

## کاهش ریسک سدها بوسیله روشهای غیر سازه ای مطالعه موردی: آبگیری زود هنگام سد کرخه

### چکیده :

این مقاله به منافع و هزینه های روشهای غیر سازه ای در کاهش خطرات ناشی از احداث و بهره برداری از سدها میپردازد. در نتیجه تاکید مهندسی بر ظرفیت هیدرولیکی و قابلیت باربری سازه های هیدرولیکی، تاکنون روشهای سازه ای عمدتاً برای افزایش ایمنی سدها بکار گرفته شده اند.

با توجه به اهمیت ایمنی عمومی، کلیه راهکارهای کارآ در رابطه با کاهش خطر پذیری بایستی مورد توجه قرار گیرند. عواقب تخریب سد بسیار فاجعه بار است بنابراین مسئولین بایستی بطور پیوسته بدنبال حداقل کردن ریسک باشند. از طرف دیگر احداث و بهره برداری از سد بایستی مقرون به صرفه باشد. تجربه جهانی نشان می دهد که اعمال اقدامات غیرسازه ای در بسیاری از پروژه ها می تواند دستیابی به ایمنی مطلوب را با هزینه ایی بسیار کمتر امکان پذیر نماید.

بکارگیری و موفقیت روشهای غیر سازه ای در بسیاری از پروژه ها نشان می دهند که برای کاهش خطر پذیری سد میبایستی کلیه تدابیر غیرسازه ای را در نظر گرفت. در این راستا بکارگیری تحلیل ریسک می تواند مقایسه منافع و هزینه های روشهای غیرسازه ای را ممکن سازد. قسمت عمده هزینه های روشهای غیرسازه ای مربوط به هزینه های پرسنلی است که در کشورهای جهان سوم بطور نسبی کمتر از کشورهای پیشرفته می باشد. در این رابطه برنامه های جامع آموزشی نقش کلیدی دارند و برای مثال در ژاپن آموزش مدیران سدها بوسیله شبیه گرایی مشابه آنچه برای تعلیم خلبانها بکار گرفته می شود، انجام میگردد. با توجه به اهمیت روزافزون روشهای غیر سازه ای کمیته بین المللی سدهای بزرگ آخرین بولتن خود را به این موضوع اختصاص داده است.

### کلمات کلیدی:

ایمنی سدها - روشهای غیره سازه ای - تحلیل ریسک - مدیریت جامع

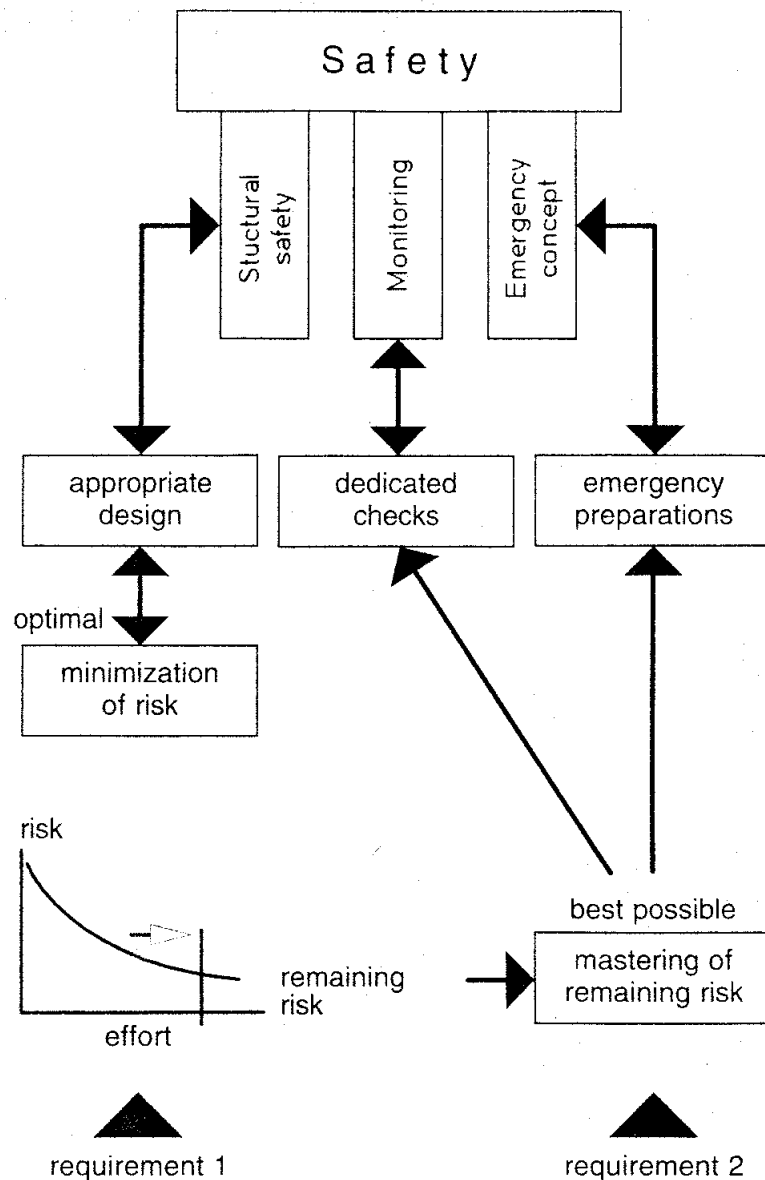
## مقدمه

تاکنون بیشترین تاکید در رابطه با ظرفیتهای هیدرولیکی سدها بر محورهای سازه ای استوار بوده است. با این وجود کاهش ریسک بوسیله روشهای غیر سازه ای در بسیاری موارد ممکن میباشد. در این راستا گروه کاری هزینه های کمیته بین المللی سدهای بزرگ (ICOLD) مقاله ای در این زمینه در همایش پکن در سال ۲۰۰۰ ارائه نموده است و در حال تهیه بولتن کاهش ریسک سدها بوسیله روشهای غیر سازه ای میباشد. در مقاله فوق بیشتر بر اقداماتی که در حوزه مدیریت مخزن میباشد تاکید شده است تا مدیریت سیلابدشتها در پایین دست. با توجه به این مقاله در بسیاری موارد کاهش ریسک تخریب سدها بوسیله اقدامات غیر سازه ای کم هزینه بعنوان جایگزین روشهای سازه ای امکان پذیر میباشد {۷}.

## ریسکهای سدها

در مقایسه با دیگر خطررها، سدها ریسک قابل ملاحظه ای را به جامعه تحمیل نمی کنند. در اغلب موارد، کاهش ریسک سیلابهای طبیعی بسیار بیشتر از ریسکی است که در اثر احداث سد بوجود می آید. با وجود اتخاذ کلیه تدابیر لازم، همیشه ریسک تخریب (هر چند اندک) وجود دارد (شکل (۱)). با این وجود همیشه حدودی برای محافظه کاری در طراحی و احداث سدها اعمال می گردد. یکی از این محدودیتها، بطور مشخص ملاحظات اقتصادی است. محافظه کاری افراطی می تواند اجرای پروژه را غیر ممکن ساخته و جامعه را از منافع پروژه محروم کند. حتی در سدهایی که کاملاً ایمن بنظر میرسند، نیز ریسک وجود دارد. درصد تخریب سدها تا قبل از ۱۹۵۰، ۲/۲ درصد بوده است که این ریسک برای سدهایی که از سال ۱۹۵۰ تاکنون احداث شده اند به ۰/۵ درصد کاهش یافته است. بیشتر سدهای تخریب شده کوتاهتر از ۳۰ متر میباشند و ۷۰ درصد خرابیها در ۱۰ سال اول بهره برداری روی داده اند. با توجه به این آمار می توان به نتایج زیر دست یافت:

- حتی برای سدهایی که بعد از ۱۹۵۰ احداث شده اند، احتمال تخریب وجود دارد. بنابر این کاهش ریسک یکی از وظایف مهم کارفرما و مدیریت سد میباشد.
- کاهش ریسک بایستی در تمامی ابعاد و برای کلیه خطرات محتمل صورت پذیرد. در بررسی خطرات بایستی امکان هشدار و تخلیه مردم در پایین دست در نظر گرفته شود. بنابر این کاهش ریسک می تواند با برخورد جامع گرایانه، متعادل و بنابر این کم هزینه ممکن گردد. در این راستا مسائلی که مسقیماً به سد مربوط نمی باشد مانند آبگرفتگی در پایین دست بایستی بدقت مورد مطالعه قرار گیرد. توجه دقیق بایستی به عواملی مانند سرعت تخریب سد، عمق و سرعت جریان، فاصله سد به مراکز جمعیت، کارآئی سیستم هشدار سیلاب و وضعیت اقلیمی در شرایط سیلابهای نادر معطوف شود. این عوامل بعلاوه پارامترهای دیگر عواقب تخریب سد را معین می کنند {۷}.

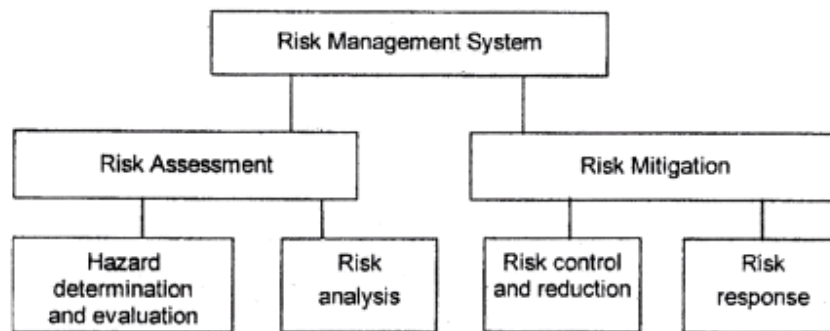


شکل (۱) فلسفه ایمنی و ریسک سدها در سوئیس

### برآورد ریسک

برآورد ریسک می تواند بعنوان راهنمایی برای انتخاب اقدامات مناسب کاهش ریسک صورت پذیرد (شکل (۲)). برآورد ریسک دربرگیرنده کلیه روشهای کاهش ریسک از جمله روشهای غیر سازه ای می باشد. استفاده از این روشها در سالهای اخیر در رابطه با سدهایی که در استرالیا، کانادا، فرانسه، نروژ، آفریقای جنوبی و آمریکا ساخته شده اند، روند افزایشی داشته است. کمی کردن ریسک عموماً نتیجه برآورد و احتمال سالانه یک واقعه است که تلفات انسانی یا خسارات مالی بدنبال داشته باشد. این احتمال در عواقب حاصله ضرب شده و ریسک حاصل می گردد. تکنیکهای مورد استفاده، بررسی سناریوی کامل حوادث محتمل را ممکن میسازد. هزینه برآورد ریسک از چند نفر- روز تا چند صد نفر- روز برای یک سد خاص تغییر می کند. ایجاد دیدگاه عمیق در رابطه با کاهش ریسک اغلب با حداقل هزینه حاصل می گردد. تجربه جهانی نشان میدهد که ریسک سدها در مناطق جغرافیایی مختلف متفاوت است. برای مثال در کشورهای در حال توسعه، ریسک اصلی تخریب سد در اثر سیلاب میباشد. این موضوع بخصوص در آسیا که ۵۰ درصد سدها در مناطق پر جمعیت احداث میشوند، صدق می کند. در ۳۰ سال گذشته بیشتر تخریب سدها در کشورهای در حال توسعه در اثر سیلاب بوده است. از طرف دیگر سیلابها ریسک اصلی تخریب سد در کشورهای صنعتی نبوده اند. دربرآورد

خسارات و تعداد تلفات انسانی، تغییرات پایین دست بایستی در نظر گرفته شود زیرا عموماً "احداث سدها باعث توسعه پایین دست می گردد {۲}.



شکل (۲) مدیریت جامع ریسک

#### ایمنی هیدرولوژیکی سد Wahleach در کانادا

ظرفیت سرریز این سد از نقطه نظر ضوابط کارفرما (BC-Hydro) ناکافی برآورد گردید. با وجودیکه امکان افزایش ظرفیت سرریز وجود داشت ولی پتانسیل شستگی در پایین دست سرریز و بدنال آن تخریب سرریز هنوز موجود بود. مطالعات بعدی نشان داد حتی اگر تدابیر لازم برای جلوگیری از شستگی بعمل آید، عبور سیلاب PMF از سرریز، پایین دست را با خطر بزرگی مواجه خواهد کرد و خطرات مرحله ای تخریب سد نسبت به عواقب نهایی ناچیز خواهد بود. به علاوه مطالعات BC-Hydro نشان داد که دو رودخانه مجاور خطرات بسیار بزرگتری را متوجه مردم خواهند کرد. در حقیقت توجه به سیلابهای طبیعی، قبول ریسک بزرگتر از آنچه در ضوابط آورده شده را ممکن کرد. علاوه بر اصلاحات سرریز، کارفرمای پروژه با مشورت با مقامات وقایع غیر مترقبه منطقه و مقامات محلی، برنامه ریزی برای ایجاد سیستم هشدار سیلاب را به انجام رسانید. هزینه این سیستم هشدار سیلاب سالانه ۵۰۰۰ دلار برآورد شده است {۷}.

#### نروژ

سد Dravladalen به ارتفاع ۲۹ متر یک سد سنگریزه ای با هسته رسی است. این سد در سال ۱۹۷۲ تکمیل گردید. این سد در محلی دور افتاده قرار دارد و هر زمستان تنها با چرخبال می توان به سد دسترسی داشت. تحلیل ریسک عوامل مختلف در ایمنی این سد، احتمالات سالانه زیر را به دست داده است {۸}.

بارگذاری هیدرولیکی  $4 \times 10^{-4}$

بارگذاری زلزله  $1/5 \times 10^{-6}$

بارگذاری معمولی  $5 \times 10^{-5}$

ریسک کلی  $4/5 \times 10^{-4}$

از نقطه نظر هیدرولوژیکی، این سد با ضوابط تطبیق دارد. علت بالا بودن ریسک هیدرولیکی، پتانسیل کاهش ظرفیت سرریز بعثت گرفتگی آن بوسیله قطعات بزرگ یخ میباشد. تحلیل ریسک جهت و تمرکز مطالعات بعدی در رابطه با کاهش ریسک را معین نمود.

