

# رفتارنگاری سد دوستی تا انتهای ساخت به کمک داده‌های ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی

حامد اسدیان<sup>۱\*</sup>، ابراهیم رحیمی<sup>۲</sup>، محمد غفوری<sup>۳</sup> و محمد بشیر گنبدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۵

## چکیده

در سال‌های اخیر ابزاربندی سدها در ایران جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. در پروژه‌های بزرگ مانند سدهای خاکی و بتنی، نصب و پایش ابزار دقیق، به‌ویژه در هنگام ساخت و بهره‌برداری، جزو جدایی‌ناپذیر پروژه‌هاست. پایداری سد یکی از مهم‌ترین مسائل مربوط به مهندسی ژئوتکنیک است. با توجه به عدم قطعیت متغیرهای ژئوتکنیکی، استفاده از تجزیه و تحلیل خطر امری اجتناب‌ناپذیر در پروژه‌های سدسازی است. در این پژوهش، در ابتدا درستی ابزاربندی نصب شده در سد دوستی مورد ارزیابی قرار گرفته، سپس بر پایه نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی به بررسی مقادیر بیشینه نشست، مقادیر تنش قائم موجود در هسته و پدیده قوس‌زدگی پرداخته شده است. برای انجام تحلیل‌های عددی از نرم‌افزار GeoStudio 7.1 استفاده شده که افزون بر انجام آنالیزهای همزمان، قابلیت تحلیل ساخت مرحله‌ای و انجام تحکیم دو بعدی را دارد. مدل‌های رفتاری استفاده شده در آنالیز، مدل الاستیک خطی و مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل مور-کولمب است. از مقایسه نتایج مدل‌سازی و ابزار دقیق چنین برمی‌آید که سد دوستی در شرایط پایدار و ایمنی قرار دارد.

**کلیدواژه‌ها:** رفتارنگاری، سد دوستی، تحلیل عددی، ابزار دقیق، نشست.

\*نویسنده مسئول: حامد اسدیان

E-mail: Asadian.hmd@gmail.com

## ۱- پیش‌نویس

در دوران ساخت، اولین آنگیری و بهره‌برداری مورد رفتارنگاری واقع شده‌اند، گزارش شده است (Alba et al., 2006; Yeh et al., 2013; Tomas et al., 2013; Emre et al., 2012; Beheshti et al., 2013; Yong-Seong & Byung-Tak, 2013; Rakshandehroo & Bagherieh, 2006).

سد خاکی LG در شمال شهر کبک در کشور کانادا از این جمله است. ارتفاع این سد ۱۲۵ متر و طول تاج آن ۳۸۰۰ متر است. ابزار دقیق به کار رفته در این سد عبارتند از انحراف‌سنج، نشست‌سنج، تنش‌سنج، پیرومتر و کشیدگی‌سنج که از جمله ابزارهای مهم در کنترل رفتار سد هستند و در بیشتر سدهای خاکی دنیا نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Szostak & Massiera, 2004).

سد خاکی- سنگریزه‌ای HoaBinh در ویتنام در سال ۱۹۹۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفت. ارتفاع سد ۱۲۸ متر، طول تاج آن ۶۰۰ متر و عرض تاج آن ۲۰ متر است. بر پایه نتایج به دست آمده از مشاهدات عینی و محاسبات کامپیوتری حاصل از رفتارنگاری ۳ بعدی، سد HoaBinh تا پایان سال ۲۰۰۵، در شرایط مطلوبی از دید پایداری و ایمنی قرار داشت (Vladimirov et al., 2003).

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 ۲ صورت تنش کلی و مؤثر صورت گرفته است. 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. تحلیل‌های نرم‌افزاری، نشست‌های قائم را به‌صورتی محافظه‌کارانه پیش‌بینی کرده است. ولی با شبیه‌سازی فرایند تحکیم در تجزیه تنش مؤثر انجام شده، نتایج بهبود یافته، به واقعیت نزدیک شده است. به‌طور کلی تغییر مکان‌های ایجاد شده در حد قابل قبولی است و مشکل خاصی را ایجاد نمی‌کند (پلاسی و حاجیانی، ۱۳۷۹).

امروزه سدهای بزرگ اعم از خاکی و بتنی از مهم‌ترین سازه‌های آبی به شمار می‌روند که در تأمین آب مورد نیاز جوامع انسانی نقش اساسی دارند. طبیعت متفاوت و گوناگونی سازه‌های طبیعی در محل ساخت سدهای خاکی از یک سو و رفتار پیچیده مصالح خاکی از سوی دیگر، ارزیابی کمی و کیفی متغیرهای رفتاری خاک را ضروری می‌دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی غلط این گونه متغیرها اغلب از علل مهم به مخاطره افتادن پایداری سدهای خاکی بوده است.

