



انجمن تخصصی مهندسی عمران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و ششم، شماره ششم، ۱۳۹۸  
۷۹-۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14530.2969

## تحلیل عددی اثر قوس‌زدگی سد ایوشان در اولین دوره آبیگری و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق

\* مهدی کماسی<sup>۱</sup>، احمدرضا مظاهری<sup>۱</sup> و بهرنگ بیرانوند<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)،

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی (ره)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

### چکیده

**سابقه و هدف:** در سدهای خاکی، با توجه به ویژگی‌های متفاوت مصالح هسته و پوسته، نشست‌های ناهمگن بین بخش‌های مختلف سد رخ می‌دهد. این عمل منجر به پدیده قوس‌زدگی می‌شود که سبب ایجاد برخی ترک‌های عرضی در بخش نفوذناپذیر سد به‌ویژه در نزدیکی اتصال سد به دیوارهای جانبی شده که این ترک‌ها در اولین دوره آبیگری و با اعمال ناگهانی فشار آب مخزن به هسته، می‌توانند گسترش یافته و در نهایت و در حالات بحرانی‌تر منجر به شکست هیدرولیکی و بروز پدیده آبشستگی شود. در این پژوهش نتایج ابزار دقیق تنش‌های اصلی و ضریب قوس‌زدگی هسته سد خاکی ایوشان در اولین دوره آبیگری، با نتایج نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis بررسی و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین افزایش قوس‌زدگی پس از آبیگری در ترازهای بالایی اعمال شده است ولی بیش‌ترین درصد قوس‌زدگی از ابتدا ساخت تا پایان مرحله آبیگری برابر ۴۶ درصد و در  $\frac{1}{3}$  ارتفاع هسته از کف رخ داده است. هم‌چنین با توجه به نسبت قوس‌زدگی هسته که در محدوده ۰/۶۸-۰/۵۵ قرار دارد، سد از لحاظ قوس‌زدگی در اولین دوره آبیگری در حد متعارفی می‌باشد و از نظر شکست هیدرولیکی مشکلی نخواهد داشت.

**مواد و روش‌ها:** سد مخزنی ایوشان در فاصله ۱/۵ کیلومتری بالادست روستای ایوشان و حدود ۵۷ کیلومتری شهر خرم‌آباد، بر روی رودخانه هرود واقع شده است. سد از نوع خاکی- سنگریزه‌ای با هسته قائم رسی می‌باشد که ارتفاع آن از بستر ۶۲ متر، تراز تاج سد ۱۸۶۸ متر و رقوم نرمال بهره‌برداری از سد ۱۸۶۴ متر از سطح دریا می‌باشد. تحلیل تنش- کرنش سد ایوشان بر اساس مدل‌های رفتاری موهركولمب در شرایط کرنش صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis انجام شده است. برای تحلیل نشست تحکیمی و تنش- کرنش، مدل‌سازی در هشت لایه انجام شده است.

**یافته‌ها:** با بررسی و مقایسه ضریب قوس‌زدگی به‌دست آمده از سلول‌های فشار الکتریکی نصب شده در سد ایوشان و هم‌چنین نتایج تحلیل عددی مشخص گردید که ضریب قوس‌زدگی در ترازهای مختلف هسته سد در محدوده متعارفی قرار دارد و خطری از لحاظ قوس‌زدگی متوجه سد نمی‌باشد. با توجه به نمودارهای حاصل از نتایج داده‌های

\* مسئول مکاتبه: [komasi@abru.ac.ir](mailto:komasi@abru.ac.ir)

مشاهداتی مشخص شد که بیش‌ترین درصد قوس‌زدگی در نواحی نزدیک فیلتر اتفاق افتاده است. هم‌چنین مقایسه نتایج ابزار دقیق با نتایج تحلیل عددی تطابق حدود ۹۰ درصد را نشان می‌دهد.

**نتیجه‌گیری:** با مقایسه نتایج مقادیر تنش کل اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده با نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis مشخص شد که مقادیر تنش کل به‌دست آمده از تحلیل عددی در فشارسنج‌هایی که در یک تراز نصب شده‌اند، تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارند و عملکرد نرم‌افزارها مناسب بوده است. هم‌چنین اختلاف موجود در مقادیر فشار کل به‌دست آمده از ابزار دقیق و تحلیل عددی می‌تواند ناشی از اختلاف مقادیر وزن مخصوص مصالح در طراحی و واقعیت باشد و یا ناشی از بروز خطا و عملکرد نامناسب ابزار مربوط شود.

**واژه‌های کلیدی:** ابزار دقیق، تنش کل، سد خاکی ایوشان، قوس‌زدگی

#### مقدمه

امروزه سدهای بزرگ اعم از خاکی و بتنی از مهم‌ترین سازه‌های آبی به‌شمار می‌روند که در تأمین آب مورد نیاز جوامع انسانی نقش اساسی دارند. طبیعت متفاوت و گوناگونی سازندهای طبیعی در محل ساخت سدهای خاکی از یک‌سو و رفتار پیچیده مصالح خاکی از سوی دیگر، ارزیابی کمی و کیفی متغیرهای رفتاری خاک را ضروری می‌دارد. در واقع ارزیابی غلط این‌گونه متغیرها اغلب از علل مهم به مخاطره افتادن پایداری سدهای خاکی بوده است. آبگیری سدها باعث اشباع خاک‌ریزها و تکیه‌گاه‌ها و به تبع آن کاهش ضریب اطمینان پایداری خواهد شد؛ بنابراین برای این‌که یک سد خاکی شرایط جدید را به راحتی و بدون بروز مشکل تحمل نماید، سرعت آبگیری باید در محدوده مجاز باشد. ارزیابی و تأثیر آبگیری و بررسی ضریب اطمینان در مقابل شکست هیدرولیکی هسته و ارزیابی میزان شستشوی ذرات ریزدانه هسته، یکی از موارد عمده رفتارنگاری بدنه سد در زمان اولین آبگیری می‌باشد. به‌طورکلی پس از خرابی سد تتون<sup>۱</sup> در دهه هفتاد، که سبب خسارات فراوان شد، رفتارنگاری و ابزاربندی سدهای خاکی

به‌صورت وسیع گسترش پیدا کرد (۲). نصب ابزار دقیق و رفتارنگاری سدها در دوران ساخت و دوران بهره‌برداری اولیه، کمک شایانی به ارزیابی این متغیرها می‌کند. اگر پیش‌بینی رفتار سد بتواند بخشی از وقایع محتمل را پیش از رویداد آن آشکار کند، می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از شکست سد و تبعات آن داشته باشد. با توجه به اهمیت موضوع، لزوم مطالعه جامع‌تر برای بررسی و پیش‌بینی رفتار سدهای خاکی احساس می‌شود. در حال حاضر، رفتارنگاری در سدهای خاکی با رفتار بسیار پیچیده، بخشی از برنامه جامع کنترل پایداری است. به‌عبارتی، با رفتارنگاری توسط ابزار دقیق می‌توان هر گونه مشکل احتمالی، که پایداری سد را تهدید کند، تشخیص داد (۸). یکی از این مشکلات وقوع پدیده‌ای بنام قوس‌زدگی در هسته سدهای خاکی است. قسمت‌های مختلف سد به‌علت خصوصیات متفاوت، نشست‌های مختلفی می‌کنند که باعث انتقال تنش از توده‌ای با نشست بیش‌تر به توده مقاوم کناری خود با نشست کم‌تر، از طریق چسبندگی و مقاومت برشی می‌شود. به‌عبارتی توده نرم‌تر به توده سخت‌تر مجاور خود تکیه می‌کند. در مورد سد خاکی متشکل از هسته رسی نرم و پوسته دانه‌ای سخت، تنش از هسته به پوسته منتقل

1- Teton Dam(United States)

