پذیری هسته شده و سرعت نزول فشار منفذی افزایش می‌یابد .

در بررسی فشار آب حفره‌ای در داخل هسته تعیین ضریب فشار منفذی ماگزیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. ضریب فشار منفذی ماگزیم (Ru_{max}) از رابطه (۱) بدست می‌آید :

$$Ru_{max} = \max \left(\frac{\text{ماگزیم فشار منفذی اندازه‌گیری شده در داخل هسته}}{\text{فشار قائم کل اندازه‌گیری شده در آن نقطه}} \right)$$

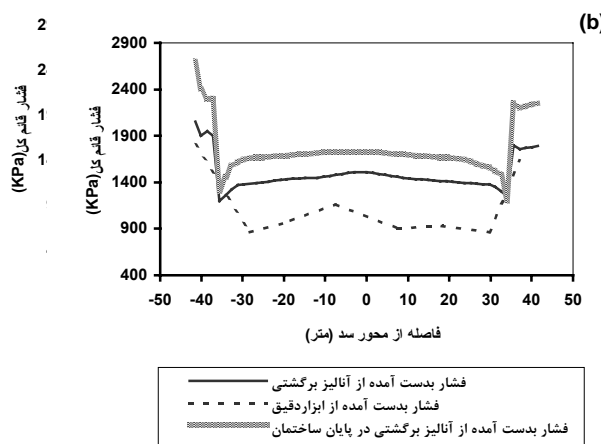
فشار قائم کل اندازه‌گیری شده در آن نقطه

رابطه (۱)

ضریب فشار منفذی بیشینه-اندازه‌گیری شده در داخل هسته زمانی که ۵۴ و ۸۴ متر از ارتفاع خاکریزی سد اجرا شده به ترتیب برابر ۰/۶۰ و ۰/۶۰ می‌باشد که با توجه به مقدار پیش بینی شده در زمان طراحی مقدار پائین‌تری را نشان می‌دهد. پائین بودن ضریب فشار آب حفره‌ای نشان از ضریب اطمینان بالای سد در مقابل گسیختگی هیدرولیکی دارد .

بررسی فشارهای توده خاک و پدیده قوس زدگی (Arching):

شکل (۴) مقادیر فشار قائم کل در داخل هسته در محل اتصال هسته به پی در مقطع عرضی (۵-۵) را نشان می‌دهد. شکل فوق مقادیر فشارهای توده خاک اندازه‌گیری شده بوسیله ابزار دقیق و فشارهای بدست آمده از آنالیز برگشتی (Back Analyse) در زمانی که ۵۴ و ۸۴ متر از ارتفاع خاکریزی سد اجرا شده را مورد مقایسه قرار می‌دهد. با توجه به شکل (۴-a) ملاحظه می‌گردد که در زمانی که ۵۴ متر از تراز خاکریزی اجرا شده تفاوت نسبتاً زیادی بین مقادیر فشار قائم کل اندازه‌گیری شده و آنالیز برگشتی وجود دارد. با افزایش ارتفاع خاکریزی به ۸۴ متر همانطور که در شکل (۴-b) دیده می‌شود این مقادیر به هم نزدیک شده‌اند. بنابراین با افزایش خاکریزی مقادیر آنالیز برگشتی و ابزار دقیق از انطباق نسبتاً خوبی برخوردار هستند. همچنین در شکل (۴-b) مقادیر فشار کل خاک در پایان ساختمان



شکل ۴: مقادیر فشار توده خاک بدست آمده از آنالیز برگشتی و اندازه‌گیری شده در مقطع عرضی (۵-۵) در محل اتصال هسته به پی a-۵۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده b-۸۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده

نیز آورده شده است. بنابراین با توجه به مقادیر بدست آمده ماکزیمم فشار کل قائم در داخل هسته در محل اتصال هسته به پی زمانی که تراز خاکریزی ۱۲۸ متر باشد حدود ۱۸۰۰ کیلو پاسکال خواهد شد. [1]