به‌طور کلی پس از خرابی سد تون در دهه ۷۰، که سبب خسارات فراوان شد، رفتارنگاری و ابزاربندی سدهای خاکی به‌صورت وسیع گسترش پیدا کرد (حسنی و همکاران، ۱۳۸۲). نصب ابزار دقیق و رفتارنگاری آنها در دوران ساخت و دوران بهره‌برداری اولیه، کمک شایانی به ارزیابی این متغیرها می‌کند (ASCE Task Committee, 2000). 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. به عبارتی، با رفتارنگاری توسط ابزار دقیق می‌توان هر گونه مشکل احتمالی، که پایداری سدا را تهدید کند، تشخیص داد (Myers & Stalier, 2008). در این پژوهش با ادغام اطلاعات ابزار دقیق نصب شده و تحلیل‌های عددی به بررسی موردی رفتار سد دوستی در انتهای ساخت پرداخته خواهد شد. به دلیل شرایط ویژه‌ای که استفاده از رس سیلتی با نشانه خمیری کم در هسته سد دوستی ایجاد کرده است، ضرورت بررسی رفتار این سد در انتهای ساخت دو چندان به نظر می‌رسد. در این میان تحلیل‌های عددی در بررسی پدیده قوس‌زدگی در هسته سد دوستی با توجه بیشتری صورت گرفته است.

## ۲- مروری بر مطالعات گذشته

موارد زیادی از سدهای خاکی بزرگ دنیا که به منظور پایداری هیدرولیکی

شرکت پیمانکار ساختمانی کولهام تحت نظارت شرکت مهندسی مشاور طوس آب نصب و راه اندازی شده‌اند. نقشه موقعیت مقاطع ابزارگذاری سد در شکل ۳ نشان داده شده است.

بر پایه اطلاعات ارائه شده در جدول ۱، در مجموع ۳۱ ابزار تنش سنج و ۵۱ پیرومتر در بدنه سد نصب شده است. بیشترین تعداد این ابزارها در مقاطع 3A-3A و 4A-4A نصب شده‌اند. در این پژوهش با استفاده از نتایج درستی عملکرد ابزارهای نصب شده در سد دوستی، مقطع 3A-3A به عنوان مقطع بحرانی مشخص و برای تحلیل عددی انتخاب شده است.

نقشه مقطع عرضی 3A-3A و جانمایی ابزار دقیق به کار رفته در این مقطع در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### ۵-۲. روش مدل‌سازی

پژوهش‌ها نشان داده است که تحلیل دو بعدی سدهای خاکی که دارای نسبت طول تاج به ارتفاع بزرگی هستند، تقریب خوبی از واقعیت دارند (بلوری بزار و مینی‌زاد، ۱۳۸۹). نسبت طول به ارتفاع سد دوستی حدوداً ۸ است و در یک دره به نسبت پهن قرار دارد؛ بنابراین می‌توان این سد را با تقریب بالایی مدل کرد. به‌طور کلی در تحلیل و طراحی سدهای خاکی، فرض مدل‌سازی کل سازه در یک مرحله غیر واقعی است. به همین منظور باید از قابلیت ساخت مرحله‌ای بهره جست (مهدوی، ۱۳۸۳). در روشی که توسط زمردیان و صاحب‌زاده (۱۳۸۳) ارائه شده است، تعداد لایه‌های خاکریزی منطقی برای رسیدن به نتایج معقول در مدل‌های کامپیوتری  $H/10 \approx H/9$  ارائه شده که در آن ارتفاع سد از پی است (زمردیان و صاحب‌زاده، ۱۳۸۳).

ساخت یک سد خاکی شامل ریختن و کوبیدن لایه‌های خاکریز (معمولاً به سبب برای ۰/۲ تا ۱ متر) است. وقتی که مراحل ساخت یک سد خاکی، به‌وسیله تحلیل المان‌های محدود مدل‌سازی می‌شود، امکان عملی در نظر گرفتن همه این لایه‌ها وجود ندارد و تعداد محدودی لایه، معمولاً از ۱ تا ۱۰ یا بیشتر منظور می‌شود. لزوم در نظر گرفتن ساخت مرحله‌ای در تحلیل رفتار سدها اولین بار توسط Clough & Woodward (1967) مطرح شد.

برای مدل‌سازی سد، از نرم‌افزار المان محدود (GeoStudio 2007) استفاده شده است. از جمله برتری‌های این نسخه از نرم‌افزار نسبت به نسخه‌های پیشین، قابلیت آنالیزهای همزمان (مدل‌سازی همزمان چند نوع از مدل و مقایسه نتایج در یک فایل)، آنالیزهای مرحله‌ای (اعمال شرایط مرزی متفاوت در مراحل ساخت مدل)، مش‌بندی جدید و ارائه‌ی مدل‌های جدید برای مصالح است (GeoStudio user's manual, 2007). بدنه سد در ۳۸ لایه هر کدام به سبب برای ۲ متر در نظر گرفته شده است، تا شرایط ساخت مرحله‌ای نیز رعایت شده باشد. به همین منظور، شرایط هندسی بر پایه الگوی نقشه مقطع عرضی 3A-3A سد دوستی انجام شده است. در این پژوهش پی سنگی سد با ژرفای ۵۰ متر و طول ۱۰۰ متر مدل شده است. این پی از جنس سنگ مارن است. ژرفای سنگ پی که در تحلیل‌ها انتخاب شده به سختی پی، ژرفای تأثیر تنش‌ها و الزامات تحلیل وابسته است. نتایج، نشان از نشست بسیار کم پی سنگی دارد؛ بنابراین ژرفای انتخابی کفایت دقت‌های مورد نظر را دارد.