می‌شود، در این حالت میزان تنش کل هسته کاهش می‌یابد و با اولین آبگیری و وارد شدن فشار آب در هسته این امکان می‌رود در ترازوی از توده رسی تنش مؤثر که کنترل‌کننده پایداری است حتی کم‌تر از صفر گردد. در این حالت ذرات رس به صورت معلق در می‌آیند و آب‌شستگی به وقوع می‌پیوندد، که در اصطلاح به آن ترک هیدرولیکی می‌گویند. از این‌رو کنترل تنش‌های نرمال در حین ساخت سدهای خاکی از اهمیت بالایی برخوردار است که این امر با نصب ابزارهای سلول فشارسنج ( $EPC^1$ ) در نقاط مختلف سد به‌ویژه هسته رسی، صورت می‌گیرد. وجود و اهمیت قوس‌زدگی و یا انتقال تنش در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای برای اولین بار توسط لافکوئیست در سال ۱۹۵۱ گزارش شد (۵). ایشان با اندازه‌گیری‌های فشار، متوجه کاهش فراوان فشار جانبی و قائم هسته نازک سدهای سنگریزه‌ای شد. وی نشان داد که کاهش فشار با نشست‌های زیاد هسته نسبت به پوسته و نتیجتاً انتقال بار از هسته به پوسته مرتبط است که تا سال ۱۹۶۰ توجه اندکی به موضوع انتقال بار می‌شد. تا اینکه نانویلر (۱۹۶۱) نظریه وضعیت تنش‌ها را در هسته با نشست آن نسبت به پوسته شرح و بسط دادند. ایشان بیان کردند که پدیده انتقال تنش یا قوس‌زدگی نه تنها بین هسته و پوسته رخ می‌دهد، بلکه با توجه به پروفیل دره بین دو تکیه‌گاه نیز اتفاق می‌افتد (۱۰). ماکسیموویک (۱۹۷۳) مسأله قوس‌زدگی هسته سدهای خاکی را به روش اجزاء محدود بررسی نمود. وی در محاسبات خود رفتار مصالح را الاستیک و ساخت سد را یک‌مرحله‌ای فرض کرد. فرض ساخت یک‌باره سد و در نظر نگرفتن رفتار پلاستیک مصالح سبب شد که میزان قوس‌زدگی بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد گردد (۶). همچنین کولهاوی (۱۹۷۶) پدیده قوس‌زدگی و شکست هیدرولیکی را در

سدهای با هسته رسی قائم مورد مطالعه قرار داد. ایشان به این نتیجه رسید که پدیده انتقال تنش در سدهای خاکی غیرهمگن، در اثر تغییر سختی در ناحیه‌های مجاور به وقوع می‌پیوندد (۴). همچنین سزوستاک (۲۰۰۴) با بررسی سد خاکی LG در شمال شهر کبک در کشور کانادا با تحلیل نتایج ابزار دقیق به‌کار رفته در این سد به بررسی قوس‌زدگی این سد خاکی پرداختند (۱۲). سد خاکی-سنگریزه‌ای مارون با بیشینه ارتفاع ۱۷۰ متر یکی دیگر از مرتفع‌ترین سدهای سنگریزه‌ای ایران است که اجرای یک سیستم ابزار دقیق در درون بدنه و اطراف آن امکان بررسی رفتار این سازه را فراهم آورده است. از جمله ابزار نصب شده در درون بدنه سد مارون، انحراف‌سنج‌ها و نشست‌سنج‌هاست. برای تعیین چگونگی رفتار بدنه سد (تحت تأثیر نیروهای استاتیکی)، تجزیه و تحلیل غیرخطی به دو صورت تنش کلی و مؤثر صورت می‌گیرد. مدل ریاضی مورد استفاده در تجزیه و تحلیل استاتیکی بر پایه تقسیم‌بندی سد به المان‌های محدود بوده و با توجه به مراحل ساخت شبیه‌سازی شده است (۱۱). عساکره (۲۰۱۷) پارامترهای مؤثر در پدیده قوس‌زدگی در سد خاکی غیرهمگن بافت را با مدل‌سازی با نرم‌افزار Plaxis مورد بررسی قرار داد و بیان نمود که عرض هسته، ضخامت لایه فیلتر و تراکم‌پذیری پی به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در قوس‌زدگی سدهای خاکی دارند (۱). نیکخواه (۲۰۰۷) ابزار دقیق‌های نصب شده در بدنه سد خاکی ملاصدرا را مورد بررسی قرار داد و با توجه به محدوده ضرایب قوس‌زدگی (۰/۴۵ تا ۰/۵۸) مشخص شد که سد ملاصدرا شرایط مناسبی از نظر قوس‌زدگی دارد (۹). حشمتی (۱۳۸۹) در پژوهشی به بررسی پدیده قوس‌زدگی در سدهای خاکی پرداختند. ایشان جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC دوبعدی استفاده نمودند (۳). در این پژوهش با ادغام اطلاعات

بهره‌برداری از سد ۱۸۶۴ متر از سطح دریا می‌باشد. حجم مخزن در رقوم نرمال بهره‌برداری از سد ۵۲ میلیون مترمکعب و وسعت دریاچه در تراز نرمال ۲/۳ کیلومتر مربع است. عملیات اجرایی احداث سد خاکی ایوشان از اوایل سال ۱۳۸۳ آغاز گردید. پس از حدود ۳۰ ماه یعنی در اواسط سال ۱۳۸۵ عملیات اجرایی بدنه سد خاکی ایوشان توسط پیمانکار طرح شروع شد و عملیات خاکریزی بدنه در خردادماه سال ۱۳۹۱ به اتمام رسید. آبیگری سد خاکی ایوشان از اوایل بهمن‌ماه ۱۳۹۲ آغاز و در حد فاصل سال‌های ۹۳-۹۲ تقریباً یک سوم از ارتفاع سد آبیگری شد و نهایتاً در سال ۱۳۹۳ آبیگری سد به‌طور رسمی انجام شد. محدوده سد و نقشه مقطع تیپ بدنه سد خاکی ایوشان نشان داده شده است (شکل‌های ۱ و ۲).

ابزار دقیق نصب شده و تحلیل‌های عددی توسط نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis به بررسی تنش کل و پدیده قوس‌زدگی در اولین دوره آبیگری سد خاکی ایوشان پرداخته خواهد شد.

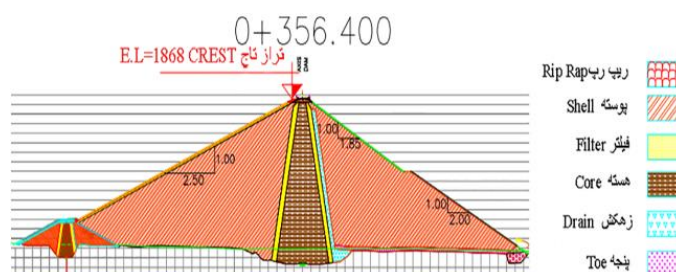
### مواد و روش‌ها

**مشخصات سد خاکی ایوشان:** سد مخزنی ایوشان در فاصله ۱/۵ کیلومتری بالادست روستای ایوشان گلستان و حدود ۵۷ کیلومتری شهر خرم‌آباد در مختصات طول جغرافیایی "۲' و ۴۹' و ۴۸° شرقی و عرض جغرافیایی "۳۱' و ۲۸' و ۳۳° شمالی، بر روی رودخانه هرود در شهرستان زاغه واقع شده است. سد از نوع خاکی- سنگریزه‌ای با هسته قائم رسی می‌باشد که ارتفاع آن از بستر ۶۲ متر (تراز ۱۸۰۴ متر از سطح دریا)، تراز تاج سد ۱۸۶۸ متر و رقوم نرمال



شکل ۱- سد خاکی ایوشان.

Figure 1. Eyvashan earth dam.



شکل ۲- مقطع تیپ بدنه و بی سد خاکی ایوشان.

Figure 2. Body and foundation Section type Eyvashan earth dam.