#### آمریکا

درسد Salmon Lake در آمریکا، یک مطالعه ۵۰۰،۰۰۰ دلاری تحلیل ریسک موجب کاهش هزینه های ایمن سازی سد به میزان ۱۳ میلیون (یا بیش از ۷۵ درصد هزینه کل) گردید {۷}.

## آموزش

پرسنل کارآ جزء لاینفک نظارت موثر، ارزیابی ایمنی و اقدامات اضطراری میباشند. آموزش برای کلیه دست اندرکاران مدیریت سد مفید و ضروری است. آموزش های لازم می تواند در دوره ها و کارگاههای آموزشی ارائه گردد. همچنین آموزش در حین انجام وظیفه توسط پرسنل با تجربه تر ممکن میشود.

کاهش ریسک بوسیله آموزش موثر پرسنل در تمامی مراحل مختلف ایمنی سدها ممکن است. پرسنلی که از آموزشهای مناسب برخوردار باشند می توانند ریسک وقوع اشتباهات در بهره برداری را کاهش دهند. در این راستا در کشورهای مختلف برنامه ریزی مناسب در جهت ارتقاء آموزش مدیریت سدها صورت گرفته است {۷}:

## فرانسه

در سال ۱۹۹۸ کمیته ملی سدهای بزرگ فرانسه یک کتاب راهنما در زمینه ایمنی سدها در سیلاب چاپ کرد. در این کتاب تجارب جهانی از حوادث مختلف در کشورهای مختلف بعلاوه تجارب بهره برداری از ۵۰۰ سد فرانسه ارائه شده است.

## ژاپن

تراکم جمعیت در سیلابدشتهها و شرایط جغرافیایی ژاپن، اهمیت مدیریت موثر مخازن سدها را بسیار افزایش داده است. کارفرمایان سدها برنامه های آموزشی متنوعی برای بهره برداران از سدها تدوین نموده اند که از این جمله به برنامه های آموزشی وزارت احداث، شرکت برق توکیو و شرکت توسعه شبکه های برق می توان اشاره نمود. در شرکت توسعه شبکه های برق از برنامه های شبیه ساز (Simulator) ۵ میلیون دلاری برای آموزش مدیران و بهره برداران از سدها استفاده قابل ملاحظه ای شده است. هزینه آموزشهای این شرکت حدود ۵۰۰،۰۰۰ دلار در سال برآورد گردید.

## نروژ

در نروژ آموزشهای بهره برداران از سدها به صورت گسترده ای صورت می گیرد. سه برنامه مختلف برای سه سطح مختلف وجود دارد. این دوره ها از سال ۱۹۹۲ آغاز گردیده است.

## آمریکا

برنامه های آموزشی گروه مهندسی ارتش آمریکا برای پرسنل هر سد هر چهار سال یکبار و همزمان با بازدید یک تیم کارشناسی از سد به منظور بررسی فنی آن صورت می گیرد.

موارد مورد بحث طراحی و عملکرد سد، تاریخچه بهره برداری، نگرانیهای موجود و احتمال وقوع و عواقب حوادث مخرب میباشد. از مقامات محلی برای شرکت در جلسات و بحث در مورد شرایط اضطراری دعوت بعمل می آید. هزینه این آموزشهای دوره ای ۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ دلار برآورد شده است.

اداره عمران آمریکا که مسئولیت و مدیریت ۲۵۰ مخزن و ۳۵۰ سد و سیل بند را عهده دار است نیز وجود پرسنل کارآ را برای بهره برداری و نگهداری از سدها بسیار مهم ارزیابی مینماید. دوره های آموزشی U.S.B.R. شامل موارد ذیل میباشد:

- دوره های آموزشی در محل سد (تئوری و عملی) (۱ تا ۳ روزه)
- کارگاههای مدیریت منابع آب (۵ روزه)
- سمینارهای ارزیابی ایمنی سدهای موجود (۵ روزه)
- سمینارهای مدیریت شرایط اضطراری (۱ تا ۳ روزه)

پرسنل بهره بردار ملزم به تکمیل دوره های آموزشی مربوطه هر ۳ سال یکبار میباشند. سالانه ۱۰ دوره آموزشی با شرکت ۱۲۰ بهره بردار برگزار می شود. هزینه این دوره ها سالانه ۱۶۰۰۰ دلار میباشد.

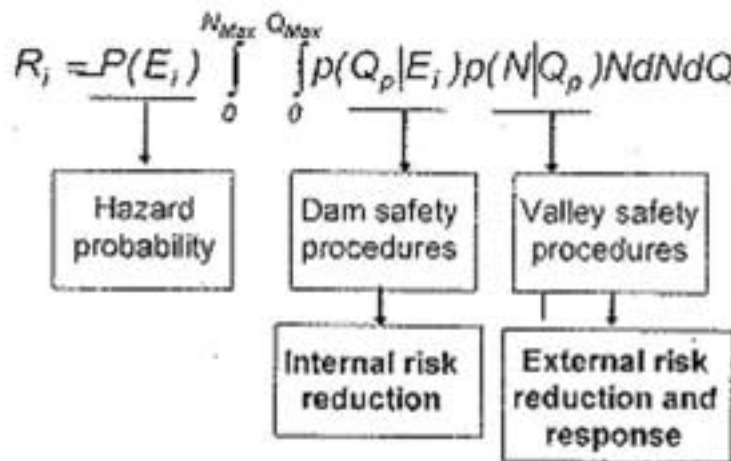
در کارگاههای مدیریت منابع آب جدیدترین اطلاعات در مورد مدیریت و نگهداری کارآی مخازن سدها در اختیار شرکت کنندگان قرار می گیرد. هزینه سالانه این کارگاه ۵۰۰۰۰ دلار و تعداد شرکت کنندگان ۱۲۰ نفر می باشد.

هر کدام از کارکنان اداره عمران آمریکا یکبار در طول دوره خدمت خود بایستی در سمینار ارزیابی ایمنی سدهای موجود شرکت نمایند. هزینه سالانه این سمینار ۳۰۰۰۰ دلار و تعداد شرکت کنندگان ۸۰ نفر می باشد.

سمینارهای مدیریت شرایط اضطراری ۴ بار در سال در سدهای اداره عمران آمریکا برگزار میشود هزینه سالانه هر سمینار ۴۰۰۰ دلار و تعداد شرکت کنندگان ۲۰ نفر میباشد.

### برنامه ریزی شرایط اضطراری:

برنامه ریزی شرایط اضطراری حاصل کار مشترک کارفرما - مدیریت سد و مسئولین وقایع غیر مترقبه میباشد. این برنامه ریزی شامل برنامه های ارتباطی، اطلاع رسانی عمومی و تخلیه جمعیت میباشد. یک عنصر مهم این برنامه ریزی، تمرینات و مانورهای آزمایشی موعدی میباشد. برنامه ریزی شرایط اضطراری با افزایش جمعیت در پایین دست از اهمیت روز افزونی برخوردار می باشد. تلفات انسانی مشاهده ای کمتر از ۰/۱ تا ۵۰ درصد جمعیت منطقه خطر متفاوت بوده است. حتی اگر درصد خرابیهای سدها ثابت بماند، بعثت افزایش جمعیت در پایین دست برنامه ریزی شرایط اضطراری نقش عمده ای در حفظ جان مردم در معرض خطر ایفا خواهد نمود. سیلابهای ناشی از شکست سد حتی برای سدهای کوچک میتواند بسیار بزرگتر از سیلابهای طبیعی رودخانه باشند. برنامه ریزی اضطراری مناسب می تواند یک شکست سد فاجعه بار از نقطه نظر تلفات انسانی را به حادثه ای با حداقل تلفات انسانی تبدیل کند (شکل (۳)) {۱۲} {۷}:



شکل (۳) فلسفه مدیریت جامع ریسک سدها

- در جریان شکست سد Oros در برزیل در سال ۱۹۸۱، شکست سد از چند روز قبل پیش بینی شده بود و هشدار به موقع، تخلیه ایمن ۱۰۰،۰۰۰ نفری که در معرض خطر بودند را ممکن نمود.
- هشدار به موقع مردم در جریان تخریب سدهای Teton, Baldwin Hills در آمریکا موجب حداقل شدن تلفات جانی گردید.
- در تخریب سد Nanaksager در هند در سال ۱۹۶۷، ۱۰۰ نفر کشته شده ولی جان عده زیادی توسط دوندگان نجات یافت.

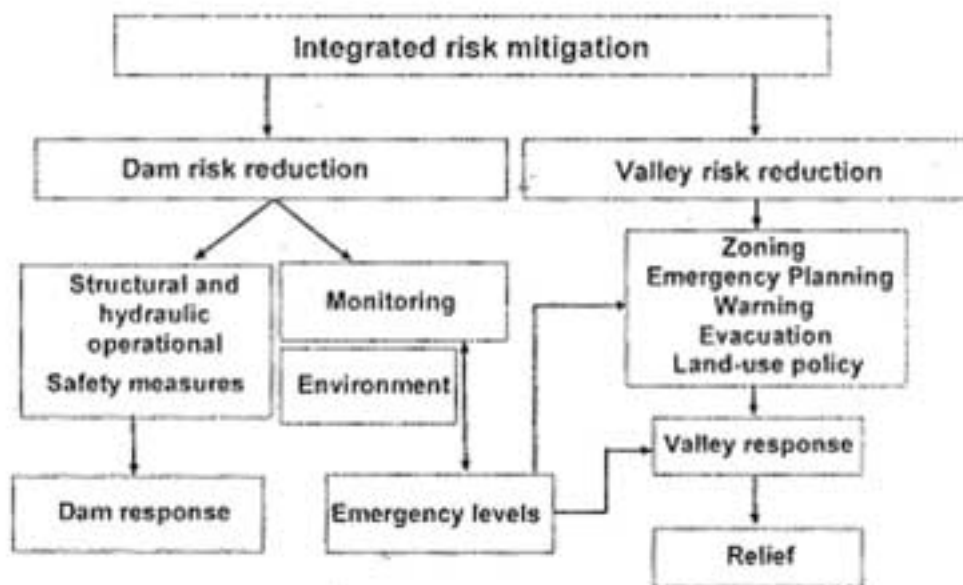
- در صورتی که سیستم های هشدار امروزی در زمان تخریب سدهای South Fork در آمریکا (۱۸۸۹)، Machhu در هند (۱۹۷۹)، Vaiont در ایتالیا (۱۹۶۳) و Guhuo در چین در سال (۱۹۹۳) موجود بود، تلفات جانی این تخریبهها بسیار کاهش می یافت.
- سد Fergong در الجزایر ۲ بار در سیلابهای ۱۸۸۱ و ۱۹۲۷ تخریب گردید. در سال ۱۸۸۱، دویست نفر کشته شدند ولی در سال ۱۹۲۷ سیستم هشدار از وقوع تلفات انسانی جلوگیری نمود.

## نروژ

از سال ۱۹۹۵ کلیه کارفرمایان سدها ملزم به برنامه ریزی برای شرایط اضطراری شدند. در این رابطه بایستی مانورهای آزمایشی هر سه سال یکبار انجام شود. شرکت Statkraft که کارفرمای ۷۱ سد در نروژ میباشد هزینه ایجاد، به روز کردن سالانه و مانورهای آزمایشی سیستمهای مدیریت اضطراری را برای هر سد به ترتیب ۳۷۵۰۰، ۳۷۵۰ و ۱۸۷۵۰ دلار برآورد کرده است.

## سیستم های هشدار سیلاب

همانطوریکه قبلاً اشاره شد، هشدار به موقع یک عامل بسیار مهم در نجات جان انسانهای در معرض خطر میباشد. در سالهای اخیر استفاده روز افزون از سیستم هایی که زمان پیش هشدار را افزایش دهند، صورت گرفته است. استفاده از اطلاعات به هنگام هواشناسی و هیدرولوژیکی می تواند در افزایش زمان پیش هشدار نقش مهمی را ایفا نماید. بایستی در نظر داشت که بسیاری از سیستم های مورد استفاده در هشدار سیلاب می توانند بوسیله سیلابی که سد را تهدید می کند، از کار بیافتند. برای مثال سیلاب می تواند سیستم های ارتباطی و راهها را مختل نماید. محیط تنش آور که حاصل میشود نیز می تواند از کارآیی پرسنل بکاهد {۱۲} {۹} {۳}:



شکل (۴) مدیریت جامع ریسک در سد و پایین دست

- درسد بتنی وزنی Aberferdie در کانادا ورود رسوب بیش از میزان پیش بینی شده در طراحی (بعلا سه سال بسیار پرآب ۱۹۹۵-۱۹۹۷)، می تواند پایداری سد را با خطر مواجه کند. بنابراین برنامه ریزی شرایط اضطراری در دستور کار قرار گرفت و با نظارت پیوسته حوزه آبریز ایمنی مردم در سیلاب سال ۱۹۹۹ تضمین گردید. کل پرسنل لازم برای برنامه ریزی شرایط اضطراری

۹۰ نفر \_ روز برآورد گردیده است. اکنون برنامه هایی در دست اجرا است که اقدامات سازه ای برای افزایش پایداری سد صورت پذیرد {۷}.

▪ شش سد بزرگ و ۸ نیروگاه با ظرفیت کلی ۱۶۰۰ مگاوات بر روی رودخانه Saint Maurice احداث شده است. این سدها که از سال ۱۹۱۱ تا ۱۹۵۸ احداث گردیدند، قادر به عبور سیلابهای ۱۰۰۰۰ ساله یا PMF نمی باشند. مطالعات ایمنی سازی که در اوایل دهه ۱۹۹۰ انجام گرفت، هزینه ایمن سازی را ۴۰۰ میلیون دلار برآورد نمود. با توجه به قابل ملاحظه بودن هزینه ایمن سازی، تحلیل‌های اقتصادی ریسک صورت پذیرفت و تنها در یکی از سدها ایمن سازی سازه ای اعمال گردید. در بقیه سدها، ایمن سازی مردم پایین دست از طریق روشهای غیر سازه ای در دستور کار قرار گرفت و در نتیجه حدود ۴۰۰ میلیون دلار صرفه جویی حاصل گردید {۷}.