پس از ساخت هندسه مدل، با توجه به طبیعت غیرخطی مصالح ژئوتکنیک به ویژه خاک، لازم است مدل رفتاری غیرخطی مناسبی در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از این رو برای مصالح به کار رفته در سد، مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل موهر-کولمب که شناخته شده‌ترین مدل در مصالح خاکی است، انتخاب شده است. متغیرهای مورد نیاز در این مدل عبارتند از: وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع. هندسه مدل تولید شده توسط نرم‌افزار Geostudio در شکل ۵ ارائه شده است.

سد مخزنی شیرین دره از نوع خاکی با هسته رسی قائم است که ارتفاع آن از بستر رودخانه ۶۳ متر و طول تاج آن ۴۸۳ متر، عرض تاج آن ۱۲ متر و حجم کل مخزن آن ۹۱/۵ میلیون متر مکعب است. رفتارنگاری این سد توسط نرم‌افزار Plaxis انجام شده و بررسی‌ها نشان داده که مدل‌سازی نرم‌افزاری سد به خوبی انجام شده است و نشست‌ها و ضرایب فشار حفره‌ای و قوس‌زدگی در انتهای ساخت در محدوده مجاز قرار گرفته‌اند. در این میان، نشست‌های نابرابر مقطع مورد مطالعه، لزوم رفتارنگاری جدی سد را به منظور پیشگیری از رخداد خطرات احتمالی تأیید می‌کند (همتی و برخورداری، ۱۳۸۵).

#### ۳- موقعیت جغرافیایی و راه دسترسی

سد دوستی روی رودخانه هریرود در شمال خاوری ایران روی مرز مشترک ایران و ترکمنستان ساخته شده است. محل سد در حدود ۱۸۰ کیلومتری خاور مشهد و ۷۵ کیلومتری جنوب سرخس و حدود ۴ کیلومتری بالادست پل قدیمی (پل خاتون) قرار گرفته و دارای طول خاوری  $9^{\circ} 50' 61''$  و عرض شمالی  $35^{\circ} 56' 30''$  است. سد دوستی از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته سیلتی-رسی است. ارتفاع سد از پی ۷۸ متر، طول تاج آن ۶۷۰ متر، عرض پاشنه آن ۴۱۶ متر، عرض تاج آن ۱۵ متر و تراز نهایی آن از سطح دریا ۴۷۸ متر است. موقعیت سد و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### ۴- زمین‌شناسی عمومی ساختگاه سد

گستره طرح در جنوب خاوری واحد زمین‌ساختی هزار مسجد کپه‌داغ قرار گرفته است و در واقع به حد خاوری پهنه هزارمسجد-کپه‌داغ یعنی گسل هریرود منتهی می‌شود. شیب لایه‌های سنگی از جنوب به شمال بیشتر شده است. رودخانه در محل سد خاوری-باختری است و تقریباً در امتداد لایه‌ها به سوی باختر جریان دارد.

در محل سد دره به شکل ۷ باز و تقریباً متقارن است. شیب کلی رودخانه حدود ۲/۵ در هزار و ارتفاع بستر جاری آن در محل سد ۴۰۰ متر از سطح دریاست. خط‌القدر رودخانه در این محل مرز میان دو کشور به شمار می‌آید و دیواره راست حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه در سوی ترکمنستان و دیواره چپ حدود ۳۰ درجه در سوی ایران قرار گرفته است. مخزن سد کشیده و کم‌عرض است. بیشتر مخزن شامل سنگ‌های سست شیلی، مارنی و سیلتستونی در سوی ایران و سنگ‌های سخت‌تر و صخره‌ساز ماسه‌سنگی و آهکی در سوی ترکمنستان قرار گرفته است. طول مخزن حدود ۴۵ کیلومتر و عرض آن حدود ۱ کیلومتر است. در شکل ۲ یک نیم‌رخ زمین‌شناسی در امتداد محور سد دوستی نشان داده شده است.

#### ۵- مواد و روش‌ها

##### ۵-۱. سیستم ابزاربندی و مقاطع سد دوستی

بررسی عملکرد سد با استفاده از مشاهدات و داده‌های ابزار دقیق می‌تواند به ارزیابی متغیرها و فرضیات طراحی و کسب اطلاعات به منظور تعیین رفتار و کنترل سد کمک شایانی کند و نیز امکان دریافت هشدارهایی در مورد احتمال مشکل آفرینی در سد و اعلان به موقع برای اقدامات لازم وجود خواهد داشت.

با توجه به گوناگونی عوامل مؤثر بر پایداری سدهای خاکی، سیستم ابزاربندی طراحی شده در سد دوستی شامل ابزارهای مختلف اندازه‌گیری‌های تغییر شکل سطحی و بیرونی بدنه سد، فشار منفذی، تراوش از بدنه سد، فشار کل، فشار برکنش، تراز آب مخزن و رکورد شتاب زمین و ایستگاه هواشناسی است.