یکی از مسائل مهم در سدهای خاکی پدیده قوس زدگی (Arching) می‌باشد. این پدیده عبارتست از آویزان شدن هسته از پوسته که باعث کاهش فشار قائم در هسته می‌شود. این امر به خاطر تفاوت تراکم پذیری مصالح پوسته و هسته اتفاق می‌افتد. چون نشستهای هسته بیشتر از پوسته می‌باشد هسته در اثر تغییر شکل زیاد به پوسته تکیه می‌کند. بیشترین قوس زدگی معمولاً در نزدیکی‌های فیلتر بوقوع پیوسته و مقدار قوس زدگی در وسط هسته کاهش می‌یابد. اگر پدیده قوس زدگی خیلی زیاد باشد باعث کاهش تنش در هسته شده و احتمال گسیختگی هیدرولیکی در زمان آبگیری وجود خواهد داشت.

مقدار ضریب قوس زدگی (Arching) در داخل هسته از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{ضریب قوس زدگی (Arching)} = \frac{\sigma_v}{\gamma h} \quad (\text{رابطه ۲})$$

σ_v : فشار کل قائم در داخل هسته (KPa)

γ : وزن مخصوص مصالح هسته (KPa/m)

h : ارتفاع خاکریزی (m)

این ضریب هر چقدر کوچک باشد قوس زدگی اتفاق افتاده در داخل هسته بیشتر خواهد شد. جدول (۲) مقادیر بیشترین قوس زدگی در هسته در مراحل مختلف ساخت سد با استفاده از آنالیز برگشتی و نتایج ابزار دقیق را نشان می‌دهد. با توجه به جدول فوق مشاهده می‌شود که مقادیر قوس زدگی بدست آمده از آنالیز برگشتی و نتایج ابزار دقیق در زمانی که ارتفاع سد کم بوده تفاوت زیادی با هم دارند و با افزایش تراز خاکریزی این مقادیر بهم نزدیک شده‌اند. با توجه به مقادیر بدست آمده پیش‌بینی می‌شود که مقدار قوس زدگی در پایان ساختمان به حدود ۰/۴۶ برسد که این مقدار با توجه به ضریب

ارتفاع اجرا شده سد	آنالیز برگشتی	ابزار دقیق
۳۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.79	0.65
۳۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.76	0.62
۴۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.73	0.60
۵۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.70	0.58
۶۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.66	0.55
۷۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.56	0.52
۸۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.54	0.50
۹۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.55	0.49
۱۰۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.50	0.47
۱۱۴ متر از ارتفاع سد اجرا شده	0.48	0.45
پایان ساخت	0.46	

جدول ۲: ضریب قوس زدگی در مقطع (۵-۵) در مراحل مختلف ساخت.

قوس زدگی اتفاق افتاده در سدهای بزرگ دنیا مانند سد اسواتوان با ۱۳۰ متر در نروژ که ضریب قوس زدگی ۰/۳۲ الی ۰/۹ و سد واتنداکوانت با ارتفاع ۱۲۵ متر که ضریب قوس زدگی ۰/۳۵ الی ۰/۶۳ مطابقت خوبی دارد. بنابراین ملاحظه می‌شود که پدیده قوس زدگی در هسته کم بوده و می‌توان گفت سد از لحاظ گسیختگی هیدرولیکی در زمان آبرگیری مشکلی نخواهد داشت. [1] اختلاف ایجاد شده بین مقادیر اندازه گیری شده و آنالیز برگشتی در زمانی که ارتفاع خاکریزی کم است به این علت می‌باشد که مقدار مدول الاستیسته طبق رابطه (۳) با افزایش تنش همه جانبه افزایش می‌یابد.

$$E = E_0 \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_a} \right)^\alpha \quad (\text{رابطه ۳})$$

E_0 : مدول الاستیسته اولیه (KPa)

σ_3 : فشار همه جانبه (KPa)