▪ در نروژ اولین سیستم های هشدار در پایین دست سدها در جریان جنگ جهانی دوم بکار گرفته شد. اکنون نیز سیستم های هشدار الکترونیکی که می تواند آذیرهای خطر را فعال کند بکار گرفته میشوند.

### اسپانیا

سیستم اطلاعات هیدرولوژیکی خودکار در حوزه Segara اطلاعات به هنگام در نقاط حساس حوزه را در اختیار قرار میدهد. این سیستم شامل اجزاء زیر میباشد (ICOLD, 2000):

- ۸۹ نقطه کنترل در حوزه بطوریکه شرایط کلی حوزه قابل نظارت میباشد.
- ۷ ایستگاه پردازش که اطلاعات مربوط به هر منطقه از حوزه ذخیره و پردازش میشود.
- یک سیستم ارتباطی دیجیتالی که شامل ۱۶ ایستگاه تکرارگر و گیرنده در تمام نقاط کنترلی میباشد، انتقال اطلاعات به مرکز در Murcia را ممکن میسازد.
- یک مرکز پردازش با دریافت اطلاعات، ذخیره، پردازش و ارائه آنها را انجام می دهد.

پرسنل مورد نیاز برای نگهداری سالانه سیستم و تغییر اطلاعات بشرح زیر میباشد:

- مهندس ارشد ۰/۱ نفر - سال
- مهندس فنی ۰/۲ نفر - سال
- کارشناس هیدرولوژی ۰/۱ نفر - سال
- دستیار فنی ۰/۶ نفر - سال

### سد Olympus در آمریکا

سد خاکی Olympus در سال ۱۹۴۹ احداث گردید. آخرین مطالعات نشان میدهد که این سد در سیلاب های بزرگتر از ۱۲ درصد PMF دچار روگذری سیلاب میشود. گزینه سازه ای ایمن سازی مناسب تشخیص داده نشدند زیرا اثر مرحله ای تخریب سد موجب افزایش تلفات و خسارات در پایین دست نمی گردید. سیستم هشدار سیلاب برای تخلیه مردم هم در زمان عبور سیلابهای بزرگ از سرریز و هم در صورت شکست سد مناسب تشخیص داده شد. هزینه این سیستم بسیار کمتر از افزایش ایمنی بوسیله روشهای سازه ای برآورد گردیده است .

### اصلاح مدیریت بهره برداری از سد

ریسک تخریب یک سد وابسته به ارتفاع آب و حجم مخزن میباشد. بنابراین می توان با کاهش ارتفاع و حجم مخزن بوسیله مدیریت بهره برداری ریسک را کاهش داد. کاهش حجم مخزن موجب کاهش بیشتر سیلابها در مخزن می گردد. هزینه این گونه مدیریت بهره برداری شامل آب و انرژی از دست رفته، کاهش پتانسیل کاربردهای تفریحی و احتمالاً کاهش کیفیت آب میباشد. در مواردی اصلاح مدیریت بهره برداری مخزن بمنظور مدیریت سیلاب در پایین دست، موجب کاهش حجم سرریز شده از مخزن و افزایش انرژی برقایی تولید شده گردیده است. در ذیل نمونه هایی از اصلاح مدیریت بهره برداری ارائه می گردد {۷}:



### سد Madawaska در کانادا

شرکت تولید برق Ontario کارفرمای ۱۴ سد بر روی رودخانه Madawaska می باشد. مطالعات انجام شده نشان داد که PMF موجب روگذری در ۹ سد شده و پتانسیل خرابی ۶ سد وجود خواهد داشت. اصلاح مدیریت بهره برداری احتمال روگذری ۷ سد را منتفی نمود و ارتفاع یکی از این دو سد افزایش داده شد و پتانسیل خطر سد دیگر پایین ارزیابی گردید. مدیریت بهره برداری موجب کاهش هزینه های ایمن سازی این سدها به میزان ۱۰ میلیون دلار گردید.

### کره - رودخانه Guem

سد Dxecheong که در سال ۱۹۸۰ احداث گردید بر روی رودخانه Geum قرار گرفته است. هدف اصلی سد کنترل سیل و ذخیره سازی آب برای کشاورزی می باشد. حدود ۶۷ درصد بارندگی سالانه از ماه ژوئن تا اوت رخ میدهد. بهینه سازی منحنی فرمان سد در سال ۱۹۹۲ در دستور کار قرار گرفت. اهداف بهینه یابی، کمینه کردن حجم مخزن در فصل سیلاب، بیشینه کردن انرژی تولید شده، بیشینه آب تامین شده برای کشاورزی بود. منحنی فرمان حاصله ریسک سیلاب را کاهش داد بدون آنکه اثرات منفی در تولید انرژی ایجاد نماید. شبیه سازی منحنی فرمان برای دوره آماری افزایش قابل ملاحظه انرژی تولید شده، حجم آب تنظیمی و انرژی اولیه را نشان داد. در عمل نیز اعمال مدیریت بهره برداری جدید سیلاب و خالی نگهداشتن مخزن در سال ۱۹۹۵، پیک سیلاب از ۵۸۰۰ متر مکعب بر ثانیه به ۱۷۰۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش یافت. خسارات سیلابی که با اعمال منحنی فرمان قبلی بوجود می آمد ۳۴ میلیون دلار برآورد شده است.

### روسیه - رودخانه ولگا

احداث سیستم سدهای رودخانه ولگا شامل ۱۱ سد، توسعه گسترده دشتهای پایین دست را بدنبال داشته است. در نتیجه سیلاب بزرگتر از ۳۰۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه می تواند خسارات مهمی به مناطق مسکونی و مزارع کشاورزی وارد نماید. این در حالی است که سیلاب متوسط سالانه ولگا ۳۳۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه می باشد. به منظور افزایش ایمنی، اعمال روشهای غیر سازه ای در دستور کار قرار گرفته است و مدیریت بهره برداری سدهای ولگا اصلاح گردیده است. به منظور کاهش سیلاب در پایین دست، حجم لازم برای کنترل سیلاب ۷۰ تا ۱۱۰ میلیارد متر مکعب می باشد. این حجم را بدو طریق میتوان فراهم نمود:

۱. خالی کردن سد در ابتدای بهار.
  ۲. افزایش تراز بیشینه آب در مخزن که موجب غرقاب شدن مناطق مسکونی و کشاورزی حاشیه مخزن میشود.
- در مورد تخلیه مخزن در صورتیکه پیش بینی حجم سیلاب دقیق نباشد، عمق لازم برای کشتیرانی در پایین دست در بعد از فصل سیلاب بدست نخواهد آمد. در برخی سالها خطای ۴۰ درصد در پیش بینی حجم سیلاب مشاهده شده است. اکنون مطالعات لازم در زمینه مدیریت بهینه مخازن ولگا در دست انجام می باشد.

### آمریکا - سد Foss

سد خاکی Foss در سال ۱۹۶۱ احداث گردید. مطالعات سال ۱۹۸۱ نشان داد که سیلابی با حجم ۶۳ درصد PMF میتواند موجب روگذری سد شود. در سال ۱۹۷۷ تراوش در تکیه گاه چپ موجب مشکلاتی گردید و در نتیجه تراز نرمال ۳ متر کاهش داده شد. در رابطه با ایمنی هیدرولوژیکی چند گزینه سازه ای مورد بررسی قرار گرفت. کمترین هزینه گزینه سازی مربوط به احداث فیوز پلاگ بود (۸ میلیون دلار) ولی در سیلاب PMF، ۳۳۰۰ نفر در پایین دست در معرض خطر قرار می گرفتند. هزینه افزایش ارتفاع نیز ۸ میلیون دلار برآورد شد و تعداد افراد در منطقه خطر ۷۵ نفر برآورد گردید.

اصلاح مدیریت بهره برداری از مخزن در رابطه با ایمن سازی سد در نظر گرفته شد. بعد از کاهش تراز نرمال در سال ۱۹۷۷ مخزن سد بندرت به بالای تراز نرمال کاهش یافته رسیده بود. مطالعات انجام شده نشان میدهد که مخزن با تراز نرمال کاهش یافته میتواند حجم تنظیمی مورد نیاز را تامین نماید. در نتیجه حجم میان تراز نرمال اولیه و کاهش یافته به کنترل سیلاب اختصاص داده شد.

ارتفاع آزاد سد Foss در طراحی اولیه ۲ متر بود. این ارتفاع آزاد با روشهای محاسباتی سال های ۱۹۵۰ حاصل گردیده بود. اکنون روشهای جدیدتر ارتفاع آزاد را برابر ۱ متر بدست میدهند. با اعمال تراز نرمال و ارتفاع آزاد کاهش یافته، ریسک روگذری سد ۵۰ درصد کاهش می یابد. بنابراین اداره عمران آمریکا تصمیم گرفت گزینه غیر سازه ای را که بدون هزینه اضافی میباشد و ریسک را بنحو قابل ملاحظه ای کاهش میدهد، انتخاب کند.

### طراحی جامع گرایانه سازه های هیدرولیکی

مطالعات موردی ارائه شده در مورد کاهش ریسک سدها بوسیله روشهای غیر سازه ای عمدتاً مربوط به ۸ کشور آمریکا، نروژ، فرانسه، ژاپن، کانادا، اسپانیا، کره و روسیه می باشند. در عمل بنیاد تئوریک این راهبرد در ایران در قالب یک رساله دکتری تحت عنوان روش جامع گرایانه در طراحی تطبیقی سازه های هیدرولیکی در سالهای ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۸ پی ریزی گردید. در این رساله ابتدا بحران آب، مدیریت سیلاب و تضمین توسعه پایدار به عنوان مهمترین چالشهای بشر در قرن بیستم مطرح گردیده اند و سپس به عدم قطعیتهای پارامترهای طراحی سازه های هیدرولیکی در اثر تغییرات هیدروسیستم ها اشاره شده و نتیجه گیری شده است که موفقیت بشر در مقابله با این بحرانها، در گرو تبیین دیدگاهها و راهبردهای جدید در طراحی سازه های هیدرولیکی میباشد. محور اصلی این رساله، اعمال روش جامع گرایانه می باشد. در این روش، روابط متقابل میان اجزا و کلیت سیستم از اهمیت ویژه ای برخوردار می شوند {۴}.

سیستم سازه های هیدرولیکی شامل سخت افزار (سازه های ذخیره ای، انتقالی و کنترل) و نرم افزار می باشد. قسمت نرم افزاری که مشتمل بر مدیریت، شناخت و اطلاعات می باشد، عموماً به صورت کامل در طراحی در نظر گرفته نمی شود. این در حالی است که تغییر مرز میان نرم افزار و سخت افزار می تواند ابعاد سازه های هیدرولیکی را بطور قابل ملاحظه ای تغییر دهد. در این راستا، تطبیق طراحی با نیاز، محدودیتها و اهداف می تواند ابعاد بهینه نرم افزاری و سخت افزاری سیستم را بدست دهد. از طرف دیگر با تغییر ابعاد قسمت نرم افزاری، تطبیق در زمان و مکان با یک هیدروسیستم متغیر و غیر قابل پیش بینی امکان پذیر می گردد. با استفاده از تحقیقات مختلف و تجارب جهانی و بر اساس دیدگاه جامع گرایانه و با ایجاد روبربط متقابل میان نرم افزار و سخت افزار و تخصصهای مختلف، اصول بنیادین طراحی جامع گرایانه سازه های هیدرولیکی تبیین گردید. این راهبرد بر مدیریت پیوسته و فراگیر و طراحی انعطاف پذیر استوار گردیده است. بنابراین طراحی مدیریت در دستور کار قرار می گیرد. مدیریت پیوسته مستلزم نظارت و طراحی پیوسته می باشد و در نتیجه نظارت پیوسته هیدروسیستم، استفاده از خصوصیات فصلی و پیش بینی های دراز مدت و کوتاه مدت در طراحی ممکن می گردد. با توجه به عدم قطعیت پارامترهای طراحی، عواقب فاجعه بار تخریب و محدودیتهای اقتصادی، بایستی ایمنی در سازه نهادینه گردد. از طرف دیگر با مدیریت بحران در قبل و به هنگام بحران می توان ایمنی سازه را افزایش داد. در نهایت و در بدترین شرایط، تخلیه ایمن مردم بایستی تضمین شده باشد. با اعمال این راهبرد از یک طرف میتوان ریسک بیشتری را در طراحی اعمال نمود و از طرف دیگر ایمنی را افزایش داد. تجارب جهانی بوضوح نشان می دهند که قسمت عمده خرابیها و مشکلات سازه های هیدرولیکی بعلمت عدم رعایت این اصول بنیادی بوقوع پیوسته اند.

به منظور اعمال اصول بنیادی جامع گرایانه در طراحی سدها، مدل خبره KURIT با استفاده از اصول فوق تهیه گردید. این مدل براساس طراحی پیوسته پی ریزی شده است و برای طراحی، احداث و بهره برداری سدها می تواند مورد استفاده قرار گیرد. مهم ترین کاربردهای KURIT، انتخاب سیلاب طراحی و تراز اولیه مخزن، افزایش ایمنی، تعیین حجم بهینه مخزن بر اساس دیدگاه جامع گرایانه، کاهش تضاد اهداف مختلف در بهره برداری و آبگیری زود هنگام می باشند.