در بدنه سد دوستی شش مقطع ابزارگذاری به نام‌های 2، 3A، 4A، 9، 12 و 16 در نظر گرفته شده است. این ابزارها که ساخت شرکت Soil Instrument هستند، توسط

### ۵-۳. آنالیز برگشتی (Back Analysis)

همه ابزارهای نشست سنج نصب شده در مقطع 3A-3A عملکرد قابل قبولی دارند (فلاح قهرودی، ۱۳۹۰).

شکل ۷، نشان‌دهنده نشست قائم ایجاد شده در مقطع 3A-3A توسط نرم‌افزار Geostudio است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، بیشینه نشست قائم در مقطع 3A-3A، به حدود ۹۷ سانتی‌متر رسیده است.

شکل ۸ مقادیر نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار و به دست آمده از تحلیل برگشتی در هسته، در زمانی که خاکریزی سد به پایان رسیده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، تغییر شکل قائم اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق درون هسته به صورت یک منحنی تقریباً سهمی در مقطع تغییر کرده و بیشترین مقدار به دست آمده در مقطع 3A-3A، ۹۲ سانتی‌متر است. از مقدار اندازه‌گیری شده نشست، بخش ناچیزی متعلق به پی و حدود ۲ سانتی‌متر است. بیشترین نشست هسته در پایان ساخت حدود ۱/۲ درصد ارتفاع سد به دست آمده که با توجه به مقادیر نشست‌های متعارف دیگر سدهای دنیا که میان ۰/۵ تا ۲ درصد ارتفاع سد است، بیشترین نشست سد دوستی در محدوده معمول قرار دارد.

آن گونه که در ادامه نیز گفته خواهد شد، نشست متفاوت هسته و پوسته ناشی از تفاوت بودن تراکم‌پذیری مصالح آن‌هاست (Sharma, 1991).

در شکل ۹ چگونگی تغییرات نشست هسته، در تراز ۴۳۰ دیده می‌شود. بر پایه این شکل مقدار نشست در هسته سد با گذشت زمان رو به افزایش است که این رشد، بیشتر ناشی از پدیده تحکیم در مصالح رسی است. لازم به یادآوری است، داده‌های خوانش (قرائت) شده ابزار در این نمودار بازتابی از شرایط زمان خاکریزی است و مقادیر واقعی آنها به مرور زمان و پس از سپری شدن اندرکنش‌های تنشی - کرنشی توده خاک حاصل خواهد شد که در پایان به یک مقدار تثبیت شده خواهد رسید. از سوی دیگر تحلیل‌های برگشتی شرایط ایده‌آل و به عبارتی پایانی را مدل می‌کنند، بنابراین طبیعی است به مرور از اختلاف میان مقادیر خوانش شده و تحلیل‌های برگشتی کاسته و به یکدیگر همگرا شوند.

### ۶-۲. نشست در پوسته

نشست پوسته به روش ساخت و ویژگی‌های مصالح بستگی دارد و عوامل مؤثر بر آن عبارتند از: ستبرای لایه، روش تراکم، میزان رطوبت و متغیرهای مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری مصالح. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های نشست قائم در پوسته پایین‌دست و پوسته بالادست در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مقادیر بیشینه نشست پوسته‌های بالادست و پایین‌دست، بر پایه اندازه‌گیری‌های انجام شده به ترتیب حدود ۵۵ و ۱۸ سانتی‌متر بوده است. مقدار بیشینه نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق در انتهای ساخت، در INC3A-1 و INC3A-3 به ترتیب برابر با ۵۸ و ۲۵ سانتی‌متر بوده است. بر این اساس، آنالیز برگشتی، تطابق رفتاری خوبی با روند واقعی نشست اندازه‌گیری شده در پوسته نشان می‌دهد.

با مقایسه نمودارهای نشست در هسته (شکل ۸) و پوسته بالادست (شکل ۱۱) دیده می‌شود که مقدار نشست در پوسته بالادست کمتر از مقدار نشست در هسته است که دلیل آن تغییرشکل‌پذیری کمتر مصالح درشت‌دانه پوسته نسبت به مصالح هسته رسی - سیلتی است.

### ۶-۳. بررسی تنش در بدنه سد

وضعیت تنش در بدنه سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین متغیرهای مورد بررسی برای ارزیابی ایمنی سد است. آنالیز و بررسی رفتار سدهای خاکی مستلزم توجه به شرایط تنش ایجاد شده در هنگام ساخت و رابطه تنش - کرنش مصالح است. در سدهای خاکی منطقه‌بندی شده (غیرهمگن)، اعمال شرایط تنش کل و مؤثر و همچنین اندرکنش میان مناطق مختلف در آنالیزهای عددی اهمیت خاصی دارد

پس از ساخت هندسه مدل و وارد کردن متغیرهای اولیه مصالح، تحلیل اولیه قابل انجام است و پس از آن تحلیل‌های برگشتی انجام می‌شود. هدف اصلی از انجام آنالیزهای برگشتی، رسیدن به متغیرهای واقعی مصالح ساختمانی مصرفی در زمان ساخت است. بنابراین با توجه به رفتار واقعی سد که از اطلاعات ابزار دقیق به دست آمده است، لازم است متغیرهای ورودی تغییر داده شوند تا جایی که رفتار واقعی سد، در مدل هم ایجاد شود. گفتنی است که این کار بسیار حساس و پیچیده است. زیرا تقریباً همه متغیرها به نوعی بر یکدیگر تأثیر دارند؛ با تغییر یکی، بقیه متغیرها نیز تغییر می‌کنند (فریور و همکاران، ۱۳۸۹).