قرائت می‌شود دارای خطای انسانی نیز می‌باشد. ابزار نصب شده در سد خاکی ایوشان شامل پیزومترهای کاساگرانده برای اندازه‌گیری فشار آب، چاه‌های مشاهده‌ای برای تعیین تراز آب زیرزمینی و نشست‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری میزان نشست بدنه و سرریز مثلثی<sup>۱</sup> جهت اندازه‌گیری دبی آب نشستی از بدنه سد به کار می‌روند که این ابزار از نوع مکانیکی بوده و از ساده‌ترین نوع ابزار دقیق نصب شده در این سد می‌باشد. ابزار الکتریکی دارای دقت بالاتری بوده و قرائت آن‌ها توسط دستگاه‌های قرائت‌گر و امکان قرائت از راه دور نیز در این ابزار امکان‌پذیر می‌باشد. پیزومترهای الکتریکی جهت اندازه‌گیری فشار آب منفذی، سلول‌های فشارسنج برای اندازه‌گیری تنش کل، انحراف‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها، کشیدگی‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری میزان کشیدگی و یا بازشدگی در توده‌های سنگی و خاکی، ترک‌سنج‌ها برای اندازه‌گیری میزان تغییر عرض ترک‌ها، شتابنگارها برای اندازه‌گیری و ثبت حرکات لرزشی زمین و ده‌ها ابزار دیگر از جمله ابزار الکتریکی رایجی هستند که در سدهای خاکی و بتنی استفاده می‌گردد. وضعیت کلی ابزار نصب شده سد ایوشان در جدول ۱ ارائه شده است.

زمین‌شناسی سد ایوشان: مشخصات زمین‌شناسی ساختگاه سد نقش مهمی را در طراحی و تامین مصالح مورد نیاز برای احداث آن ایفا می‌کند. ساختگاه سد مخزنی ایوشان از دیدگاه زمین‌شناسی در محدوده بستر سنگی مشتمل بر سنگ‌های کنگلومرایی است که در محدوده کوله‌ها این سنگ‌ها دارای رخنمون بوده ولی در کف دره رسوبات آبرفتی جوان درشت‌دانه، بر روی سنگ کنگلومرا نهشته شده است. بیش‌ترین رخنمون واحد سنگی منطقه سد از جنس کنگلومرا می‌باشد که به‌صورت ناهمگن و بیش از ۸۵ درصد آن آهکی است و بقیه عناصر آن متشکل از قطعات رادیولاریت، ماسه سنگ، اسلیت و انواع سنگ‌های دگرگونی و آذرین می‌باشد. در بررسی‌های صورت گرفته در محدوده دریاچه و محور سد، درزه یا سیمای تکتونیکی واضحی مشاهده نشده است. بر اساس نتایج حاصل از نفوذپذیری لوزان، ۸۶ درصد داده‌ها، دارای مقادیر کم‌تر از یک و در حد صفر تعیین گردیده است که نشان از آب‌بندی مصالح کنگلومرایی در محدوده محور سد است. از نظر زمین‌شناسی سنگ کنگلومرای کوله‌ها، مخزن و محور سد با ضخامت چند صد متر یک نوع کنگلومرای جوان از نوع کنگلومرای بختیاری محسوب می‌شود.

ابزار دقیق نصب‌شده در سد خاکی ایوشان: سیستم جانمایی و طراحی ابزار دقیق بر اساس طراحی‌های بدنه و پی سد خاکی صورت می‌گیرد، در سدهای خاکی عمدتاً جانمایی ابزار بر اساس نحوه قرائت به دو صورت مکانیکی و الکتریکی انجام می‌گیرد. ابزار مکانیکی در مقایسه با ابزار الکتریکی سیستم بسیار ساده و ارزان‌تری را دارا می‌باشد ضمن آن‌که قرائت این ابزار زمانبر بوده و از آنجایی‌که به‌صورت دستی

1- v-notch

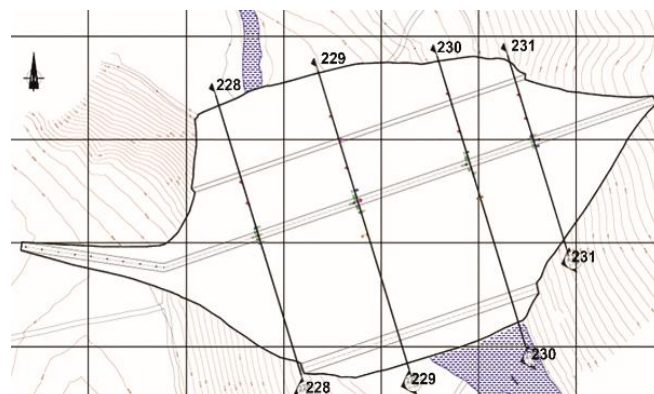
جدول ۱- ابزار دقیق سد خاکی ایوشان.

**Table 1. Instrumentation of Eyvashan earth dam.**

تعداد Number	علایم Type	نوع ابزار Kind of instrument
24	EPF	پیزومتر الکتریکی پی Electrical Piezometer Foundation
51	EPE	پیزومتر الکتریکی خاکریز Electrical Piezometer Embankment
29	TPC	سلول فشار کل Total Pressure Cell
8	SP	پیزومتر لوله ایستاده Stand Pipe Piezometer
2	INP	انحراف‌سنج برجا Inclinometer (in place)
7	IS	انحراف‌سنج - نشست‌سنج Inclinometer & Settlement

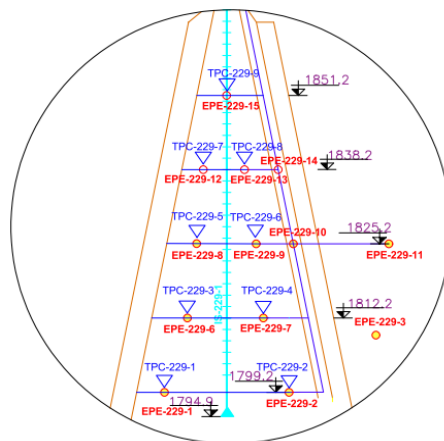
دقیق سد ایوشان در شکل ۳ مشخص شده است. هم‌چنین در شکل ۴ مقطع ابزاربندی ۲۲۹ در این سد آورده شده است. بیش‌ترین تراز ابزاربندی مربوط به مقطع ۲۲۹-۲۲۹ با هفت تراز و کم‌ترین تعداد تراز ابزاربندی مربوط به مقطع ۲۳۱-۲۳۱ با پنج تراز می‌باشد.

مقاطع ابزارگذاری در سد خاکی ایوشان: ابزاربندی سد ایوشان در ۴ مقطع با نام‌های ۲۲۸-۲۲۸، ۲۲۹-۲۲۹، ۲۳۰-۲۳۰ و ۲۳۱-۲۳۱ به ترتیب در کیلومترهای ۲۴۹+۰، ۳۵۶+۰، ۴۷۷+۰ و ۵۴۶+۰ در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر رفتارنگاری ابزار نصب شده در مقطع ۲۲۹ سد خاکی ایوشان مورد ارزیابی قرار گرفته است. موقعیت مقاطع عرضی ابزار



شکل ۳- موقعیت مقاطع ابزارگذاری بر روی پلان سد ایوشان.

**Figure 3. The position of the instrumentation sections of the Eyvashan earth dam.**



شکل ۴- ابزاربندی در مقطع عرضی ۲۲۹-۲۲۹.  
Figure 4. Instrumentation in Section 229-229.