راهکارهای پیشنهادی KURIT در رابطه با آبگیری زود هنگام سدها به شرح زیر می باشند:

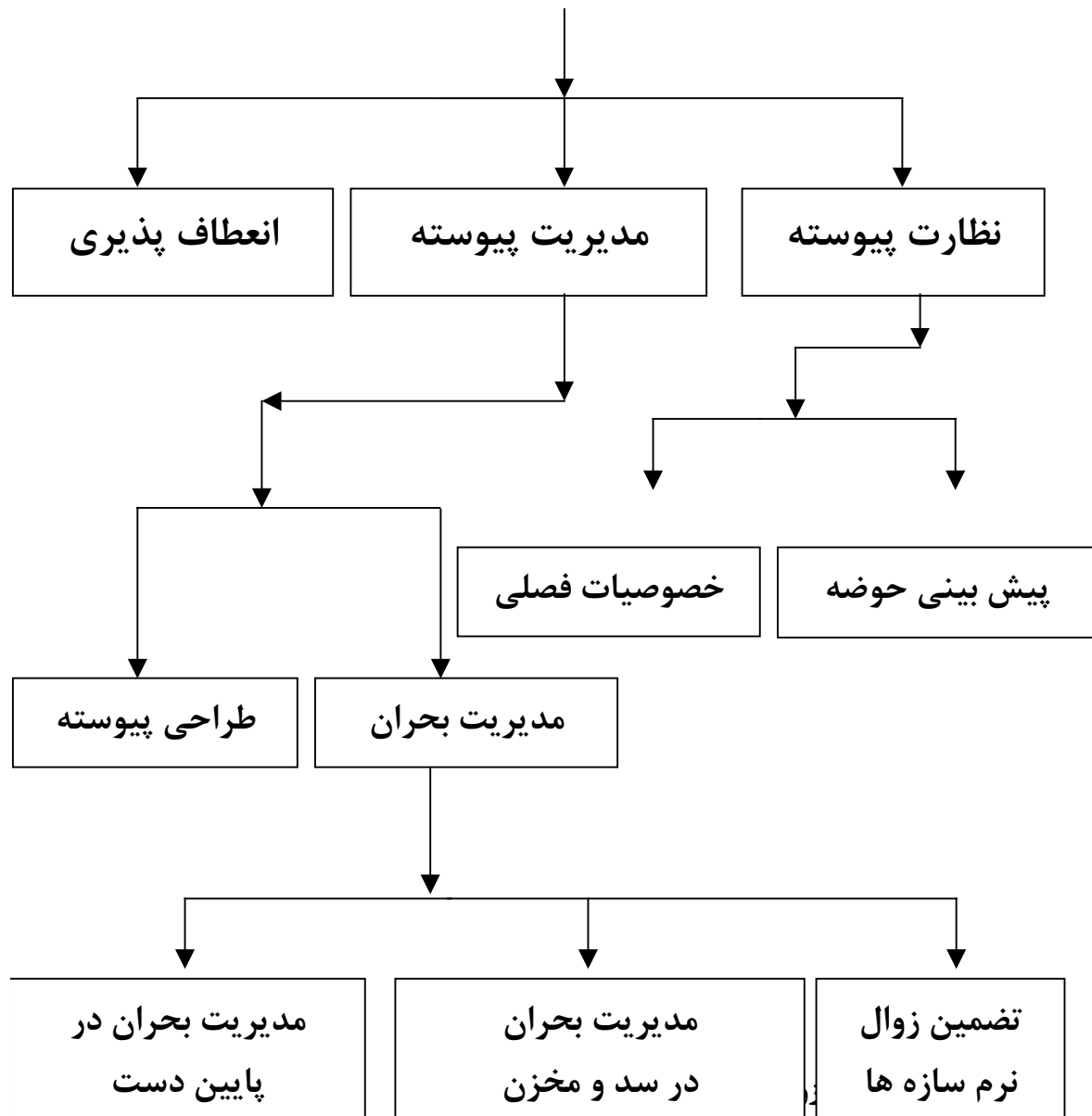
۱. انعطاف پذیری
۲. استفاده از خصوصیات فصلی
۳. مدیریت بحران
۴. تضمین زوال نرم

۵. استفاده از پیش بینی های درازمدت و کوتاه مدت

۶. نظارت پیوسته

اعمال این راهکارها در آبگیری سد مارون با موفقیت همراه بود و منجر به یک ابداع جدید بنام فیوز پسته ای در مهندسی سد گردید. در صورتیکه به نتایج مدل پیش بینی در بهمن ماه ۱۳۷۵ توجه شده بود و از فیوز پسته ای برای پلاگ کردن تونل انحراف ۲ استفاده گردیده بود، بحران نشت از مخزن این سد که ۶ ماه بطول انجامید و خطرات بسیار مهمی را متوجه سد نمود، در مرحله اول قابل اجتناب بود و در مرحله بعد در روزهای اول آبگیری با انفجار فیوز پسته به پایان می رسید {۵}.

### طراحی جامع گرایانه سازه های هیدرولیکی



شکل (۵) راهبردهای طراحی جامع گرایانه سازه های هیدرولیکی

آبگیری زود هنگام سد کرخه در بهمن ماه ۱۳۷۸ نمونه ای بارزی از منافع روشهای غیرسازه ای در مهندسی سد می باشد. این سد با حجم مخزن ۵/۵ میلیارد متر مکعب، بزرگترین سد ایران از نقطه نظر حجم بدنه سد و حجم مخزن می باشد. بعلت پیچیدگی شرایط لازم برای انسداد نهایی کالورتها و اصرار کارفرما برای آبگیری زود هنگام به منظور استحصال هر چه سریعتر منافع پروژه، شروع آبگیری این سد در سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ با مشکلات مهمی مواجه بود. در این راستا با توجه به محدودیتهای موجود، استفاده از روشهای غیرسازه ای از جمله پیش بینی های هیدرولوژیکی ضروری تشخیص داده شد و مطالعات لازم از بهمن ماه ۱۳۷۷ آغاز گردید. این مطالعات از قسمتهای مختلفی بشرح زیر تشکیل گردیده بود:

#### پیش بینی های هیدرولوژیکی

در این راستا مدل شبکه عصبی مصنوعی بر اساس آمار ماهانه بارندگی و آورد رودخانه ایجاد گردید. مشابه دیگر مدل های هیدرولوژیکی رودخانه های ایران، نتایج این مدل از اواخر بهمن ماه قابل اتکا می باشد.

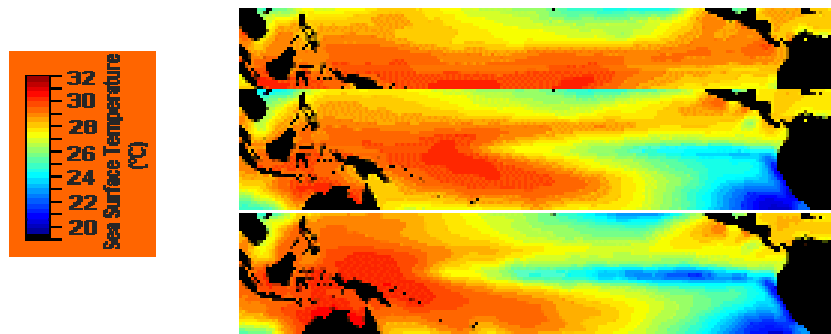
#### خصوصیات فصلی

استفاده از خصوصیات فصلی رودخانه کرخه نقش بسیار مهمی در عملی شدن اولین آبگیری سد کرخه در زمستان ۱۳۷۸ ایفا نمود. مطالعات انجام شده این خصوصیات را بشرح زیر ارائه می دهد:

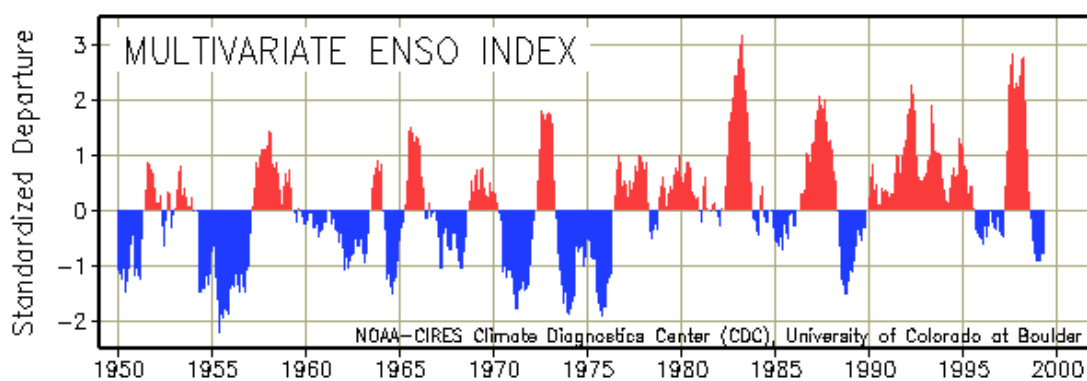
۱. از اوایل اریهشت تا اواسط آبان پتانسیل سیلاب بشدت کاهش می یابد و این دوره را میتوان با توجه به شرایط پروژه، از نقطه نظر خطر سیلاب کاملاً ایمن محسوب نمود.
۲. پتانسیل سیلابهای پاییزه از اواسط آبان تا اواسط آذر وجود دارد. زمان هیدروگراف و حجم این سیلابها نسبت به سیلابهای بهاره کمتر می باشد.
۳. از اواخر آذر تا اواسط اسفند، پتانسیل سیلاب به علت یخبندان از سیلابهای بهاره و پاییزه کمتر می باشد. این دوره نیز با توجه به حجم قابل ملاحظه سد در حال احداث، ایمن محسوب می شود.
۴. از اواخر اسفند تا اوایل اردیبهشت، پتانسیل سیلابهای بهاره وجود دارد که هم از نقطه نظر سد در حال احداث و هم از نظر ایمنی سد در دوره بهره برداری، بحرانی ترین سیلاب محسوب می شود.

#### پیش بینی های اقلیمی

با توجه به تراز سد در حال احداث و در سرویس نبودن سرریز در پاییز ۱۳۷۸، پیش بینی آورد رودخانه در پاییز ۱۳۷۸ در رابطه با ایمنی سد مورد نیاز بود. در این راستا همانطوریکه قبلاً اشاره شد، پیش بینی های هیدرولوژیکی قبل از اسفند ماه فاقد کارایی لازم می باشند و ناچار استفاده از پیش بینی های اقلیمی بوسیله (ENSO) در دستور کار قرار گرفت. بر اساس تحقیقات دامنه دار انجام شده در جهان، شرایط اقلیمی در فصل بعدی به عوامل مختلفی بستگی دارد که مهمترین آنها دمای سطح اقیانوس آرام (SST) می باشد و بر اساس این پارامترها، پدیده های ال نینو و لانینا تعریف می شوند (شکل (۵)). با استفاده از این روش برای اولین بار در تاریخ بشر، دانشمندان در سال ۱۹۹۷ بدرستی سیلابهای بزرگ کالیفرنیا و فلوریدا را از ۶ ماه قبل پیش بینی نمودند و در نتیجه با وجودیکه بیشترین بارندگی مشاهده ای در این ایالتها در آن سال بوقوع پیوست، تلفات و خسارات این سیلابها بسیار کمتر از سیلابها سالهای قبل گزارش شده است.. به منظور کمی کردن پدیده های ال نینو و لانینا، پارامترهای SOI و MEI تعریف شده اند (شکل (۶)). پارامتر SOI نمادی از اختلاف فشار هوا در دو سوی اقیانوس آرام میباشد و پارامتر MEI حاصل از درجه حرارت سطح اقیانوس، فشار هوا و ملفه های سرعت باد می باشند. این پارامترها از سال ۱۸۵۴ تاکنون بصورت ماهانه موجود میباشند و با استفاده از این پارامترها و آمار هیدرولوژیکی برای ۴۵ سال، مدل شبکه عصبی مصنوعی بمنظور انجام پیش بینی های اقلیمی ایجاد گردید {۱۱}.



شکل (۶) سالهای ال نینو (ژانویه ۱۹۹۸)، عادی (ژانویه ۱۹۹۴) و لانینا (ژانویه ۱۹۹۹) در اقیانوس آرام



شکل (۷) پارامتر MEI مورد استفاده در پیش بینی های اقلیمی

#### ◀ مدیریت شرایط اضطراری

با توجه به ریسک بالای روگذری سد در حال احداث، پیش بینی های کوتاه مدت و انجام اقدامات لازم در شرایط اضطراری مانند احداث خاکریز اضطراری، در مراحل اولیه سیلاب می تواند نقش مهمی در افزایش ایمنی سد ایفا نماید.

#### ◀ نظارت پیوسته حوزه

با توجه به مشکلات مربوط به برچیدن جرثقیل ۱۲۰ تن بالای برج آبخیز بلافاصله بعد از شروع آبخیزی و در سرویس نبودن سرریز، نظارت پیوسته بر حوزه الزامی بود. در این راستا از پیش بینی های کوتاه مدت و میان مدت هواشناسی و بازدید از حوزه استفاده گردید.

#### اعمال روشهای غیرسازه ای در اولین آبخیزی سد کرخه

نتایج اعمال و کارایی روشهای غیرسازه ای در آبخیزی سد کرخه از بهمن ۱۳۷۷ تا فروردین ۱۳۷۹ شرح ذیل میباشد:

#### ◀ اسفند ۱۳۷۷

به منظور حفاظت تونلهای آب بر و نیروگاه در حال احداث کرخه از خطر سیلاب ۵۰ ساله، برنامه ریزی برای احداث خاکریزی در جلوی این تونلها (شکل (۷)) انجام گرفته بود. در همان زمان مدلهای پیش بینی هیدرولوژیکی و اقلیمی، آورد زیر متوسط را برای فروردین پیش بینی نمودند. بازدید از حوزه نیز این مسئله را مورد تایید قرار داد. با توجه به این نتایج وقوع سیلاب ۵۰ ساله در فروردین غیر محتمل پیش بینی گردید و عدم نیاز به خاکریز حفاظتی مطرح گردید. در این راستا پیشنهاد شد که بعلا حجم قابل ملاحظه مخزن تا تراز تونلها، با استفاده از پیش بینی های کوتاه مدت، در صورت وقوع سیلاب در بهار، خاکریز حفاظتی قبل از آنکه سیلاب به تراز تونلهای آب بر نیروگاه برسد، احداث شود. به این ترتیب همپوشانی پیش بینی های دراز مدت

هیدرولوژیکی و اقلیمی، مدیریت شرایط اضطراری و نظارت پیوسته حوزه، آنچنان قابل اتکا بود که احداث خاکریز حفاظتی لغو گردید. این اولین بار در ایران بود که درمهندسی سد روشهای غیرسازه ای بطور کامل جایگزین یک سازه شدند.

#### فروردین ۱۳۷۸

با توجه به خصوصیات فصلی و آورد کم رودخانه کرخه در فروردین، کالورت‌های ۲ و ۳ در ۳۰ فروردینماه مسدود شده و عملیات تبدیل این کالورت‌ها به تخلیه کننده های تحتانی آغاز گردید.

#### تیرماه ۱۳۷۸

با استفاده از پیش بینی هایی که حاکی از ادامه پدیده لائینا در پاییز ۱۳۷۸ بود، کاهش پتانسیل سیلابهای پاییزه مطرح گردید.