آنالیز برگشتی روشی مؤثر در بررسی و تأیید متغیرهای خاک و نتایج حاصل در ارزیابی ایمنی سازه بسیار مفید است (Yuzhen et al., 2007). (Yufeng & Chi (2015). با بررسی روی مصالح سد خاکی - سنگریزه‌ای Malutang II به این نتیجه رسیدند که مدول‌های تغییر شکل به شدت تحت تأثیر شرایط ساخت قرار دارند و در آنالیز برگشتی باید این تغییرات مد نظر قرار گیرد.

نتایج آنالیزهای پژوهش صورت گرفته، نشان‌دهنده تطبیق مناسب متغیرهای اولیه در نواحی فیلتر، زهکش و پوسته است. در حالی که برای تطبیق نتایج اولیه هسته با نتایج ابزار دقیق تغییرات زیادی در متغیرها اعمال شد. جدول ۲ شامل متغیرهای مدل اولیه و جدول ۳ نشان‌دهنده متغیرهای پایانی است.

### ۶-۴. بررسی تغییر شکل‌های بدنه سد

تغییر مکان قائم یا نشست (Settlement) سدهای خاکی به دو مؤلفه نشست در دوران ساخت و پس از آن تقسیم می‌شود. نشست در طول ساخت، در واقع ناشی از بارگذاری تدریجی روی لایه‌های زیرین خاک توسط لایه‌های جدید است که به‌طور متوالی ساخته می‌شوند. بدین ترتیب در هر مرحله از خاکریزی، لایه‌های زیرین اجازه نشست پیدا می‌کنند و نشست بیشینه تقریباً در تراز میانی سد جای می‌گیرد. شایان یادآوری است که نشست حاصل در هسته بیشتر به دلیل استهلاک فشار آب حفره‌ای و تحکیم مصالح است. پس از ساخت سد نیز نشست‌ها ادامه پیدا می‌کنند، ولی مقدار آن با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

سد دوستی یک سد غیرهمگن خاکی با هسته سیلتی - رسی است که شامل منطقه‌های هسته، فیلتر، زهکش و پوسته است. به دلیل تفاوت در خواص مصالح و نامساوی بودن تغییر شکل‌پذیری این مصالح و همچنین عدم اجرای یکنواخت خاکریز به دلیل محدودیت‌های اجرایی، روند نشست ناهمگون قابل انتظار است.

در سد دوستی برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های داخلی از ۱۵ عدد نشست‌سنج مغناطیسی کار گذاشته شده در ۶ مقطع بدنه سد استفاده شده است. در مقطع 3A-3A سه عدد نشست‌سنج به نام‌های INC3A-1، INC3A-2 و INC3A-3 به ترتیب، درون پوسته بالادست در فاصله حدود ۲۵ متری از محور سد، روی محور در ناحیه هسته و در پوسته پایین دست و در فاصله ۷۵/۵ متری از محور سد نصب شده‌اند.

در سدهای خاکی بیشترین مقدار نشست بیشتر در هنگام عملیات ساختمانی و پیش از آنگیری رخ می‌دهد. زیرا در این زمان نشست تراکمی و تحکیمی ناشی از وزن لایه‌های بالایی خاکریز چیره است.

### ۶-۱. نشست در هسته

نشست هنگام ساخت در هسته متأثر از عوامل زیر است:

- وزن خاکریز و سرعت خاکریزی.
  - خواص و نوع خاک.
  - درصد رطوبت، روش تراکم و هندسه هسته.
- در شکل ۶ درستی (صحت) ابزار استفاده شده در سد دوستی نشان می‌دهد که

$$Ar = \frac{Pv}{\gamma \times h} \quad (1)$$

که در آن  $Pv$  مقدار تنش کل قائم اندازه‌گیری شده توسط سلول فشار سنج،  $\gamma$  وزن واحد حجم و  $h$  ارتفاع خاکریز است. میزان قوس‌زدگی در هسته رابطه عکس با نسبت قوس‌زدگی دارد. در واقع هر چه این نسبت بیشتر باشد، میزان قوس‌زدگی کمتر خواهد بود. همان‌گونه که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، کمترین میزان ضریب قوس‌زدگی (بیشترین مقدار قوس‌زدگی)، حاصل از تحلیل عددی در مقطع 3A-3A، در حدود ۰/۶۰۵ است که تقریباً در وسط ارتفاع سد از کف (تراز ۴۳۵) رخ داده است. بیشترین مقدار قوس‌زدگی نیز ۰/۹۴ است که در تاج سد رخ می‌دهد. همان‌گونه که در منحنی دیده می‌شود، تغییرات نسبت قوس‌زدگی پس از افزایش ارتفاع خاکریزی، روندی کاهشی نشان می‌دهد. با توجه به کانتورهای جابه‌جایی قائم که بیشینه جابه‌جایی قائم (نشست) را در تراز ۴۳۰ نشان می‌دهند، به خوبی ارتباط ضریب قوس‌زدگی و نشست در هسته مشخص می‌شود و گویای افزایش شدت قوس‌زدگی با افزایش نشست در هسته است. در ارتفاع‌های بالاتر مقادیر ضریب قوس‌زدگی با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش نشست هسته در نقاط با ارتفاع بالاتر است.