چنانچه بدنه سد از مناطق مختلف دارای مصالح متفاوت تشکیل شده باشد، عدم تطبیق در تغییر شکل پذیری این مصالح مختلف ممکن است منجر به ایجاد تغییر شکل‌های قائم شود. در سدهای از نوع غیرهمگن با هسته مرکزی معمولاً نشست هسته رسی ممکن است منجر به محبوس شدن و در واقع آویزان شدن آن در بین مصالح پوسته بالادست و پایین دست شود و در واقع پدیده قوس زدگی را ایجاد کند. این امر به خاطر تفاوت در تراکم پذیری هسته نسبت به پوسته اتفاق می‌افتد. ضریب و میزان قوس زدگی درون هسته خاکی از رابطه‌های ۱ و ۲ به دست می‌آید:

$$\text{ضریب قوس زدگی} = \frac{\sigma_v}{\gamma \cdot h} \quad (1)$$

$$\text{میزان قوس زدگی} = (1 - \text{ضریب قوس زدگی}) \times 100 \quad (2)$$

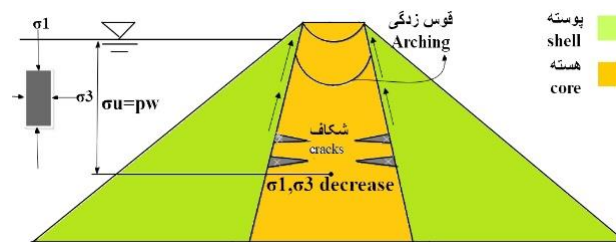
که در آن،  $\sigma_v$  (KPa) تنش مؤثر قائم درون هسته،  $\gamma$  (KN/m<sup>2</sup>) وزن مخصوص هسته و  $h$  (m) ارتفاع خاکریز می‌باشد. هرچه ضریب قوس زدگی بیشتر شود میزان قوس زدگی (درصد قوس زدگی) کم تر خواهد شد. هم چنین هرچه مقدار درصد قوس زدگی بیشتر باشد، قوس زدگی مؤثرتر است و کاهش سطح

بررسی نتایج قوس زدگی ابزار دقیق سد ایوشان: پدیده قوس زدگی به اختلاف نشست پوسته و هسته سد (تحکیم پذیری مصالح هسته) و مقاومت برشی بین هسته و پوسته سد وابسته است. بدیهی است که خاک رس به خصوص اگر به صورت عادی تحکیم یافته نیز باشد دارای نشست زیادی است. این مقدار نشست در هسته باعث می‌شود که اختلاف نشست بین هسته و فیلتر و پوسته نیز زیاد باشد. تمایل هسته به نشست بیشتر (نسبت به پوسته سخت مجاور) که تحت اثر وزن منجر به انتقال بخشی از وزن هسته به پوسته سخت مجاور می‌شود از یک طرف و اتصال آن به فیلتر از طرف دیگر زمینه را برای بروز پدیده قوس زدگی فراهم می‌کند. در نتیجه در هسته تنش قائم از سربار کم تر و در پوسته مجاور بالعکس بیشتر می‌باشد. این انتقال وزن از هسته به پوسته به قوس زدگی هسته به روی پوسته موسوم است. با کاهش فشار قائم در هسته و به دنبال آن آبیگری سد و کاهش تنش مؤثر امکان نفوذ آب، شکست هیدرولیکی و تخریب سد وجود دارد. هم چنین بروز برخی از شکاف‌های عرضی در بخش نفوذناپذیر سد به ویژه در نزدیکی اتصال به دیواره‌های جانبی آن ممکن است به دلیل تمایل به قوس زدگی باشد.

1- Arching ratio

از فشار آب در همان ارقام کاهش پیدا کند ممکن است به شکست هیدرولیکی یا تشکیل ترک‌های ناشی از فشار آب زیاد منجر گردد و در این صورت امکان رگاب وجود دارد. یک الگوی ترک هیدرولیکی ناشی از قوس‌زدگی که مهندسان اغلب در شرایط صحرائی در مقطع عرضی سد با آن مواجه می‌شوند در شکل ۵ نشان داده شده است.

تنش بیش‌تر اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال در یک سد خاکی و در عمقی در زیر تاج سد، نسبت‌های کم‌تر از یک ضریب مذکور، دال بر انتقال بار هسته به روی ناحیه تبدیل و پوسته می‌باشد، در حالی‌که نسبت‌های بزرگ‌تر از یک نشان‌دهنده انتقال بار از نواحی تبدیل و پوسته بر روی هسته است. در صورتی که تنش‌ها در رقوم ارتفاعی در اثر قوس‌زدگی به مقادیری کم‌تر

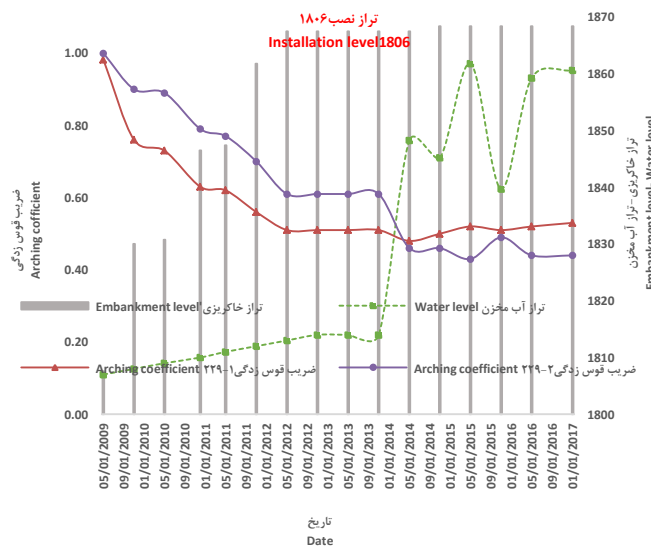


شکل ۵- تشکیل ترک هیدرولیکی.

Figure 5. Hydraulic crack forming.

مقدار به ۰/۵۳ رسیده است و در پایین‌دست از یک شروع و در آخرین قرائت به ۰/۴۴ رسیده است (شکل ۶).

در تراز ۱۸۰۶ متر ارتفاع از سطح دریا دو سلول فشار کل به فواصل مساوی در بالادست و پایین‌دست هسته رسی جانمایی و نصب شده‌اند، این نسبت در بالادست از ۰/۹۸ شروع و در آخرین قرائت ابزار این



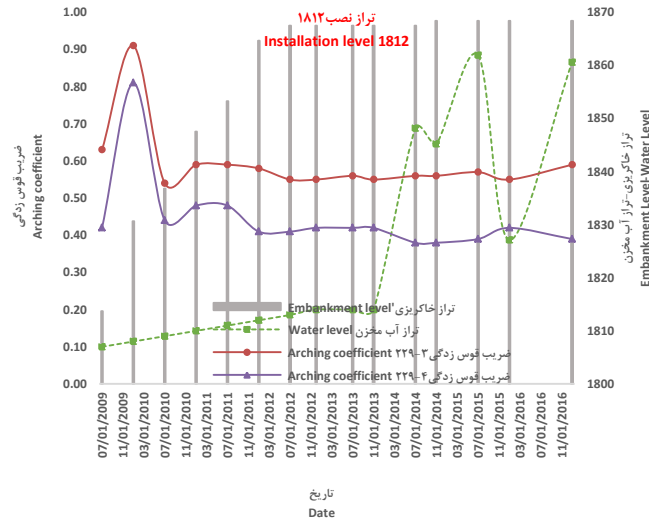
شکل ۶- تغییرات ضریب قوس‌زدگی، تراز ۱۸۰۶.

Figure 6. Variation of arching coefficient, level 1806.



حدود ۰/۵۹ و در پائین دست به ۰/۳۹ رسیده است (شکل ۷).

در تراز ۱۸۱۲ متر ارتفاع از سطح دریا این نسبت در بالادست در آخرین قرائت ارائه شده ابزار دقیق در

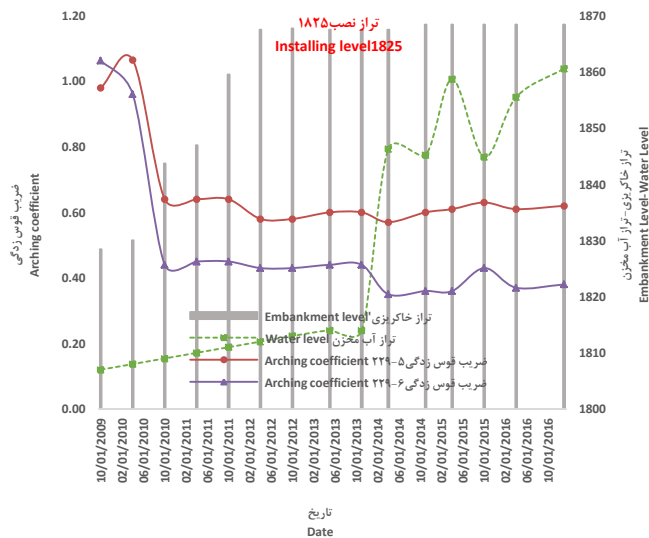


شکل ۷- تغییرات ضریب قوس زدگی، تراز ۱۸۱۲.