شکل (۸) ورودی تونلهای آب بر نیروگاه سد کرخه

#### شهریور ۱۳۷۸

با استفاده از مدل پیش بینی اقلیمی همخوانی بسیار نزدیک پدیده های ال نینو و لائینا با پر آبی و کم آبی کرخه در آبان و آذر مشاهده گردید. در ۴۵ سال اخیر همبستگی آورد رودخانه کرخه در آبان و آذر با ENSO در جدول (۱) ارائه شده است:

پدیده حاکم	تعداد سالها	آورد متوسط رودخانه کرخه در آبان و آذر
ال نینو قوی	۷	در ۷ سال آورد بالای متوسط در آبان یا آذر یا هر دو
لائینای قوی	۶	در ۶ سال آورد زیر متوسط در آبان و آذر
ال نینو ضعیف	۱۰	در ۸ سال آورد بالای متوسط در آبان یا آذر یا هر دو
لائینای ضعیف	۷	در ۵ سال آورد زیر متوسط در آبان و آذر

جدول (۱) همبستگی آورد کرخه در آبان و آذر با پدیده های ال نینو و لائینا در ۴۵ سال گذشته

با توجه به اینکه مدل‌های دینامیکی و آماری ادامه پدیده لائینا را تا اوایل سال ۲۰۰۰ میلادی پیش بینی نموده بودند، آبدهی کرخه در پاییز ۱۳۷۸، زیر متوسط پیش بینی گردید و در نتیجه سیلاب‌های بزرگ در آبان و آذر ۱۳۷۸ غیر محتمل پیش بینی گردیدند. این پیش بینی کاملاً با واقعیت منطبق بود و با در نظر داشتن خصوصیات فصلی رودخانه کرخه، نتایج مدل پیش بینی اقلیمی و حجم موجود مخزن سد کرخه، دوره ایمن از نقطه نظر سیلاب برای پروژه کرخه از ۶ ماه به ۱۰ ماه افزایش یافت. افزایش دوره ایمن با توجه به در سرویس نبودن سرریز، نقش مهمی در افزایش ایمنی سد ایفا نمود. در این رابطه شایان ذکر است که محاسبات نشان می‌دهند که ریسک روگذری سد کرخه در سال آخر بیشتر از کل ریسک روگذری در دوره بهره برداری ۱۰۰ ساله می‌باشد و این مسئله نشان می‌دهد که با طراحی سرریزها برای PMF، ایمنی همسنگ در دوره احداث و بهره برداری حاصل نمی‌گردد.

#### ◀ آذر ۱۳۷۸

در آبان و ابتدای آذر ۱۳۷۸، بیشتر مدل‌های دینامیکی پیش بینی ENSO، پایان پدیده لائینا را در زمستان آن سال پیش بینی می‌کردند. براساس پارامترهای SOI و MEI پیش بینی شده، مدل اقلیمی، آورد متوسط را برای زمستان ۱۳۷۹ پیش بینی نمود. در عمل پدیده لائینا ادامه یافت و در تابستان ۱۳۷۹ به پایان رسید. در نتیجه با توجه به اینکه پارامترهای ناصحیح در مدل بکار گرفته شده بود، نتایج مدل اقلیمی با آورد زیر متوسط منطبق نگردید. ولی دیدگاه جامع حاکم بر مطالعات مانع از آن شد که ضعف یکی از پیش بینی‌ها بتواند عملکرد کلی سیستم را مخدوش نماید. بعلاوه با توجه به اینکه از یک طرف خطر تخریب سد در سیلاب و از طرف دیگر خطر کم آبی مطرح بود، محافظه کاری پیش بینی فوق در راستای ایمنی در سیلاب منطقی و قابل توجیه بنظر می‌رسد.

#### ◀ بهمن ۱۳۷۸

معمولاً نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی پیش بینی آورد رودخانه‌های برفی ایران، در اواسط اسفند ماه از دقت قابل قبولی برخوردار می‌شود. با این وجود بعلت نیاز به پیش بینی آورد کرخه قبل از آبگیری، در ۱۵ بهمن ۱۳۷۸ آبدهی متوسط در سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ کاملاً زیر متوسط (۳۰ درصد زیر متوسط) در محدوده ۴۰ درصد زیر متوسط تا متوسط پیش بینی گردید. بطوریکه بدترین سناریو ممکن از نقطه سیلاب و با ملحوظ کردن محافظه کاری بسیار زیاد، آبدهی متوسط بود که با کم آبی مشاهده‌ای در اواخر زمستان و اوایل بهار منطبق گردید. بر اساس این پیش بینی آبگیری در اواخر بهمن ماه ۱۳۷۸، سد بدون سرریز را با خطر روگذری سیلاب مواجهه نمی‌نمود. با این وجود توصیه شده بود که بمنظور افزایش دقت و اتکاپذیری مدل پیش بینی، شروع آبگیری در دهه اول اسفند صورت پذیرد. در عمل مدیریت پروژه تصمیم به شروع آبگیری در اواخر بهمن ماه ۱۳۷۸ گرفت. با پایان یافتن اقدامات لازم این مهم در ۲۴ بهمن ماه به انجام رسید. در عمل حجم کل قابل ذخیره در آبگیری اواخر بهمن و اوایل اسفند، چندان متفاوت نبود. در هر صورت اتکا بر روش‌های غیر سازه‌ای در اولین آبگیری، امکان استفاده بهینه از مخزن سد در حال احداث کرخه برای تنظیم آب کرخه در خشکسالی ۷۹-۱۳۷۸ را فراهم نمود در حالیکه با روش‌های سازه‌ای به تنهایی این امر به هیچوجه ممکن نمی‌گردید.

#### ◀ اسفند ۱۳۷۸

در ۲۵ اسفند ۱۳۷۸ با استفاده از مدل مختلط هیدرولوژیکی - اقلیمی با بیش از ۲۵۰۰ پارامتر، دبی متوسط رودخانه کرخه در سال آبی ۱۳۷۹-۱۳۷۸ با دقت قابل قبولی (خطای حدود ۲۰ درصد) پیش بینی گردید. این پیش بینی نیز سیمای سال خشک و ایمنی سد در مقابل سیلاب‌های بهاره که قبلاً در ۱۵ بهمن پیش بینی شده بود را با تاکید بیشتری مورد تایید قرارداد. در جریان انجام پیش بینی‌های اسفندماه، کاهش دقت پیش بینی‌ها بعلت نبود ایستگاه برف سنجی و تعداد ایستگاه‌های بارانسنجی با آمار بلند مدت در حوزه (۳) ایستگاه برای بیش از ۴۰ هزار کیلومتر) مشاهده گردید. با این وجود حتی مدل‌های پیش بینی با دقت مدل‌های استفاده شده در آبگیری سد کرخه می‌تواند استفاده از درصد مهمی از حجم مخزن سدها را برای مدیریت سیلابها در مخزن و کاهش قابل ملاحظه ابعاد سرریز



(بدون ایجاد خللی در اهداف کشاورزی و برقایی) را امکان پذیر نمایند. امید است در سالهای آینده شاهد کاربرد روزافزون روشهای غیر سازه ای برای افزایش ایمنی و کاهش هزینه ها در پروژه های سدسازی کشورمان باشیم.

### نتیجه گیری

با توجه به مطالعات موردی ارائه شده، گستره وسیعی از گزینه های غیر سازه ای هم اکنون توسط کارفرمایان و بهره برداران از سدها برای کاهش ریسک بکار گرفته میشود. استفاده از تحلیلهای ریسک می تواند کمی کردن منافع این اقدامات را ممکن سازد. در این راستا منافع اقتصادی روشهای غیر سازه ای می تواند مستقیماً با گزینه های سازه ای مقایسه شود. برخی از مطالعات موردی نشانگر کاهش قابل ملاحظه هزینه ها بعثت استفاده از گزینه های غیر سازه ای میباشد. استفاده و موفقیت اقدامات غیر سازه ای بوضوح نشان میدهد که در تحلیلهای ریسک بایستی کلیه اقدامات غیر سازه ای بطور کامل مورد بررسی قرار گیرند. هزینه نسبتاً کم روشهای غیر سازه ای نشان میدهد که حتی اگر گزینه های سازه ای مطرح نباشند، بایستی گزینه های غیر سازه ای بدقت مورد بررسی قرار گیرند.

یک سد حتی اگر به بهترین نحو طراحی، احداث و بهره برداری گردد، باز هم ذخیره آب با ریسک همراه است. استفاده از گستره وسیعی از اقداماتی که موجب کاهش ریسک می شوند، منطقی و منطبق با دور اندیشی میباشد. تحلیل ریسک ابزار مفیدی در این راستا می باشد. تجارب اخیر نشان می دهد که برای کارفرمایانی که با محدودیت منابع مالی مواجه بودند نیز امکان انجام تحلیلهای ریسک با هزینه ای معقول وجود دارد.

قسمت عمده هزینه روشهای غیر سازه ای کاهش ریسک، هزینه پرسنلی است. در این رابطه کارآئی پرسنل بستگی زیاد به آموزشهایی که دریافت کرده اند، دارد. تجارب موجود نشان می دهد که آموزشهای لازم با هزینه های کم ممکن گردیده است. مطالعات موردی نشان می دهد که بسیاری از کارفرمایان ارزش فوق العاده ای برای آموزش پرسنل قائل هستند. استفاده از شبیه سازها در آموزش پرسنل سدها در ژاپن نشان دهنده سرمایه گذاری کلان در این زمینه میباشد. نظارت پیوسته سد از اقدامات موثر شناسایی مشکلات در مراحل اولیه می باشد. منافع شناسایی زود هنگام مشکلات واضح است. برای مثال اگر احتمال تخریب سد پیش بینی شود، می توان از آن جلوگیری کرد و یا اقدام به تخلیه مردم نمود. نظارت پیوسته بوسیله بازدید مستقیم مهندسين با تجربه یکی از روشهای بسیار کم هزینه کاهش ریسک میباشد.

هشدار موثر جمعیت پایین دست در زمانی که تخریب سد غیر قابل اجتناب بنظر برسد، یک عامل عمده در حداقل کردن تلفات انسانی تخریب سد میباشد. برنامه ریزی شرایط اضطراری و برنامه ریزی سیستم های هشدار بنحوی که موجب افزایش زمان پیش هشدار شود می تواند هشدار موثر جمعیت پایین دست را ممکن سازد. این اقدامات با هزینه ای منطقی قابل انجام میباشند بخصوص زمانی که با روشهای دیگر شرایط اضطراری ادغام شوند. بایستی این نکته را هم در نظر داشت که برنامه ریزی شرایط اضطراری نه تنها در صورت تخریب سد و بلکه در صورت وقوع سیلابهای بزرگ منافع قابل ملاحظه ای در برخواهد داشت. با افزایش جمعیت در پایین دست سدها، اهمیت کاهش خطرپذیری مقرون به صرفه نیز افزایش می یابد. بسیار مهم است که تلفیقی از روشهای سازه ای و غیر سازه ای درنظر گرفته شوند تا بتوان مدیریت ریسک را بنحو اقتصادی به انجام رسانید.



## مطالعه موردی: رفتارسنجی نشست پی و بدنه سد علویان در دوران بهره برداری

### چکیده:

عدم قطعیت ها در مشخصات و رفتار ژئوتکنیکی سازه ها در حین طراحی اغلب روی برنامه های اجرایی اثر می گذارد، از اینرو ابزاربندی (instrumentation) و رفتارسنجی (monitoring) برای کنترل ساخت، تضمین ایمنی و کاهش هزینه های اجرایی بعنوان بخش لاینفک از فرایند طراحی سدها می باشد. رفتارسنجی در حین ساخت سد و اولین آنگیری بمنظور آنالیز سریع ایمنی آن و همچنین در زمان بهره برداری جهت ارائه تصویری واقعی از تمامی تغییرات و ارزیابی ایمنی سد بر اساس مشاهدات بلند مدت داده ها از عمده ترین اهداف ابزاربندی و رفتارنگاری سدها می باشد (Sundaraiya & Devasahayam, 1996).

در این مقاله ضمن تجزیه و تحلیل اندازه گیری های انجام گرفته در خصوص جابجائیها و تغییرشکلهای قائم بدنه و پی سد علویان با ارتفاع ۸۰ متر - در طول ۴ سال پس از ساخت - به اندرکنش گالری و پی نیز پرداخته شده است. این اندازه گیریها با استفاده از نشست سنجهای ملحق شده به انحراف سنجها (settlement meter)، گویهای نشانه و فاصله سنجهای سه محوری (triaxial joint meter) نصب شده در گالری سد و مشاهدات میکروژئودزی (microgeodesy) شبکه های واقع در روی و خارج بدنه سد صورت گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

- تجزیه و تحلیل نشستهای قائم پی و تاج سد در مقاطع مختلف بر حسب زمان برای دوران بهره برداری و پیش بینی نشست نهایی سد
- اندرکنش غیرعادی پی و گالری سد
- تجزیه و تحلیل جابجایی های نسبی بلوکهای بتنی گالری
- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از میکروژئودزی با نتایج حاصل از نشست سنجها و ارزیابی عملکرد ابزاردقیق مختلف
- ارائه یک تصویر واقعی از رفتار پی و تاج سد
- ارائه راه کارهای مناسب بمنظور استفاده بهینه از ابزارها

<sup>۱</sup> کارشناس عمران - عمران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد ژئوتکنیک ( مکانیک سنگ )

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد سازه، معاون طرح و توسعه

## ۱ - مقدمه

طی ساخت سد یا خاکریز به علت تغییرات تنش کل، فشار حفره ای و اثرات ثانویه زمان (خزش) و سایر عوامل از قبیل حرکات پی، توزیع و انتقال بار و ... تغییرشکلهای داخلی تحت تاثیر قرار می گیرند. مقدار، جهت و آهنگ حرکات در یک نقطه در داخل یا روی تاج سد در طی مراحل مختلف ساخت و بهره برداری از مخزن ممکن است، تغییر کند. بمنظور رفتارسنجی، اندازه گیری جابجایی ها در سه جهت قائم (نشست)، پایین دست - بالادست (حرکات عمود بر محور سد) و در امتداد دره (حرکات موازی با محور سد) انجام می گیرد.