ضریب قوس‌زدگی در هسته سد دوستی میان ۰/۶۰۵ تا ۰/۹۴ تغییر می‌کند. این مقدار در سدهای بزرگی مانند سد تهم با ارتفاع ۱۲۳ متر، برابر با ۰/۲ تا ۰/۸۸ (کریمی، ۱۳۸۵) و در سد کرخه با ارتفاع ۱۳۰ متر، ۰/۴۵ تا ۱ (Motamedi & Mir Mohammad Hosseini, 2008) گزارش شده است. از این رو سد دوستی در پایان ساخت در شرایط خوبی قرار گرفته است. تغییرات تنش در انتقال از محدوده فیلترها به هسته رسی نیز در شکل ۱۳ قابل توجه است که نشان می‌دهد قوس‌زدگی در فیلترها نیز رخ داده است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار سد دوستی در پایان ساخت، به کمک اطلاعات به دست آمده از ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از اهداف این پژوهش رسیدن به متغیرهای واقعی مصالح به کار رفته در بدنه سد است که این امر به وسیله آنالیز برگشتی محقق شد. نتایج نشست‌سنج در هر ۳ ابزار، تطابق قابل قبول و منطقی با نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد. به گونه‌ای که در تحلیل، بیشترین نشست در هسته، پوسته بالادست و پوسته پایین‌دست به ترتیب برابر با ۸۵ و ۵۵ سانتی‌متر است و مقدار نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق اعداد ۹۲، ۵۸ و ۲۵ را برای نشست در هسته، پوسته بالادست و پوسته پایین‌دست نشان می‌دهد. تحلیل تنش در هسته سد، بیانگر همخوانی خوب میان نتایج ابزار دقیق و مدل‌سازی است. تنش کل حاصل از خوانش ابزار در مقایسه با مقدار محاسبه شده از آنالیز برگشتی مقدار کمتری را نشان می‌دهد. عموماً برای محاسبه تنش اصلی افزون بر دو صفحه عمود بر هم، به یک صفحه زاویه‌دار (۴۵ درجه) نیاز است؛ در حالی که در سد دوستی کلاسترهای نصب شده به گونه‌ای قرار دارند که تنها می‌توان تنش‌های افقی و قائم را اندازه‌گیری کرد.

همان‌گونه که انتظار می‌رود، به دلیل تفاوت سختی مصالح هسته با فیلتر و پوسته، قوس‌زدگی میان هسته و فیلتر و فیلتر و پوسته دیده می‌شود. افزون بر این، میزان قوس‌زدگی در ترازهای بالاتر به علت درصد رطوبت کمتر و عرض کم هسته، بیشتر است.

از میزان نشست کل، بیشتر آن مربوط به بدنه و بخش ناچیزی متعلق به پی است. بیشترین نشست هسته در پایان ساخت حدود ۱/۲ درصد ارتفاع سد به دست آمده که با توجه به مقادیر نشست‌های متعارف دیگر سدهای دنیا که میان ۰/۵ تا ۲ درصد ارتفاع سد است، بیشترین نشست سد دوستی در محدوده معمول است و بنابراین سد در وضعیت پایدار قرار دارد.

(Hunter & Fell, 2003). در این‌گونه سدها، تحلیل وضعیت تنش‌ها، به دلیل تغییرشکل‌پذیری متفاوت هسته و پوسته، اهمیت بیشتری دارد. افزون بر این، به دلیل نشست کمتر پوسته در مقایسه با هسته، بخش‌هایی از هسته به صورت معلق به پوسته آویزان می‌شود و تنش حاصل از لایه‌های خاکریز به‌طور کامل به بخش پایین‌تر و پی منتقل نخواهد شد. نتیجه چنین فرایندی پدیده قوس‌زدگی (Arching) است، که طی آن تنش‌ها در بخش‌های درونی هسته کاهش می‌یابد و شرایط برای تغییر شکل‌های شکننده فراهم می‌شود.

به منظور کنترل توزیع، اندازه و سوی تنش کل و نیز بررسی پدیده قوس‌زدگی در سد دوستی از ابزار سلول فشار کل، نوع تار مرتعش استفاده شده است. در مقطع مورد بررسی ۱۴ عدد سلول تنش کل در دو تراز ۴۰۰ و ۴۱۶ برای بررسی وضعیت تنش کل سد نصب شده‌اند. در شکل ۱۲ وضعیت درستی تنش‌سنج‌های سد دوستی نشان داده شده است. به‌طور معمول فشار کل با افزایش سربار ناشی از خاکریزی افزوده می‌شود و غالباً فشار افقی در دو سوی عمود و راستای محور سد تقریباً برابر و فشار قائم کل بیشتر از فشار افقی است.