Figure 7. Variation of arching coefficient, level 1812.

نسبت از یک شروع و به حدود ۰/۳۸ رسیده است (شکل ۸).

در تراز ۱۸۲۵ متر ارتفاع از سطح دریا این نسبت، در بالادست از یک شروع که در آخرین قرائت ابزار دقیق به حدود ۰/۶۲ رسیده است. در پائین دست این

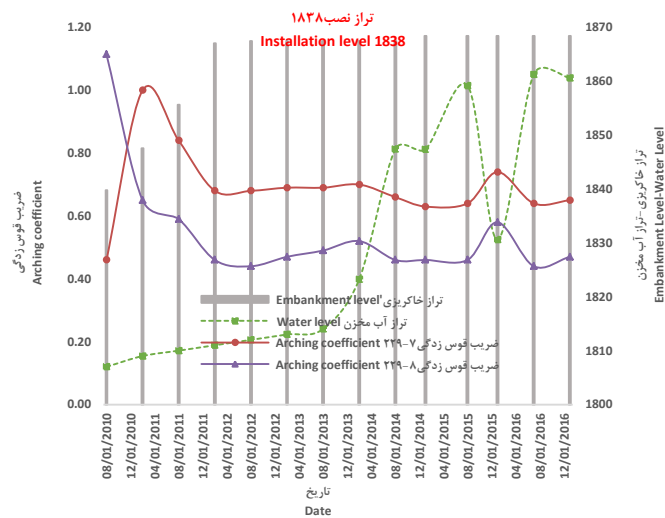


شکل ۸- تغییرات ضریب قوس زدگی، تراز ۱۸۲۵.

Figure 8. Variation of arching coefficient, level 1825.

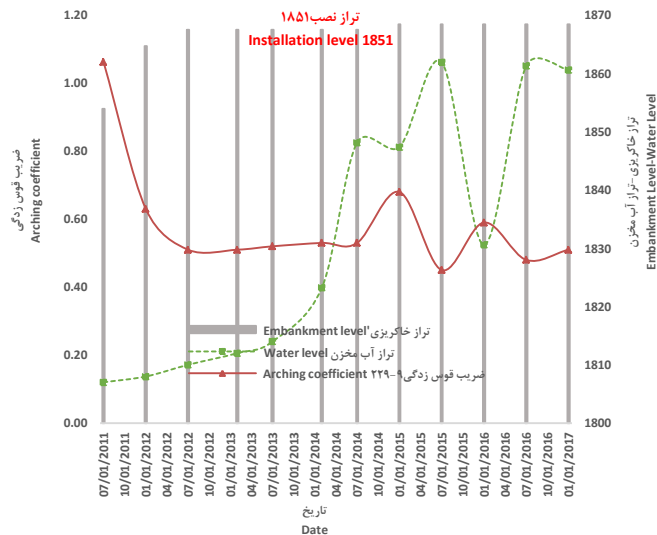
نسبت قوس زدگی از نسبت حدود یک در ابتدا و در آخرین قرائت ابزار دقیق حدود ۰/۵۱ را نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

در تراز ۱۸۳۸ متر ارتفاع از سطح دریا نسبت محاسبه شده در آخرین قرائت ابزار دقیق در بالادست ۰/۶۵ و در پایین دست حدود ۰/۴۷ را نشان می‌دهد (شکل ۹). در تراز ۱۸۵۱ متر ارتفاع از سطح دریا



شکل ۹- تغییرات ضریب قوس زدگی، تراز ۱۸۳۸.

Figure 9. Variation of arching coefficient, level 1838.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب قوس زدگی، تراز ۱۸۵۱.

Figure 10. Variation of arching coefficient, level 1851.

مقطع ۲۲۹ سد به عنوان مقطع بحرانی و بیشینه انتخاب و مدل سازی گردیده است. در تحلیل سد ایوشان از مدل رفتاری موهر کولمب برای مصالح هسته رسی و دیگر مصالح سد استفاده گردید. مدل موهر کولمب از ساده ترین مدل های رفتاری خاک می باشد و از آنجایی که در این مدل بیش تر پارامترهای اساسی خاک، اعم از خمیری و کشسان وجود دارد برای مدل کردن اکثر حالات رفتاری خاک مناسب می باشد. پارامترهای مصالح مورد استفاده در تحلیل، در جدول ۲ ارائه شده است؛ بنابراین، شدت و چگونگی توزیع فشار آب منفذی ضمن این که به مشخصات تحکیمی، نفوذپذیری و شرایط زهکشی وابسته است تا حد زیادی نیز به چگونگی و ترتیب اجرای کار بستگی دارد. در شرایط ساخت (سد آبیگری نشده)، زه در بدنه سد وجود ندارد و کم شدن رطوبت مصالح به علت خشک شدن تدریجی نیز ناچیز است و تنها در اثر وزن لایه های بالاتر، آب منفذی تحت فشار قرار می گیرد. با توجه به اجرای لایه به لایه سدهای خاکی و با در نظر گرفتن اثر تراکم در تغییر خواص مصالح، کاملاً واضح است که برای حصول نتایج دقیق باید سد خاکی به صورت لایه به لایه مدل گردد و بعد از اعمال هر لایه، لایه بعدی به صورت نیروی وزن روی بخش پیش ساخته قرار گیرد. در صورتی که تحلیل یک سد خاکی مانند یک ساختمان یا یک سد بتنی به صورت یک مرحله ای انجام شود، تنش ها و به خصوص تغییر مکان های حاصله غیر واقعی خواهند بود. لازم به ذکر است که برای مدل سازی نشست تحکیمی و تنش - کرنش ساخت لایه به لایه سد در هشت لایه انجام شده و سپس آبیگری صورت گرفته است. مقادیر تنش کل و قوس زدگی به دست آمده از تحلیل عددی و قرائت ابزار دقیق در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای حاصل از نتایج داده های مشاهداتی بیش ترین میزان قوس زدگی در نواحی نزدیک فیلتر اتفاق افتاده است در واقع میزان تنش ها در وسط هسته بیش تر و با نزدیک شدن به فیلترها کاهش می یابد. همچنین میزان قوس زدگی در ترازهای بالاتر به علت درصد رطوبت کم تر و عرض کم تر هسته، بیش تر می باشد. قابل ذکر است کاهش ضریب قوس زدگی با زمان شاید به نحوه نصب ابزار و امحاء فشار در داخل سلول های فشار ناشی از عوامل مختلف از جمله ضریب عکس العمل خاک در اثر فشار باشد.

### نتایج و بحث

**تحلیل عددی تنش کل و قوس زدگی:** افزایش فشار آب منفذی درون هسته رسی سدهای خاکی سنگریزه ای، در اولین دوره آبیگری، موجب وقوع نشست های تحکیمی در این ناحیه می گردد. برای تحلیل تنش - کرنش سدهای خاکی معمولاً از روش اجزاء محدود به صورت دوبعدی و در شرایط کرنش صفحه ای، که موجب ساده شدن محاسبات می گردد، استفاده می شود. برای تحلیل تنش - کرنش سدهای خاکی معمولاً از روش اجزاء محدود به صورت دوبعدی و در شرایط کرنش صفحه ای، که موجب ساده شدن محاسبات می گردد، استفاده می شود. در پژوهش حاضر به منظور انجام تحلیل تنش - کرنش سد ایوشان (تنش کل هسته) از نرم افزارهای Geostudio و Plaxis استفاده شده است. در مدل Plaxis مش بندی توسط عناصر ۱۵ گره ای مدل شده است. این نرم افزارها قادر به تحلیل رفتار خاک (تغییرات در حالت تحلیل غیرخطی<sup>۱</sup> و نیز تحلیل سد در دوران ساخت و دوران بهره برداری با در نظر گرفتن فشار آب منفذی می باشد. در این بخش نیز

1- Hyperbolic Linear-Elastic

جدول ۲- پارامترهای مصالح مورد استفاده در تحلیل تنش- کرنش.

Table 2. Materials parameters used in Stress and Strain analysis.