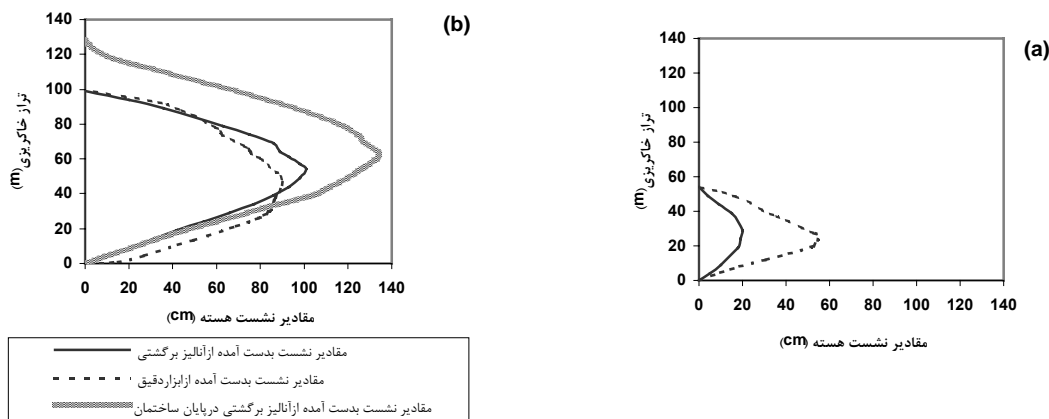
σ_a : فشار اتمسفر (KPa)

α : ضریبی که به نوع خاک بستگی دارد.

چون در برنامه CA2 امکان تغییر مدول الاستیسته با توجه به فشار همه جانبه در مراحل تحلیل لایه به لایه سد وجود ندارد مدول الاستیسته متوسط با توجه به σ_3 ایجاد شده در سد بکار گرفته شده که این امر باعث می‌شود که در تراز پائین مقادیر بدست آمده از ابزار دقیق و آنالیز برگشتی باهم تفاوت زیاد داشته باشد و با افزایش ارتفاع سد چون مقدار E افزایش می‌یابد کم کم مقادیر آنالیز برگشتی و ابزار دقیق به هم نزدیک می‌شود.

بررسی نشستهای قائم :

برای اندازه‌گیری نشستهای قائم در داخل هسته صفحات مغناطیسی در ترازهای مختلف به فاصله حدود ۳/۵ متر از همدیگر نصب شده‌اند که مقادیر نشست هر تراز نسبت به صفحه مبنا نشان می‌دهند. شکل (۵) مقادیر نشست در داخل هسته در مرتفع‌ترین مقطع سد در زمانی که تراز خاکریزی ۵۶ و ۱۰۰ متر اجرا شده را نشان می‌دهد با توجه به



شکل ۵: مقادیر نشست بدست آمده از آنالیز برگشتی و اندازه‌گیری شده در مقطع عرضی (۵-۵) در داخل هسته a-۵۶ متر از ارتفاع سد اجرا شده b-۱۰۰ متر از ارتفاع سد اجرا شده .