کلاستر تنش‌سنجی نصب شده در سد دوستی به شکلی است که نمی‌توان تنش اصلی را در آنها به دست آورد. برای محاسبه تنش‌های اصلی غیر از دو صفحه عمود بر هم، که معمولاً در سدها نصب می‌شود، به یک صفحه زاویه‌دار (معمولاً ۴۵ درجه) نیز احتیاج است. ولی در این سد تنش‌ها به صورت افقی و قائم اندازه‌گیری می‌شود و هیچ صفحه‌ای به شکل زاویه‌دار نصب نشده است. از این رو در این پژوهش TPC3A-2 مورد بررسی قرار گرفته است. موقعیت قرارگیری تنش‌سنج TPC3A-2 در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۱۳ توزیع تنش بارهای قائم کل در پایان ساخت در مقطع دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، مقدار تنش‌های قائم در هسته سد نسبت به پوسته کاهش می‌یابد که علت آن کمتر بودن سختی مصالح هسته نسبت به پوسته است. مقدار بیشینه تنش قائم کل حاصل از تحلیل در هسته در این مقطع، در حدود ۱۰۳۰ کیلوپاسکال است. همچنین به خوبی می‌توان اثر قوس‌زدگی را در هسته دید.

سدهای غیرهمگن به علت تفاوت در شرایط تنش ایجاد شده در هسته و خاکریز، در آنالیز عددی شرایط پیچیده‌تری دارند. بیشترین مقدار تنش قائم در مقطع در پایان ساخت، در ترازهای پایین و در محل اتصال هسته به پی است. شکل ۱۴ مربوط به مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل تنش‌سنج‌ها در تراز ۴۱۶ است. همان‌گونه که دیده می‌شود، انطباق خوبی میان مقادیر اندازه‌گیری شده و تحلیل نرم‌افزاری وجود دارد.

## ۶-۴. بررسی قوس‌زدگی در بدنه سد

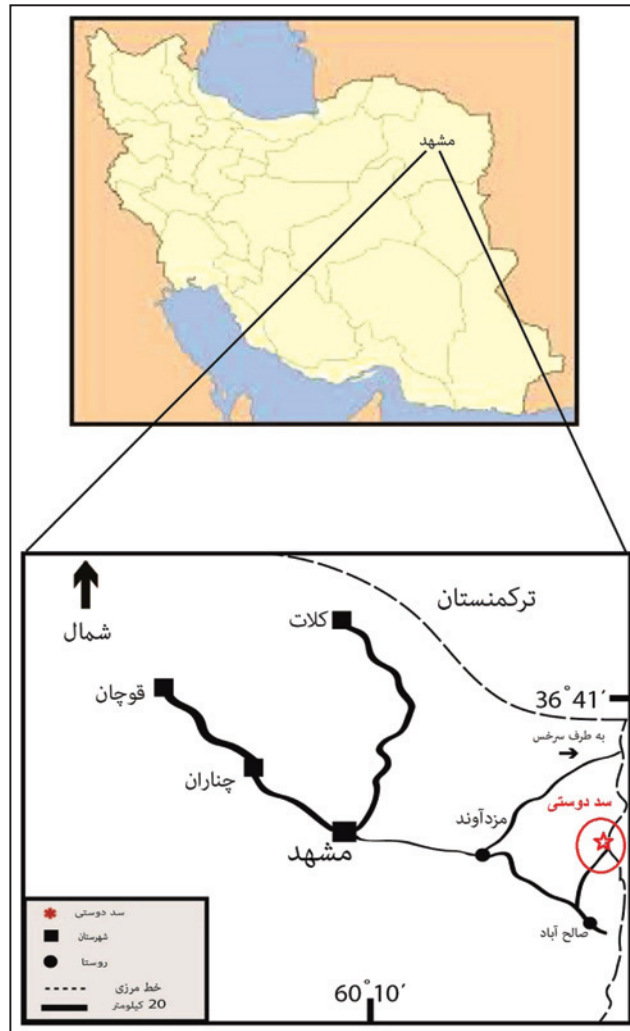
برای اولین بار وجود و اهمیت پدیده قوس‌زدگی و یا انتقال تنش در سدهای سنگریزه‌ای توسط لافکویست در سال ۱۹۵۱ گزارش شد (Ohne & Narita, 1977). یکی از مسائل مشکل‌ساز در سدهای خاکی غیرهمگن پدیده قوس‌زدگی در هسته است که باید در مراحل اولیه طراحی مورد بررسی قرار گیرد. در سدهای خاکی غیرهمگن، نشست هسته معمولاً بیش از نشست پوسته است. این مسئله به دلیل تفاوت میان ویژگی‌های مصالح در هسته و پوسته رخ می‌دهد. با توجه به این مسئله، هسته در هنگام نشست به پوسته فشار اعمال و پوسته در حکم تکیه‌گاهی برای هسته رفتار می‌کند. در نتیجه مقداری از تنش هسته به پوسته منتقل می‌شود و از تنش موجود در هسته کاسته می‌شود.