مصالح Material	مدل Model	نوع مصالح Kind of Materials	E (Mpa)	$\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	c,c' (kPa)	$\phi, \phi'$ (°)
هسته Core	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی نشده Undrained	35	17	20	21	63	11
		زهکشی شده Drainage					28	24
پوسته Shell	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی شده Drainage	70	22.5	23.8	24.5	-	-
فیلتر Filter	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی شده Drainage	45	19	21	22	-	-
زهکش Drain	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی شده Drainage	55	20.5	22	23	-	-
آبرفت Alluvium	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی شده Drainage	500	21.5	-	23.2	-	-
پی Foundation	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی شده Drainage	5000	25	-	25.5	-	-
پرده آب‌بند Cutoff	موهر کولمب Mohr-Coulomb	زهکشی شده Drainage	2500	24	-	24	-	-

جدول ۳- تنش کل اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، تراز ۱۸۶۱/۲۰ متر.

Table 3. The total stress measured and predicted, level 1861.20 m.

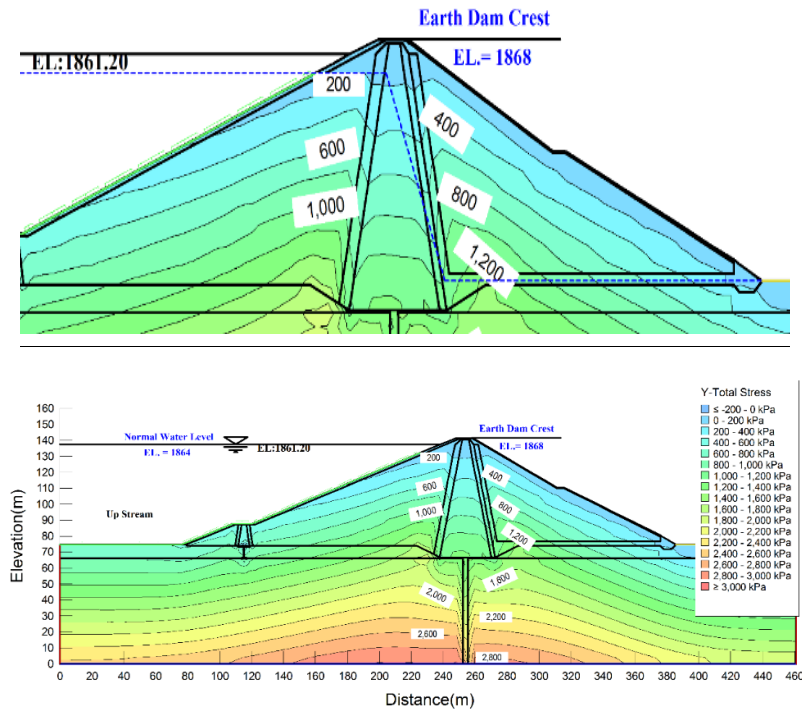
پیزومتر Piezometer	ارتفاع (متر از سطح دریا) Level (masl)	ضریب قوس‌زدگی (قبل از آبگیری) Arching coefficient (before impounding)			ضریب قوس‌زدگی (پس از آبگیری) Arching coefficient (after impounding)		
		ابزار دقیق	Geostudio	Plaxis	ابزار دقیق	Geostudio	Plaxis
TPC-2	1806.36	0.70	0.72	0.71	0.54	0.58	0.59
TPC-3	1812.24	0.71	0.71	0.72	0.63	0.63	0.62
TPC-4	1812.16	0.58	0.61	0.55	0.44	0.54	0.53
TPC-5	1825.45	0.73	0.72	0.74	0.62	0.65	0.64
TPC-6	1825.39	0.61	0.69	0.70	0.50	0.59	0.57
TPC-7	1838.35	0.83	0.82	0.80	0.66	0.68	0.67
TPC-8	1838.35	0.68	0.78	0.79	0.53	0.65	0.61
TPC-9	1851.36	0.63	0.68	0.69	0.56	0.59	0.56

ملاحظه می‌شود که مقادیر تنش کل در وجوه بالادست و پایین‌دست تقریباً به موازات سطح خاک‌ریز بوده و در ناحیه مرکزی محور سد (هسته

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کانتورهای تنش قائم کل مقطع ۲۲۹ سد ایوشان در تراز آب مخزن برابر با ۱۸۶۱/۲۰ متر از سطح دریا نشان داده شده است و

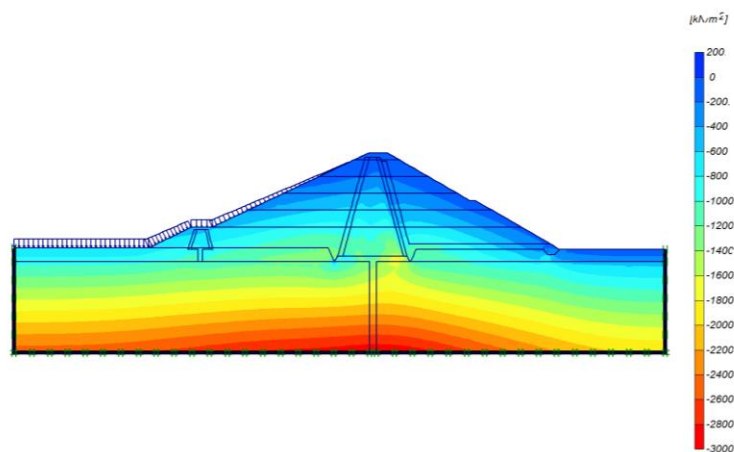
می‌شود. در واقع کاهش تنش در ناحیه هسته رسی به دلیل انتقال بار از هسته به جناحین و بروز پدیده قوس زدگی است.

رسی) وضعیت منحنی تغییر یافته است. در هر تراز افقی بیشینه مقدار تنش در محدوده لایه‌های انتقالی بالادست و پایین دست هسته سد (فیلتر و زهکش) بوده و به سمت شیب‌های پوسته این مقدار کم‌تر



شکل ۱۱- کانتورهای تنش کل، تحلیل تنش- کرنش، تراز ۱۸۶۱/۲۰ متر.

Figure 11. Total stress contours, stress-strain analysis, level 1861.20 m (Geostudio).

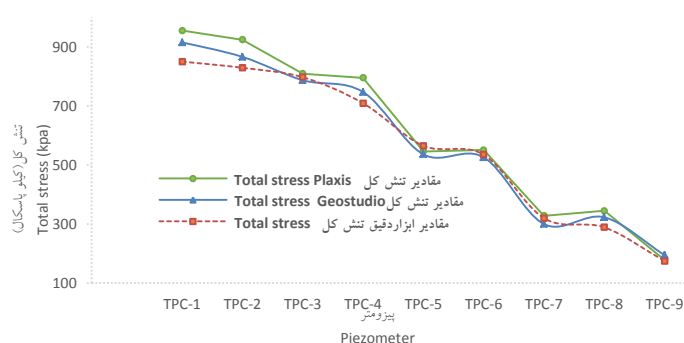


شکل ۱۲- کانتورهای تنش قائم کل، تحلیل تنش- کرنش، تراز ۱۸۶۱/۲۰ متر.

Figure 12. Total stress contours, stress-strain analysis, reservoir level 1861.20 m (Plaxis).