(Bechtel corporation, 1960) و (Fell & MacGregor & Stapledon, 1992).

اولین و مهمترین عامل سنجش تغییرشکلهای سد، ارزیابی ایمنی آن می باشد. دومین عامل نیازی است که به درک بهتر مفروضات اساسی طراحی، پارامترهای مقاومتی و رفتاری (تنش - تغییر شکل) سدهای خاکی و سنگریزه ای احساس می گردد. این عامل اگرچه در کوتاه مدت برای خود سد حساسیت کمتری دارد، لیکن از لحاظ پیشرفت دانش مهندسی از اهمیت فوق العاده زیاد و بسزایی برخوردار است.

(Cooling, 1962) و (Fell & MacGregor & Stapledon, 1992)

و (Marsel & Ramirez de Arellano, 1963).

شکست سدهای خاکی بجز شکستهای ناشی از حوادث غیرمترقبه از قبیل زلزله، سرریز نمودن آب از روی تاج سد در اثر وقوع سیلابهای بزرگ تقریباً همیشه با هشدارهای نگران کننده ای از قبیل افزایش روند تغییر شکلهای سد، عدم پیوستگی کرنش ها، ترک خوردگی ها، نشستها، افزایش فشار حفره ای همراه بوده است. از اینرو جهت مشاهده روند تغییر شکلهای و ارزیابی علل احتمالی پیشامد های ناشی از این تغییرات، در نظر گرفتن مراحل زیر در ساخت و بهره برداری از سد ها ضرورت دارد (Fell & MacGregor & Stapledon, 1992) و (Gamboa & Benassini, 1967) و (Shannon & Wilson & Meese, 1962) و (Sundaraiya, 1996).

۱ - ابزاربندی سدها بمنظور اندازه گیری تغییر شکلهای داخلی در طی ساخت و دوران بهره برداری از آن

۲ - اندازه گیری، ثبت و بازدیدهای دوره ای از سد که در آن دوره تناوب بستگی به فاکتورهای زیادی از قبیل سرعت ساخت، نرخ روند حرکات و نحوی آنگیری خواهد داشت.

۳ - خلاصه نمودن و ارزیابی سریع و بدون معطلی داده ها توسط مهندسانی که تنها آشنا با یک پروژه خاص نبوده و مرتبط با نندین پروژه مشابه می باشند.

۴ - مطالعه هر ثبت غیرمترقبه بصورت بحرانی و تشخیص علل بروز آن

در این مقاله سعی شده تصویری واقعی از مقادیر نشستها و حرکات و جابجاییهای قائم پی و تاج سد با استفاده از سیستمهای ابزاردقیق مختلف ارائه گردد.

## ۲ - مشخصات فنی سد علویان

عملیات اجرایی سد علویان بمنظور تأمین آب مشروب و کشاورزی و تولید برق بر روی رودخانه صوفی نای در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شهر تبریز توسط سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی از سال ۱۳۶۹ شروع و در اواخر سال ۱۳۷۴ به بهره برداری رسیده است. این سد از نوع خاکی با هسته مرکزی رسی با طول تاج ۹۳۵ متر، عرض پاشنه ۳۴۰ متر، حداکثر ارتفاع از پی ۸۰ متر، حجم مخزن ۶۰ میلیون مترمکعب، سرریزی با حداکثر ظرفیت تخلیه ۱۱۸۰ مترمکعب در ثانیه بر روی بستر سنگی احداث شده است. هسته رسی پس از برداشت حداکثر ۳۰ متر از رسوبات آبرفتی نفوذپذیر و بخش هوازده سنگ بستر، بر روی سنگ توف نیمه هوازده قرار گرفته است (سازمان آب منطقه ای آذربایجان، ۱۳۷۴).

سنگ پی سد علویان را سه نوع توف با مشخصات فیزیکی - مکانیکی متفاوت مطابق جدول ۱ تشکیل داده است. حداقل ضخامت سنگ کف در امتداد محور طولی در فواصل ۴۰۰ الی ۶۰۰ متری از جناح راست حدود ۲۰ متر می باشد که بر روی رسوبات متناوب ماسه ای رسی قرار گرفته است. در محل سد سه گسل اصلی و تعدادی گسل فرعی با امتداد کم و بیش شمالی - جنوبی ( عمود بر محور طولی سد ) وجود دارند که سه بلوک متمایز را بوجود آورده اند (سازمان آب منطقه ای آذربایجان، ۱۳۷۴).

بمنظور بهبود کیفیت سنگ بستر در پی و جناحین سد، عملیات تزریق تحکیمی و پرده آب بند از طریق حفاری در یک ردیف اصلی تا عمق ۵۰ متر و دو ردیف فرعی با عمق کمتر صورت گرفته است. فشار تزریق از ۱/۵ تا ۱۵ بار متغیر بوده است. هسته مرکزی این سد از مصالح نفوذناپذیر رسی با مشخصات فیزیکی - مکانیکی آورده شده در جدول ۲ اجرا شده است (سازمان آب منطقه ای آذربایجان، ۱۳۷۴).

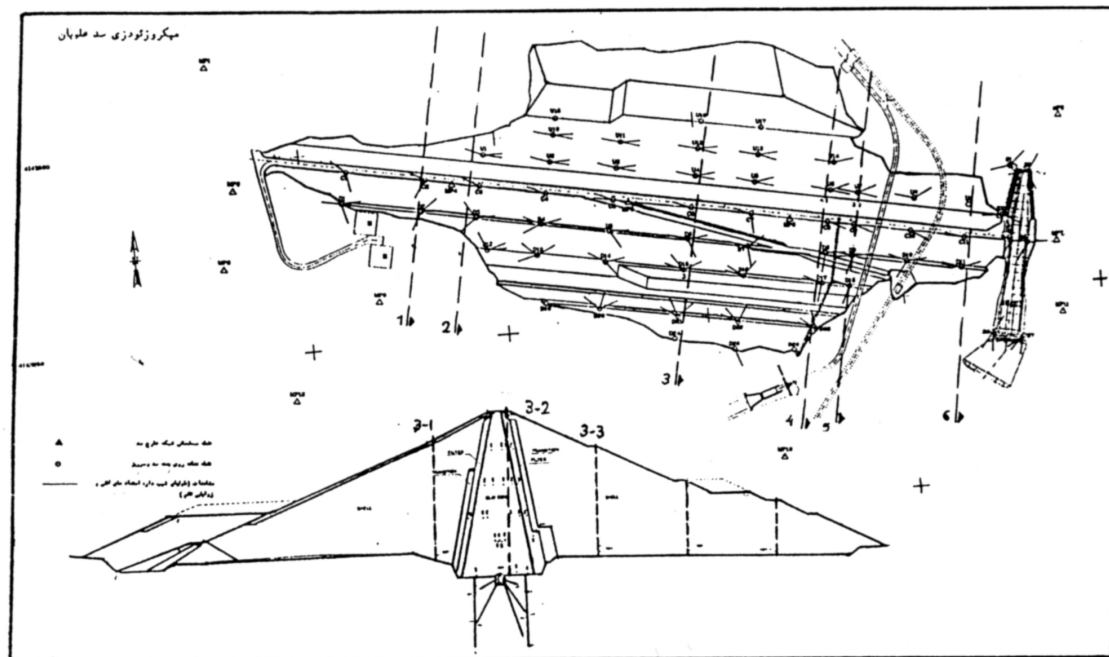
جهت اندازه گیری حرکات و تغییر شکلهای داخلی و سطحی بدنه و پی از یک سیستم کامل ابزار مطابق شکل ۱ استفاده شده است.

فاصله از جناح راست (متر)	۹۲۰ - ۹۳۵	۶۷۰ - ۹۲۰	۱۵۰ - ۶۷۰	۰ - ۱۵۰
طبقه بندی	II, III	I, II	II, III	III
کلاس	I	II	III	
درجه هوازدگی	مختصر	متوسط	زیاد	
RQD (%)	۹۰ - ۱۰۰	۷۵ - ۹۰	۵۰ - ۷۵	
وزن واحد حجم ( $\text{gr/cm}^3$ )	۱/۸ - ۲/۱	۱/۸ - ۲/۱	۱/۸ - ۲/۱	
تخلخل (%)	۱۶ - ۳۴	۲۱ - ۳۵	۲۶ - ۴۶	
ضریب نفوذ پذیری (cm/Sec)	$۱۰^{-۳}$ - $۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۳}$ - $۱۰^{-۴}$	$۱۰^{-۳}$ - $۱۰^{-۴}$	
مقاومت فشاری اشباع ( $\text{kg/cm}^2$ )	۵۱ - ۱۷۷	۳۰ - ۵۴	۱۴ - ۲۹	
مدول تغییر شکل پذیری ( $\text{kg/cm}^2$ )	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	
مدول الاستیسیته ( $\text{kg/cm}^2$ )	۱۲۰۰۰	۱۰۰۰۰	۸۰۰۰	
نسبندگی موثر ( $\text{kg/cm}^2$ )	۶	۵	۳	
زاویه اصطکاک داخلی موثر ( $^{\circ}$ )	۲۲	۲۲	۲۲	

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی - مکانیکی سنگ پی

طبقه بندی متحد مصالح ویزدانه	رطوبت اپتیمم (%)	دانسیته خشک ( $\text{gr/cm}^3$ )	نسبندگی موثر ( $\text{Kg/cm}^2$ )	زاویه اصطکاک داخلی موثر	ضریب قابلیت فشرده گی حجمی ( $\text{Kg/cm}^2$ )	نفوذپذیری (cm/Sec)
CL - CH	۱۶ - ۲۰	۱/۶ - ۱/۸	۰/۵	۱۵ - ۲۰	۱۰۰ - ۳۰۰	$۰/۵ - ۴ \times ۱۰^{-۸}$

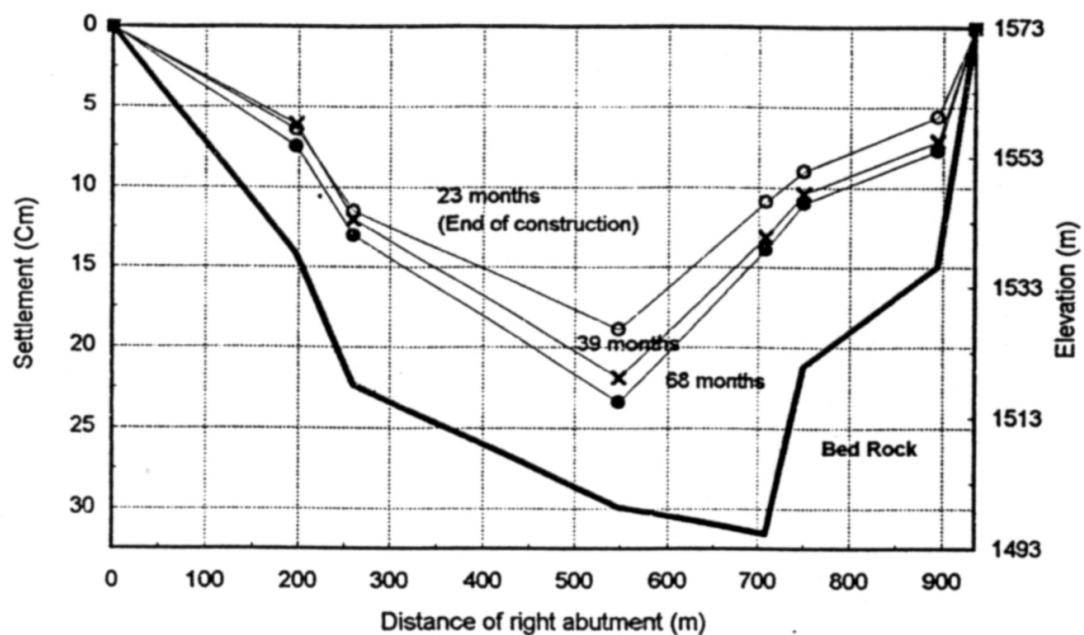
جدول ۲ - مشخصات فیزیکی - مکانیکی مصالح هسته رسی



شکل ۱ - پلان موقعیت ابزاربندی و مقطع عرضی ۳ و ۴

### ۳- نشست پی

از زمان شروع عملیات خاکریزی (آذر ۷۲) برای اندازه گیری میزان حرکات بدنه و پی سد، تعداد ۱۶ عدد نشست سنج مغناطیسی در شش مقطع عرضی مطابق شکل ۱ نصب و قرائت گردیده اند. این ابزارها ئند منظوره بوده بطوریکه علاوه بر اندازه گیری نشست پی و بدنه، اندازه گیری انحرافات بدنه سد در جهات طولی، عرضی و اندازه گیری سطح پیزومتریک میسر است (Soil Instruments Limited, 1987). اندازه گیری نشست بدنه و پی از طریق مکان یابی زمانی دیسکهای مغناطیسی که در پی و بدنه بفواصل متوسط ۳ متری از هم نصب شده اند، صورت می گیرد. شکل ۲ نشست پی در امتداد محور طولی سد (بفاصله ۵ متر از محور سد) را در زمانهای مختلف نمایش می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود، نشست پی سنگی با گذشت حدود ۴ سال از زمان اتمام ساخت با یک روند کاهنده ادامه دارد. این امر می تواند ناشی از باز توزیع بار و یا تحکیم لایه های رسی واقع در زیر سنگ کف و یا رفتار خزشی سنگ کف باشد.



شکل ۲ - نشست طولی پی در انتهای زمان ساخت و پس از آن

بیشترین نشست اندازه گیری شده در فاصله ۵۵۰ متری از جناح راست در مقطع ۳ می باشد. با توجه به اینکه این مقطع از لحاظ ارتفاع خاکریز مشابه مقطع ۴ می باشد، علت این امر را می توان وضعیت ژئومکانیکی ضعیفتر مقطع ۳ ( ضخامت کمتر به مقدار ۱۰ متر نسبت به مقطع ۴ و شدت هوازدگی زیاد (کلاس III) ) نسبت به مقطع ۴ دانست. شکل ۱ مقطع عرضی ۳ و موقعیت ابزاربندی آن را نمایش می دهد.