شکل (۵-a) مشاهده می‌شود که مقادیر نشست بدست آمده از ابزار دقیق در زمانی که ۵۶ متر از ارتفاع خاکریزی اجرا شده حدود ۵۵ سانتی‌متر بوده و مقادیر آنالیز برگشتی حدود ۲۲ سانتی‌متر می‌باشد. مقادیر نشست در زمانی که ۱۰۰ متر از ارتفاع خاکریزی اجرا شده با استفاده از اندازه‌گیری توسط ابزار دقیق حدود ۹۳ سانتی‌متر و آنالیز برگشتی حدود ۱۰۵ سانتی‌متر بوده است. چنانچه ملاحظه می‌شود مقادیر بدست آمده از آنالیز برگشتی در ابتدا کمتر از مقادیر واقعی نشست می‌باشد ولی وقتی تراز خاکریزی بالاتر رفته مقادیر آنالیز برگشتی و واقعی بهم نزدیکتر شده بطوریکه مقادیر آنالیز برگشتی نشست زیادتری را نشان می‌دهد. چون در زمانی که تراز خاکریزی پائین بوده مدول الاستیته هسته کمتر و نشستهای زیادی اتفاق افتاده است. با افزایش تراز خاکریزی و بالا رفتن مدول الاستیته از نرخ افزایش مقدار نشست در تراز پائین کاسته شده و مقادیر نشست بدست آمده از آنالیز برگشتی و واقعی به هم نزدیکتر شده‌اند. مقادیر نشست واقعی نشان می‌دهد که مقدار نشست هسته در دوران ساختمان حدود ۱٪ ارتفاع سد می‌باشد که این مقادیر با توجه به مقادیر نشست سدهای دیگر مقدار معقولی می‌باشد. همچنین شکل (۵-b) نشست در پایان ساختمان را با استفاده از آنالیز برگشتی نشان می‌دهد چنانچه مشاهده می‌شود در پایان ساخت سد مقدار نشست ماکزیمم هسته در حدود ۱۳۰ سانتی‌متر خواهد بود که نزدیک به ۱٪ ارتفاع شده سد می‌باشد. [1]

بحث و نتیجه‌گیری :

با توجه به مباحث ارائه شده مشاهده می‌شود که مقدار فشارهای منفذی ایجاد شده در داخل هسته در زمان ساخت سد با توجه به طولانی شدن مدت زمان اجرا و تغییر مصالح هسته از رس خالص به رس مخلوط حدود نصف مقادیر پیش‌بینی شده در زمان

طراحی بوده است. پایین بودن فشارهای منفذی باعث بالارفتن ضریب اطمینان سد از لحاظ پایداری و گسیختگی هیدرولیکی شده است.

پدیده قوس زدگی (Arching) اتفاق افتاده در سد با مقادیر پیش‌بینی شده در زمان طراحی مطابقت خوبی دارد و مقدار آن در مقایسه با ضریب قوس زدگی سدهای دیگر دنیا در حد معقول و قابل قبولی می‌باشد.

مقدار نشست هسته سد در حدود ۱٪ ارتفاع سد می‌باشد. که این مقدار نسبتاً قابل قبول می‌باشد البته مقدار نشست پیش شده در زمان طراحی بیش از ۱٪ ارتفاع سد بوده که به علت تغییر مصالح هسته از رس خالص به رس مخلوط مقدار نشست کاهش یافته است.

بررسی رفتار پیرومترهای داخل پی در مقاله که در بخش مراجع آورده شده می‌باشد. [5]

تقدیر و تشکر :

نگارندگان بدینوسیله از مساعدت آقای مهندس ترکش دوز مدیر محترم طرحهای کرخه و راهنماییهای ارزنده آقای دکتر میرحسینی و آقای مهندس صدرلایه‌جانی و همچنین از همکاری شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس که ما را در تهیه این مقاله یاری نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

مراجع و مأخذ :

حیب نیرومند (پائیز ۱۳۷۹) - رفتارنگاری سد کرخه در دوران ساختمان با استفاده از نتایج ابزار دقیق - پایان نامه کارشناسی ارشد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران.

مجموعه گزارشات فاز ۱ و ۲ و ۳ سد کرخه - شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس

دکتر فخمی (۱۳۷۶) - تئوری و راهنمایی نرم‌افزار CA2 در تحلیل محیطهای پیوسته.

Monitoring John Dunicliff & Gordon E.Green "Geotechnical Instrumentation For Field Performace", Publication John Wiley & Sons (1993)
A.A.Mirghasemi, N.Tarkeshdooz, S.Daadgostarnia (2000), "Pore Pressure Monitoring Within The Foundation And Impervious Zone Of Karkkeh Dam During Construction", Proc. 20th Int. Cong. Large Dam, ICOLD, PP. 259-274, Volume 3, Beijing.