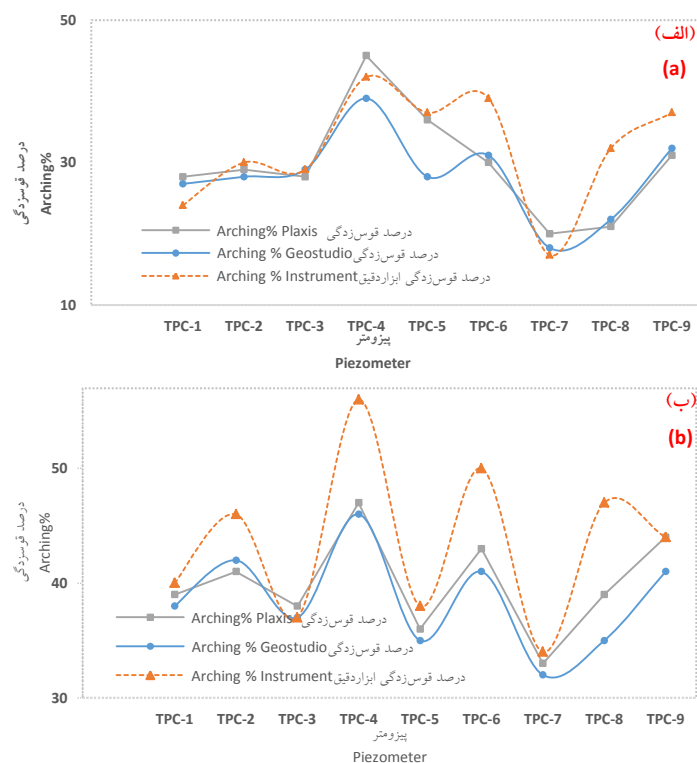
هسته  $\left(\frac{\sigma_v}{\gamma h}\right)$  نسبت تنش قائم به سربار در نقطه موردنظر به ارتفاع هسته ترسیم شده است، که نشان می‌دهد بیش‌ترین درصد قوس‌زدگی (کم‌ترین نسبت قوس‌زدگی) برابر ۴۶ درصد و در  $\frac{1}{3}$  ارتفاع هسته از کف رخ داده است. در واقع نسبت قوس‌زدگی بحرانی ۰/۴۴ است که در حد متعارف است.

به جهت مقایسه بهتر مقادیر تنش کل و درصد قوس‌زدگی در زمان قبل و بعد از آبیگری مدل‌سازی و با نتایج ابزار دقیق در ترازهای مختلف مقایسه شده‌اند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تنش‌های قائم و تنش‌های اصلی حداکثر در محدوده اتصال هسته و پوسته افت نموده و دارای تغییرات ناگهانی می‌باشد. این افت نشانگر وقوع پدیده قوس‌زدگی می‌باشد. در شکل ۱۵ نسبت قوس‌زدگی



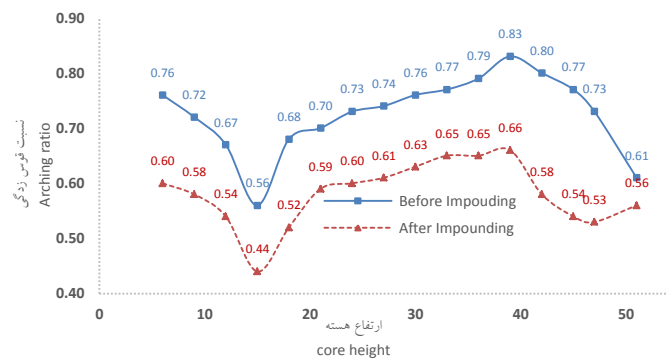
شکل ۱۳- مقایسه نتایج تنش کل ابزار دقیق و نرم‌افزارها.

Figure 13. Comparing the results of the total stresses of the instrumentation and software.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج مربوط به درصد قوس‌زدگی. (الف) قبل از آبیگری (ب) پس از آبیگری.

Figure 14. Comparison of arching results. (a) before impounding, (b) after impounding.



شکل ۱۵- تغییرات ضریب قوس زدگی در ارتفاع هسته.

Figure 15. Changes in arching coefficient at the core height.

هر کدام به عرض ۳ متر در پایین دست هسته جانمایی گردیده است. هم چنین درصد تغییرات در دو تراز یکسان پس از آبگیری نسبت به دوران ساخت به طور محسوسی بیش تر شده است و این افزایش می تواند ناشی از آبگیری سد و حالت اشباع هسته و بدنه در بالای خط فریاتیک باشد. البته نتایج نشان می دهد که آبگیری سد بیش ترین تأثیر را بر ترازهای بالایی داشته است به نحوی که در ترازهای بالاتر حدود ۱۰۰ درصد و در ترازهای پایین تر حدود ۵۰ درصد به میزان قوس زدگی قبل از آبگیری افزوده شده است که می تواند به دلیل عرض کم تر هسته در ترازهای بالاتر باشد ولی با این وجود بیش ترین درصد قوس زدگی از ابتدا ساخت تا پایان مرحله آبگیری در قسمت های پایینی هسته رخ داده است. به منظور ارزیابی و مقایسه دقیق آماری نتایج داده های ابزار دقیق و تحلیل عددی، از معیارهای مربع مجذور میانگین خطای نرمال شده <sup>۱</sup>(NRMSE) رابطه ۳ و خطای استاندارد نسبی <sup>۲</sup>(RSE) رابطه ۴ و میانگین قدر مطلق درصد خطا <sup>۳</sup>(MAPE) رابطه ۵ و هم چنین از میانگین قدر مطلق خطا <sup>۴</sup>(MAE) رابطه ۶ در محاسبه خطای نسبی <sup>۵</sup>(RE) رابطه ۷ استفاده شده است.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می شود که مقادیر تنش کل به دست آمده از تحلیل عددی در فشارسنج هایی که در یک تراز نصب شده اند، تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارند. نکته قابل توجه تفاوت در مقادیر فشار کل به دست آمده ابزار دقیق می باشد، به طوری که مقادیر فشار به دست آمده در یک تراز دارای اختلاف می باشند. از طرفی تفاوت زیاد در مقادیر تنش کل در یک تراز و نیز سابقه خرابی و عملکرد نامناسب این ابزار در سدهای مختلف، احتمال بروز خطا و یا عملکرد نامناسب این ابزار را تقویت می کند. بخشی از این اختلاف مقادیر می تواند ناشی از اختلاف مقادیر وزن مخصوص مصالح در طراحی و واقعیت باشد. هم چنین در شکل ۱۴ مشاهده می شود مقدار قوس زدگی بعد از آبگیری افزایش یافته است. هم چنین درصد قوس زدگی فشارسنج هایی که در تراز یکسان (هم تراز) در هسته نصب شده است متفاوت است به نحوی که جناح پایین دست هسته رسی نسبت به بالادست قوس زدگی بالاتری را نشان داده است. این تغییرات به جهت مجاورت فشارسنج های پایین دست با ناحیه فیلتر و زهکش زیر هسته رسی سد است در حالی که در بالادست هسته، یک ناحیه فیلتر با عرض کم تر وجود دارد. شایان ذکر است که یک ناحیه فیلتر با عرض ۲/۵ متر در بالادست هسته و دو ناحیه فیلتر و زهکش

- 1- Normal Rout Mean Square Error
- 2- Relative Standard Error
- 3- Mean Absolute Percent Error
- 4- Mean Absolute Error
- 5- Relative Error

که در آن‌ها،  $P_i$  مقادیر شبیه‌سازی شده (نرم‌افزار)،  $O_i$  مقادیر مشاهداتی (ابزار دقیق)،  $O_{ave}$  متوسط مقادیر مشاهداتی،  $O_{max}$  بیشینه مقادیر مشاهداتی،  $O_{min}$  کمینه مقادیر مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. پس از اعمال روابط بر روی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نتایج میانگین خطای نرمال شده، خطای استاندارد نسبی، میانگین قدرمطلق درصد خطا و میانگین قدرمطلق خطای نسبی مربوط به تنش کل و قوس‌زدگی پس از آبیگری مدل‌های Geostudio و Plaxis مطابق جدول‌های ۴ و ۵ به‌دست آمد.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{O_{max} - O_{min}} \quad (3)$$

$$RSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{O_{ave}} \quad (4)$$

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \times \frac{100}{n} \quad (5)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (6)$$

$$RE = \frac{MAE}{O_{ave}} \times 100 \quad (7)$$

جدول ۴- ارزیابی و مقایسه مدل‌های آماری برای نتایج تنش کل.

Table 4. Evaluation and Comparison of Statistical Models for total stress results.

مدل	معیار (%)	NRMSE	RSE	MAPE	RE
		Geostudio	95.05	94.22	94.91
Plaxis		91.25	89.76	92.57	92.30

جدول ۵- ارزیابی و مقایسه مدل‌های آماری برای نتایج قوس‌زدگی.

Table 5. Evaluation and Comparison of Statistical Models for arching results.