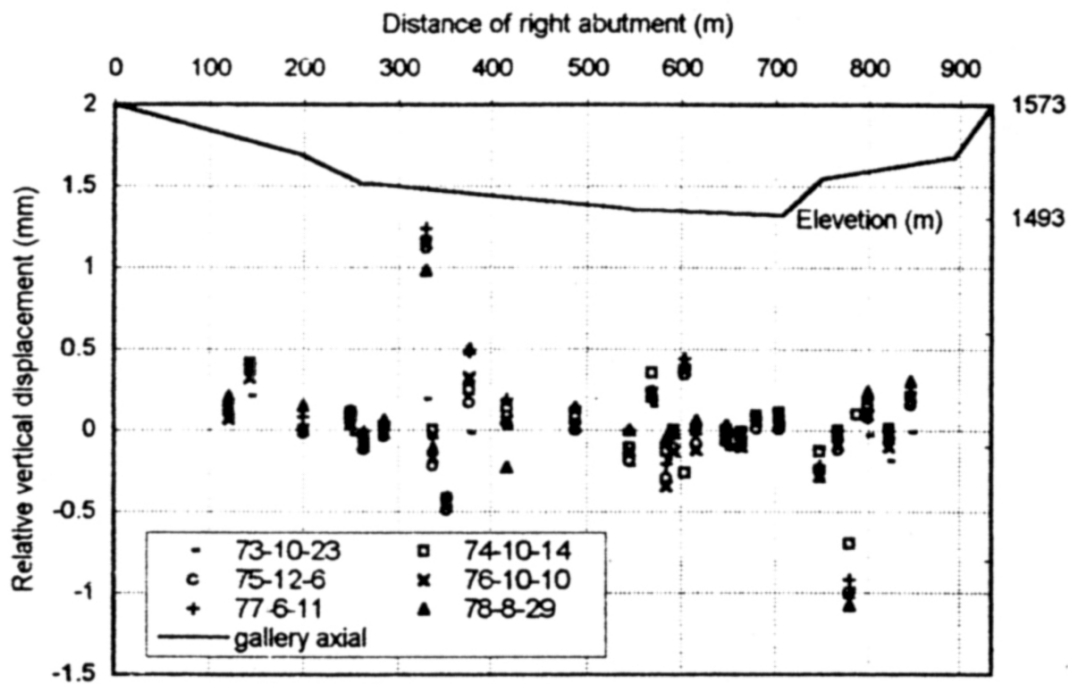
کنترل بخشی از حرکات و رفتار پی و بدنه سد به کمک مختصات یابی نقاط نشانه توسط نقشه برداری دقیق نیز انجام گرفته است. تعدادی از این نقاط فقط حرکات قائم و بقیه حرکات سه بعدی موقعیت های نصب شده را نشان می دهند. ۱۲۵ عدد گوی نشانه نصب شده به فواصل ۸ متر از هم در سقف بلوکهای یتی در گالری از جمله ابزاربست که بمنظور سنجش حرکات قائم پی و عبارت بهتر حرکات قائم گالری مورد استفاده قرار گرفته اند که قرائت مبنای آنها در آذرماه ۷۲ و با دقت ۱ میلیمتر صورت گرفته است. مقادیر حرکات قائم اندازه گیری شده برای زمانهای مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به اندازه گیریهای انجام شده توسط تراز یابی گویهای نشانه داخل گالری و نشست سنجهای مغناطیسی به نظر می رسد، مقدار نشست گالری غیرعادی باشد، ثرا که میزان نشست پی اندازه گیری شده توسط نشست سنجهای مغناطیسی حدود ۶ سانتیمتر بیشتر از نشست اندازه گیری شده توسط گویها می باشد. در حالت عادی با توجه به اینکه گالری سد بر روی بستر سنگی پی قرار دارد، بایستی مقادیر نشست گالری با مقادیر نشست پی همخوانی داشته باشد که در این مورد چنین نمی باشد. این امر می تواند ناشی از نحوه توزیع بار و همئین ناکافی بودن فاصله بلوکها از هم باشد. در این حالت با وقوع اندکی نشست، بلوکها به هم تکیه داده و همانند یک جسم یکپارته و واحد عمل نموده و رفتار آن از نشست پی تبعیت نخواهد کرد. بدنبال وقوع این پدیده ممکن است فضای خالی بین سنگ پی و گالری تزریق رفته رفته زیادتیر شده و در اثر افزایش پتانسیل فرار آب و شسته شدن سنگ کف و یا هسته رسی از این نواحی، بمرور زمان برای سد خطر آفرین باشد. وجود درز و ترک در دیواره برخی از بلوکهای گالری نیز می تواند دلیل دیگری بر ناکافی بودن فاصله بین بلوکها باشد، ثرا که در این حالت نیروی وارده از طریق درزهای اجرایی مستهلک نشده و اثرات آن بصورت درز و ترک بر روی بدنه بلوکها ظاهر می گردد. علاوه بر موارد فوق بلوکهای گالری تزریق تحت عوامل مختلفی از قبیل اثرات ناشی از عملیات تراکم حین ساخت، فشاربدنه،

نشست پی، فشار هیدرواستاتیک آب، فشار آبهای نفوذی از کف و دیواره و سقف آن، اثرات ناشی از زمین لرزه و ... می تواند حرکت نماید. اندازه گیری این حرکات از لحاظ ایمنی سد، همانطوریکه قبلاً ذکر شد، بسیار حافز اهمیت است.



شکل ۳- نشست گالری یک و نیم سال پس از ساخت

فاصله سنجهای سه محوری از جمله دیگر ابزار دقیق می باشند که بمنظور اندازه گیری میزان جابجایی و بازشدگی نسبی ترکهای ایجاد شده در بدنه بلوکهای بتنی گالری تزریق (۲۵ عدد) و همچنین اندازه گیری میزان حرکات سه بعدی نسبی بلوکهای بتنی در محل اتصال بین بلوکها (۴ عدد) نصب گردیده اند. شکل ۴ مقادیر نسبی حرکات قائم بلوکهای گالری را نشان می دهد. بیش از ۹۵ درصد جابجایی قائم نسبی در طول مدت ۶ سال گذشته (دوران ساخت و بهره برداری) کمتر از ۰/۵ میلیمتر می باشد که در حد نرمال می باشد. حداکثر جابجایی نسبی در ترک ایجاد شده در فاصله ۳۳۰ متری در امتداد طولی گالری ۳/۲۵ میلیمتر و در امتداد عرضی ۰/۵۵ میلیمتر و در امتداد قائم ۰/۹۸ میلیمتر می باشد. همچنین حداکثر جابجایی نسبی در محل اتصال دو بلوک واقع در فاصله ۸/۷۸۰ متری در امتداد طولی ۱/۲۵ میلیمتر و در امتداد عرضی ۰/۱ میلیمتر و در امتداد قائم ۱/۱ میلیمتر می باشد.



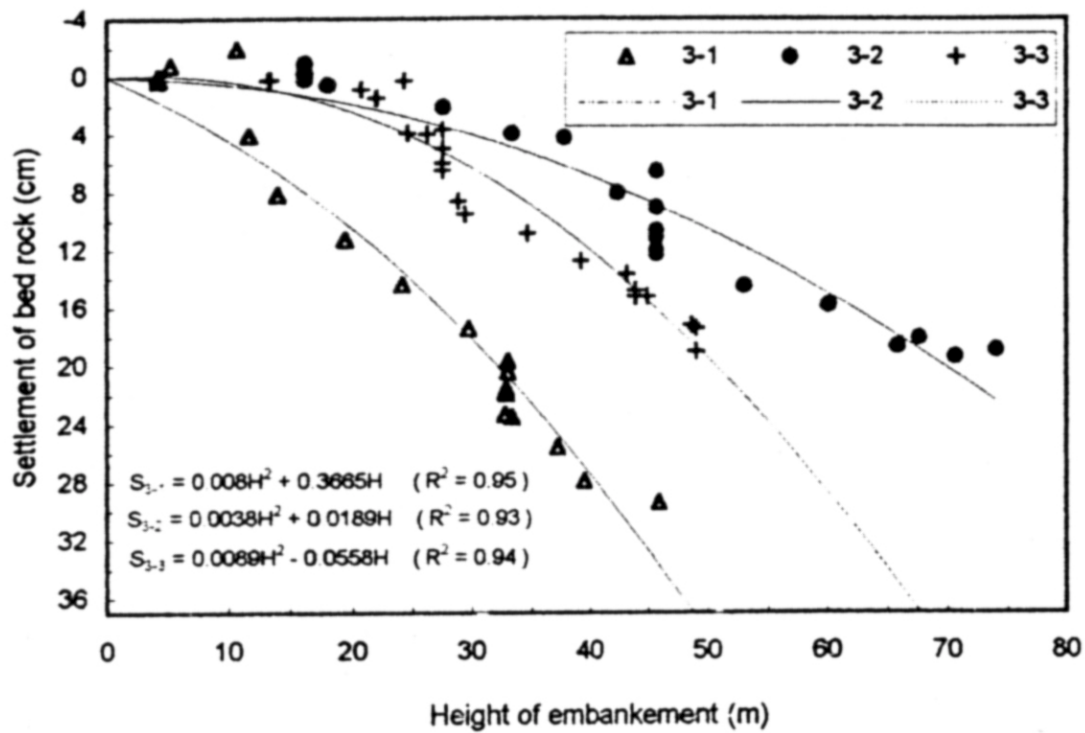
شکل ۴- مقادیر نسبی حرکات قائم بلوکهای گالری سد

شکلهای ۵ و ۶ نشست عرضی پی را در مقاطع ۳ و ۴ در مقابل افزایش ارتفاع خاکریز نمایش می دهند. نشست سنجهای با اندیس ۱ در ۳۰ متری بالادست، با اندیس ۲ در حوالی محور سد (۵ متری پایین دست محور) و با اندیس ۳ در ۴۵ متری پایین دست محور در پی نصب گردیده اند. نتایج حاصل از برازش منحنی بر داده های اندازه گیری شده بیانگر وجود یک همبستگی بسیار خوب ( $R > 0.94$ ) بین مقدار نشست اندازه گیری شده با توان دوم ارتفاع خاکریز می باشد. همانطوریکه از شکلهای ۵ و ۶ مشاهده می گردد، برای یک ارتفاع خاکریز معین می توان رابطی منطقی (۱) را نوشت.

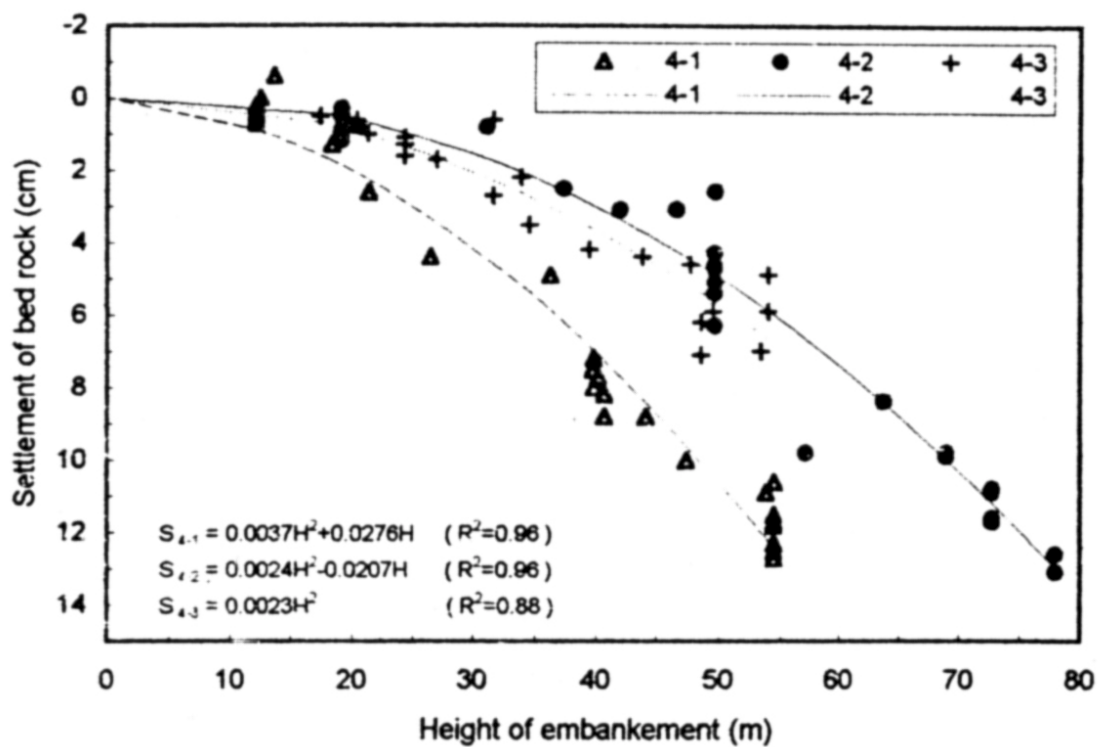
$$S_{3-1} > S_{3-3} > S_{3-2} \geq S_{4-1} > S_{4-3} \geq S_{4-2} \quad (1)$$

از رابطه فوق می توان بیان نمود که: مقطع ۳ از لحاظ نشست حالت بحرانی تری را نسبت به مقطع ۴ دارد و این امر را می توان به وضعیت ژئومکانیکی ضعیفتر (ضخامت کم، شدت هوازدگی و خرد شدگی) مقطع ۳ مربوط دانست که در آن نشستهای اندازه گیری شده در بالادست بمراتب بیشتر از نشستهای پایین دست سد بوده و اختلاف فاحشی بین مقادیر نشست  $S_{3-1}$  و  $S_{3-3}$  وجود دارد که این امر می تواند ناشی از نصب نشست سنج  $S_{3-1}$  در رسوبات آبرفتی روی بستر سنگی و همئین نحوی توزیع بار باشد.

انجام عملیات تزیق در پی سنگی در مقطع ۳ باعث کاهش حدود ۵۵٪ در نشست پی سنگی زیر هسته رسی گردیده ولی در مقطع ۴ فقط باعث کاهش حدود ۵٪ نشست پی سنگی زیر هسته رسی شده است.



شکل ۵- نشست عرضی پی در مقطع ۳ در مقابل افزایش ارتفاع خاکریز



شکل ۶- نشست عرضی پی در مقطع ۴ در مقابل افزایش ارتفاع خاکریز



## ۴- نشست تاج

نشست طولی تاج سد در فواصل زمانی مختلف (پس از ساخت) توسط نشست سنجهای مغناطیسی اندازه گیری شده است (شکل ۶) (سازمان آب منطقه ای آذربایجان، ۷۸-۱۳۷۴).

علی رغم یکسان بودن ارتفاع خاکریز در مقاطع ۳ و ۴ بیشترین مقدار نشست تاج پس از گذشت حدود ۴ سال از عمر سد در مقطع ۳ و به اندازی ۲۷ سانتیمتر می باشد که حدود ۵ سانتیمتر بیشتر از مقطع ۴ می باشد. علت این امر را می توان ناشی از نحوه توزیع بار و نشست نامساوی پی سنگی در این مقاطع دانست. همانطوریکه از شکل ۶ مشاهده می شود، پس از گذشت ۴ سال از عمر سد، بیشترین مقدار نشست بدنه در مقطع ۳ به اندازی ۲۲ سانتیمتر می باشد.

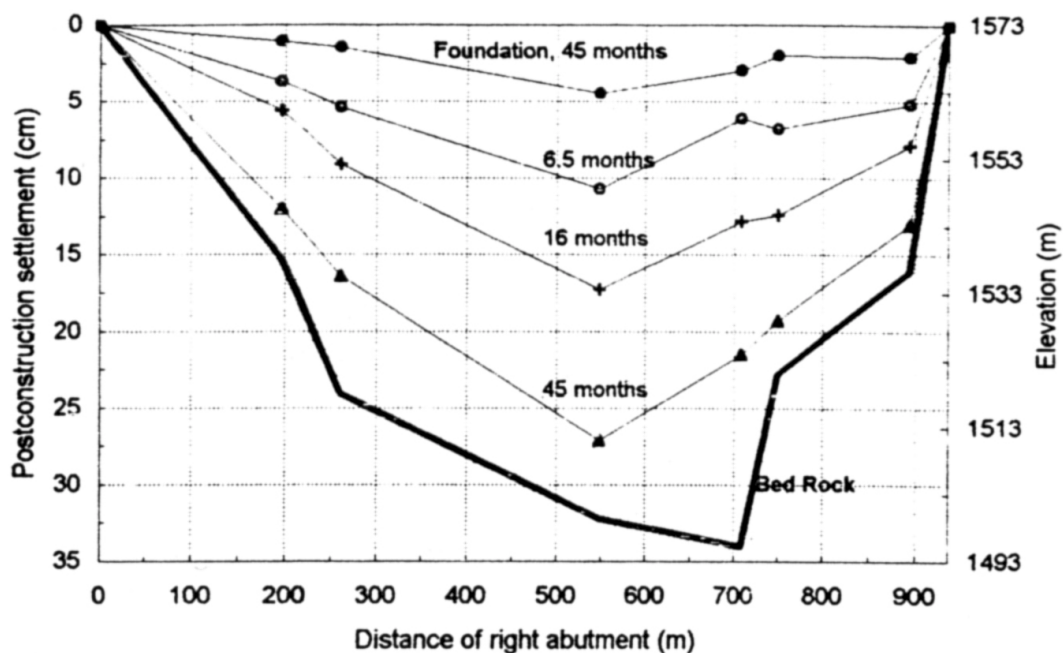
نشست تاج سد در فواصل زمانی مختلف (پس از ساخت) با استفاده از مشاهدات میکروژئودزی در شکل ۷ نمایش داده شده است (سازمان آب منطقه ای آذربایجان، ۷۸-۱۳۷۴).

بمنظور مقایسه نتایج حاصله از دو روش فوق، روند تغییرات زمانی نشست در نقطه متناظر با موقعیت نشست سنج ۲-۳ در فاصله ۵۴۰ متری (در شکل ۸ نشان داده شده است. با انطباق منحنی حاصل از میکروژئودزی بر روی منحنی حاصل از نشست سنج ۲-۳ در یک زمان مشخص، مقدار نشست اندازه گیری شده از عملیات میکروژئودزی بیش از مقدار حاصل از نشست سنج می شود. اگرچه با توجه به عدم کافی بودن تعداد اندازه گیری ها بطور قطع نمی توان در مورد علت این امر قضاوت نمود، لیکن بخشی از این انحراف را می توان ناشی از موقعیت ارتفاعی متفاوت صفحه مغناطیسی و نقطه نشانه به اندازی ۳/۸ متر از هم دانست.

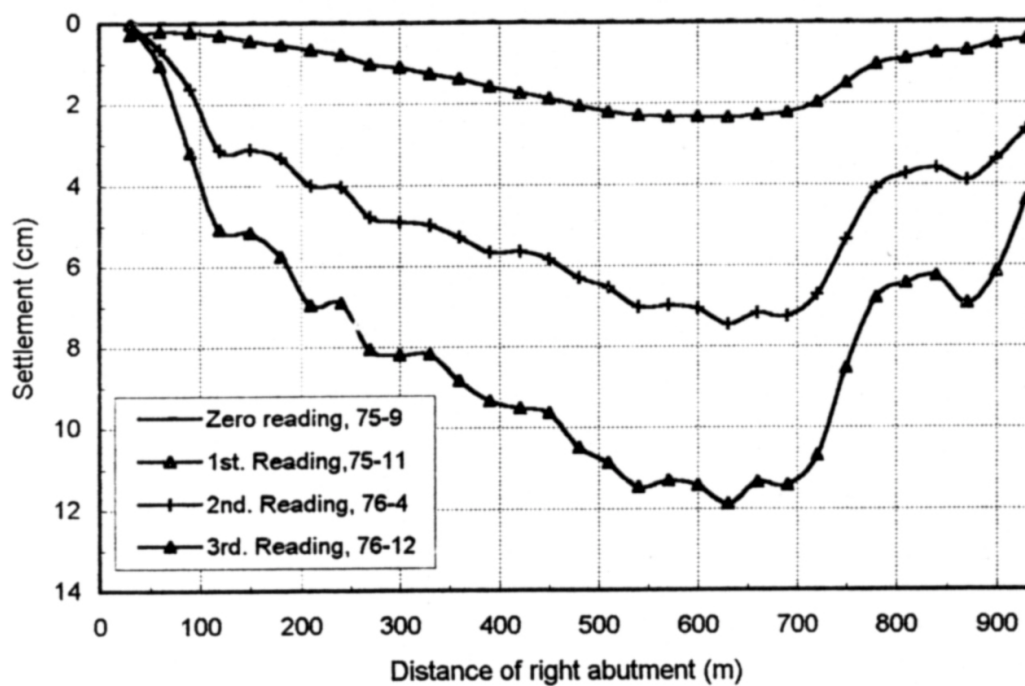
همنین با توجه به شکل ۸ رابطی بین حداکثر نشست تاج و زمان را می توان بصورت رابطه (۲) نوشت:

$$S_{Crest} = 14.81 \cdot \log T \quad R = 0.97 \quad (2)$$

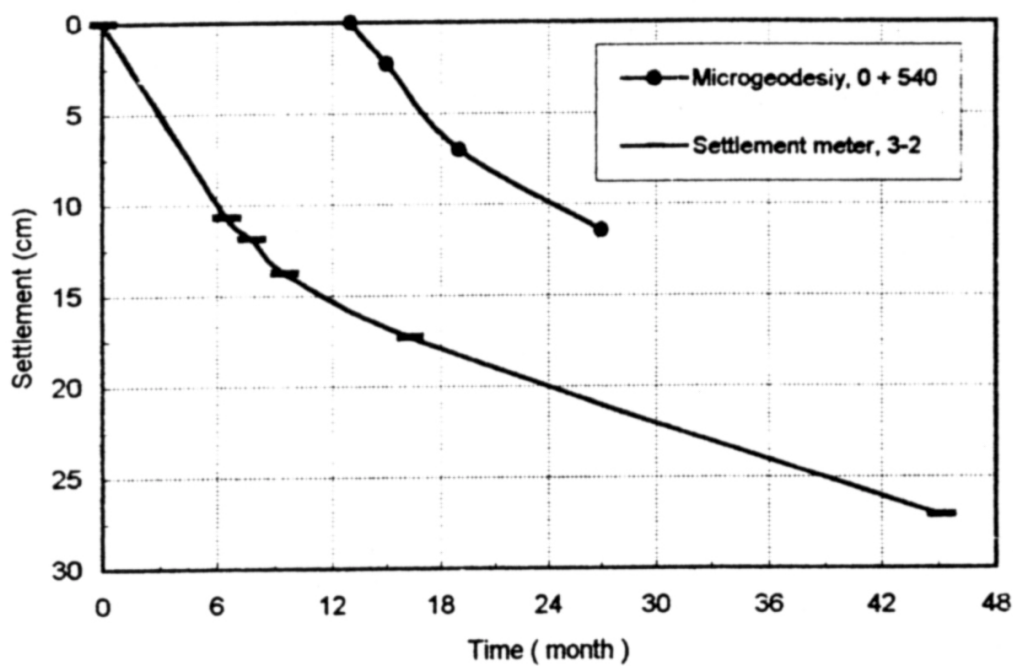
که در آن T عمر سد بر حسب ماه پس از زمان ساخت و  $S_{Crest}$  مقدار حداکثر نشست سد بر حسب سانتیمتر می باشد.



شکل ۷- نشست طولی تاج و پی پس از زمان ساخت



شکل ۸ - نشست تاج سد اندازه گیری شده از طریق مشاهدات میکروژئودزی



شکل ۹ - روند زمانی نشست حداکثر تاج

## ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱- روند زمانی نشست پی و تاج پس از ساخت، کاهنده می باشد.
- ۲- حداکثر نشست پی سنگی در محور سد برای زمان ساخت در مقطع ۳ اتفاق افتاده و در حدود ۱۸ سانتیمتر می باشد که پس از گذشت ۴ سال مقدار آن ۲۰ درصد (۵ سانتیمتر) افزایش یافته است.
- ۳- حداکثر نشست تاج پس از گذشت ۴ سال در مقطع ۳ اتفاق افتاده که در حدود ۲۷ سانتیمتر می باشد.
- ۴- با توجه به نتایج حاصل از ابزار دقیق، مقطع ۳ از لحاظ نشست بحرانی ترین مقطع می باشد.
- ۵- انجام عملیات تزریق با توجه به وضعیت ژئومکانیکی سنگ کف، باعث کاهش نشست پی بین ۵ الی ۵۵ درصد شده است.
- ۶- نشست پی در حدود ۶ سانتیمتر بیشتر از نشست گالری می باشد. این امر ممکن است ناشی از نحوه توزیع بار و همئین ناکافی بودن فاصله درزهای اجرایی بین بلوکهای گالری ( ترکهای ایجاد شده در گالری نیز می تواند موید این پدیده باشد. ) و یا اشتباه در قرائتها باشد، لذا انجام بررسیهای بیشتر جهت شناسایی رفتار واقعی گالری ضروری می باشد.
- ۷- نشست پی در طول زمان ساخت با ضریب همبستگی خوبی ( $R > 0.97$ ) تابعی از مجذور ارتفاع خاکریز می باشد.
- ۸- نشست تاج پس از زمان ساخت با ضریب همبستگی خوبی ( $R > 0.98$ ) تابعی لگاریتمی از زمان می باشد.
- ۹- بمنظور کنترل عملکرد ابزار دقیق مختلف، شروع و انجام قرائتها بطور همزمان ضروری بوده و کلیه اندازه گیریهای ادواری بایستی از طریق یک گروه فنی و تجهیزات ثابت صورت گیرد.
- ۱۰- اگرته محاسبات نظری با توجه به اینکه قبل از احداث سد انجام می پذیرند از ارزش بخصوصی برخوردارند، لیکن مزیت اندازه گیری های تجربی از این جهت است که با واقعیت مطابقت داشته و با تلفیق این دو روش است که پیشرفتهای تکنولوژیکی سدسازی حاصل می گردد.

## ۶- تشکر و قدردانی

از مدیرعامل محترم سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی و اردبیل جناب آقای مهندس میدانی که با دید علمی و تحقیقاتی خود شرایط انجام این مطالعه را فراهم آوردند، صمیمانه سپاسگزاری می شود. مطمئناً انجام این تحقیق بدون قرائت ابزار دقیق توسط جناب آقای استادی ممکن نبود که از ایشان نیز قدردانی می گردد.

## ۷- مراجع

سازمان آب منطقه ای آذربایجان، "گزارشات فنی طرح بند منظوره صوفی ثای، مطالعات مرحله دوم سد علویان"، (۱۳۷۴).

سازمان آب منطقه ای آذربایجان، "گزارشات ماهانه داده های ابزار دقیق سد علویان"، (۷۸ - ۱۳۷۴).

سازمان آب منطقه ای آذربایجان، "گزارشات فنی مشاهدات شبکه میکروژئودزی سد علویان"، (۷۸ - ۱۳۷۴).

Bechtel corporation, " Pore Pressure and Embankment Movement Measurements During Construction", Supplement F, Mammoth Pool Design Memorandum No.21, Bechtel Corporation, (1960).

Cooling, L.F., " Field Measurements in Soil Mechanics", Geotechnique, Vol. XII, No. 2, London, (1962).

Fell, R. & MacGregor, P. & Stapledon, D., " Geotechnical Engineering of Embankment", Balkema, (1992).

Gamboa, J. & Benassini, A., " Behaviour of Netzahualcoyotl Dam During Construction", J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 93, No. SM4, (1967).

ICOLD, " General Considerations Applicable To Instrumentation for Earth and Rockfill Dams", Bultten 21.

Marsel, R.J. & Ramirez de Arellano, L., " Field Measurements in Rockfill dams", Proc. 2nd PanAm. Conf. Soil Mech. Found. Eng. , Vol.11, Brazil, (1963).

Shannon, W.L. & Wilson, S.D. & Meese R.H., " Field Problems: Field Measurements, Foundation Engineering", McGraw-Hill, New York, (1962).

Soil Instruments Limited, " Instrumentation for Soils and Rocks", England, (1987).

Sundaraiya, E. & Devasahayam, R., " Research needs in dam safety", 2nd International Conference on Dam Safety Evaluation, India, (1996).

Sundaraiya, E., " Instrumentation of Existing Dams", 2nd International Conference on Dam Safety Evaluation, India, (1996).