مدل	معیار (%)	NRMSE	RSE	MAPE	RE
		Geostudio	70.97	88.69	91.79
Plaxis		77.22	91.12	93.65	93.2

نتایج به‌دست آمده بیانگر کارایی مدل‌ها و انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده با نرم‌افزارها می‌باشد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش سعی شده است تا با توجه به داده‌های به‌دست آمده از ابزار دقیق نصب شده در بدنه سد ایوشان و پردازش این داده‌ها به کمک تحلیل عددی اطلاعات بیش‌تری در مورد رفتار سد پس از آبیگری به دست آورد. با مقایسه نتایج مقادیر تنش قائم کل اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزارها می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به این‌که

مقادیر تنش قائم کل به‌دست آمده از تحلیل عددی در فشارسنج‌هایی که در یک تراز نصب شده‌اند، تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارند، نرم‌افزار عملکرد مناسبی داشته است. همچنین با بررسی اختلاف موجود در مقادیر فشار کل به‌دست آمده از ابزار دقیق و از طرفی شرایط عادی تراوش و آب حفره‌ای می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از این اختلاف مقادیر می‌تواند ناشی از اختلاف مقادیر وزن مخصوص



ترازها در محدوده ۰/۵۵-۰/۶۸ قرار دارد. با توجه به این که احتمال وقوع شکست هیدرولیکی در سدهای خاکی در نسبت‌های قوس‌زدگی کم‌تر از ۰/۶ (درصد قوس‌زدگی بیش‌تر از ۴۰ درصد) می‌باشد، می‌توان گفت سد از لحاظ قوس‌زدگی در اولین دوره آبیگری در حد نسبتاً متعارفی قرار دارد و از نظر گسیختگی مشکلی نخواهد داشت. به‌طور کلی نتایج تحلیل‌ها رفتار مناسب سد را در برابر شرایط قوس‌زدگی تأیید می‌نماید.

مصالح در طراحی و واقعیت باشد و بخشی دیگر به احتمال بروز خطا و یا عملکرد نامناسب این ابزار مربوط می‌شود. پس از آبیگری سد بیش‌ترین تغییرات قوس‌زدگی هسته نسبت به قبل از آبیگری در ترازهای بالایی مشاهده گردید ولی بیش‌ترین درصد قوس‌زدگی از ابتدا ساخت تا پایان مرحله آبیگری برابر ۴۶ درصد و در  $\frac{1}{3}$  ارتفاع هسته از کف رخ داده است. در واقع نسبت قوس‌زدگی بحرانی در شرایط پس از اولین دوره آبیگری برابر ۰/۴۴ است و در سایر

### منابع

- Asakareh, A., and Ahang, M. 2017. Numerical study of arching phenomenon in the nucleus of non-homogeneous tissue of dam located in Kerman province. *Civil Engineering Modares*. 30: 161-168. (In Persian)
- Hassani, N., Rasti Ardakani, R., and Vazinram, F. 2003. *Concrete Density Controlling Sustainability (Measurement, Behavioral, Maintenance and Remediation)*. School of Water and Power Industry Press. 675p. (In Persian)
- Heshmati, A., and Yousefi, M. 2009. Numerical analysis of drake dam and the effect of parameters of Mohr Columb model on normal stresses of its core. *Civil Engineering Sharif*. 38:61-69. (In Persian)
- Kulhawy, F.H., and Gurtowski, T.M. 1976. Load transfer and hydraulic fracturing in zoned dams. *J. Geotech. Engin. Div.* 9: 963-967.
- Lofquist, B. 1951. Earth pressure in a thin impervious core. *Transaction 4<sup>th</sup> International Congress on Large Dams*. 1: 99-108.
- Maksimovic, M. 1973. Optimal position of central clay core of rock-fill dam in respect to arching and hydraulic fracture. *11<sup>th</sup> International Congress on Large Dam*. Pp: 789-800.
- Mirghasemi, A., and Tavallali, A. 2012. The study of arching around the trench of the cell during the construction of the dam and correction of pressure reading cells. Iran. 2<sup>nd</sup> National conference on structures. *Earthquakes and Geotechnical*. (In Persian)
- Myers, B., and Statelier, J. 2008. Why include instrumentation in dam monitoring programs? *United States society on dams, Committee on Monitoring of Dams and Their Foundations*.
- Nikkhah, M., Attaie, S., Tavakoli, H., and Hasan, Y. 2007. Evaluation of instrumentation records of the dam body and foundation if embankment mollasadra dam during construction and first stage impounding, Russia. *ICOLD 75<sup>th</sup> Annual Meeting*. Saint Petersburg. Russia.
- Nonveiller, E., and Anagnostl, P. 1961. Stresses and deformations in cores of rock fill dams, *proceedings. Paris. 5<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2: 673-680.
- Pelasi, M., and Hajiani, H. 2000. Study of internal movements of maroon dam using precise instrumentation information. Iran. 4<sup>th</sup> Iranian Dam Construction Conference. (In Persian)
- Szostak, C.A., and Massiera, M. 2004. Modeling of deformations during construction of a large earth dam in the LA Grande Complex. *Canada. Technical Science*. 7: 109-121.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(6), 2020*

*<http://jwsc.gau.ac.ir>*

*DOI: 10.22069/jwsc.2019.14530.2969*

## **Numerical analysis of the effect of arching Eyvashan dam in the first impounding period and its comparison with Instrumental results**

**\*M. Komasi<sup>1</sup>, A.R. Mazaheri<sup>1</sup> and B. Beiranyvand<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, <sup>2</sup>M.Sc. Graduate of  
Water and Hydraulic Structures, Dept. of Civil Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi

Received: 02.08.2018; Accepted: 02.23.2019

### **Abstract**

**Background and Objectives:** In earth dams, due to different properties of materials core and shell, heterogeneous settlement occurs between different sections of the dam. This action leads to a phenomenon of arching which creates some transverse cracks in the impermeable section of the dam, especially near the dam connection to the lateral walls, which can be expanded during the first period of impounding and with the sudden application of reservoir water pressure to core. Ultimately, in more critical situations, it leads to hydraulic failure and causes the scouring phenomenon and jeopardizes the safety of the dam. In this research, the results of instrumental analysis of main stresses and arching coefficients of the Eyvashan earth Dam core during the first impounding period were compared with the results of Geostudio and Plaxis software. The results show that the highest arching rate after impounding has been applied at the upper levels, but the highest percentage of arching from the beginning of construction to the end of the impounding stage was equal to 46% and at  $\frac{1}{3}$  of the height of the core from the floor. In addition, due to the ratio of arching coefficient in the range of 0.55-0.66, the dam in terms of arching in the first impounding period is normal and there is no problem in terms of hydraulic deflection.

**Materials and Methods:** The Eyvashan earth Dam is located 1.5 km from the upstream of the village of Eyvashan and about 57 km from Khorramabad city on the Horoud River. The dam is rock fill type with a Vertical core, with a height of 62 m, a crest height of 1868 m and a normal elevation of 1864 m above sea level. The strain-strain analysis of the Eyvashan dam was performed based on Mohr-Columb behavioral models in terms of strain condition using Geostudio and Plaxis software. For analysis of stress-strain and consolidation settlement, the modeling has been done in eight layers.

**Results:** By study and comparing the arching coefficient obtained from the Electrical Pressure Cell installed in the Eyvashan earth dam and Numerical analysis results, it was determined that the arching coefficient in the different levels of the core is in the conventional range and the risk of arching do not notice the dam. According to the graphs from the results of the observational data, the highest percentage of arc in the near-filter elements occurred. In addition, the comparison of instrumental results with the results of the numerical analysis of matching is about 90%.

---

\* Corresponding Author; Email: komasi@abru.ac.ir

**Conclusion:** By comparing the results of measured and predicted total stresses with Geostudio and Plaxis software, it was found that the total stresses obtained from numerical analysis in the Total Pressure Cell installed at one level are approximately the same and are not significantly different, and the function of the software is appropriate. In addition, the difference in the total pressure values obtained from the instrumentation and the numerical analysis can be due to differences in the specific gravity of the materials in the design and the reality or due to errors and inappropriate performance of the instrument.

**Keywords:** Arching, Eyvashan earth dam, Instrumentation, Total Stress