به منظور تعیین میزان قوس‌زدگی در هسته از ضریبی به نام نسبت قوس‌زدگی (Ar) استفاده می‌شود. این ضریب عبارت است از نسبت تنش قائم اندازه‌گیری شده توسط ابزار سلول فشار کل در یک نقطه از هسته به وزن ستون خاک در همان نقطه:

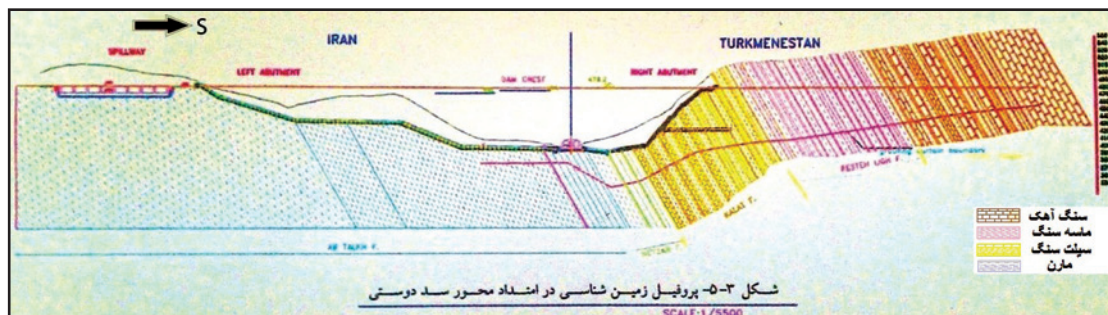


۰/۸۸ و در سد کرخه با ارتفاع ۱۳۰ متر، ۰/۴۵ تا ۱ گزارش شده است، از این رو سد دوستی در پایان ساخت در شرایط خوبی قرار گرفته است.

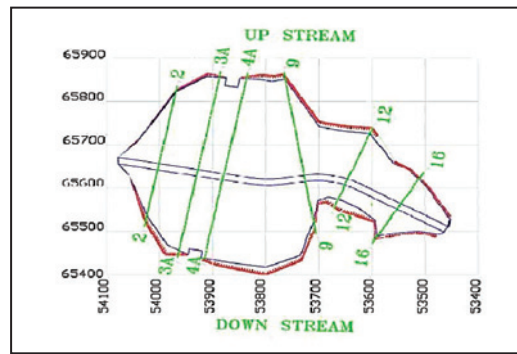
ضریب قوس زدگی در هسته سد میان ۰/۶۰۵ تا ۰/۹۴ متغیر است و با توجه به اینکه این دامنه تغییرات در سدهای بزرگی مانند سد تهم با ارتفاع ۱۲۳ متر، برابر با ۰/۲ تا



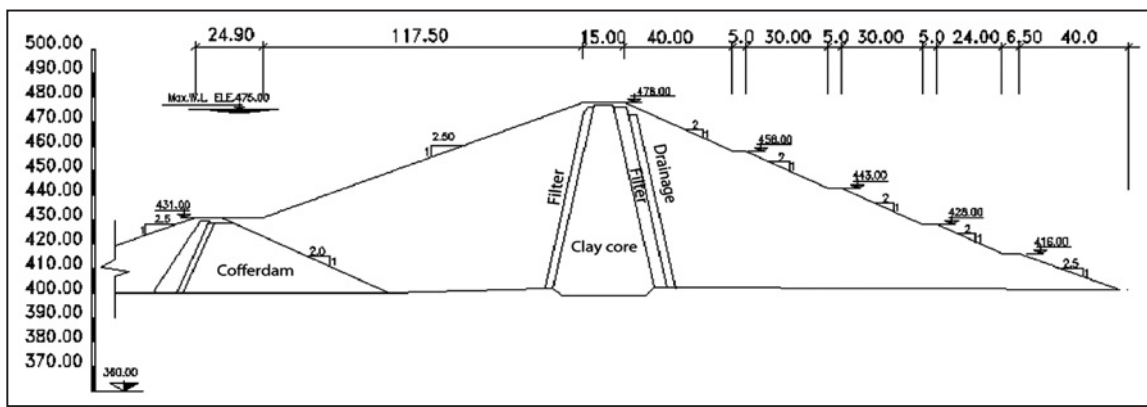
شکل ۱- موقعیت سد و راه‌های دسترسی به آن.



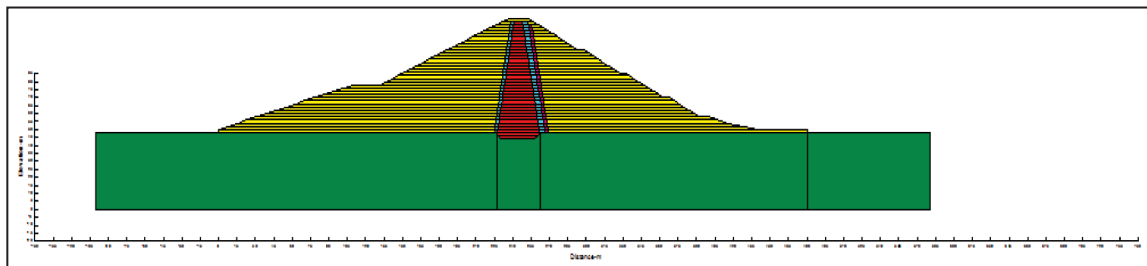
شکل ۲- نیمرخ زمین‌شناسی در امتداد سد دوستی (بر گرفته از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان (۱۳۷۹)).



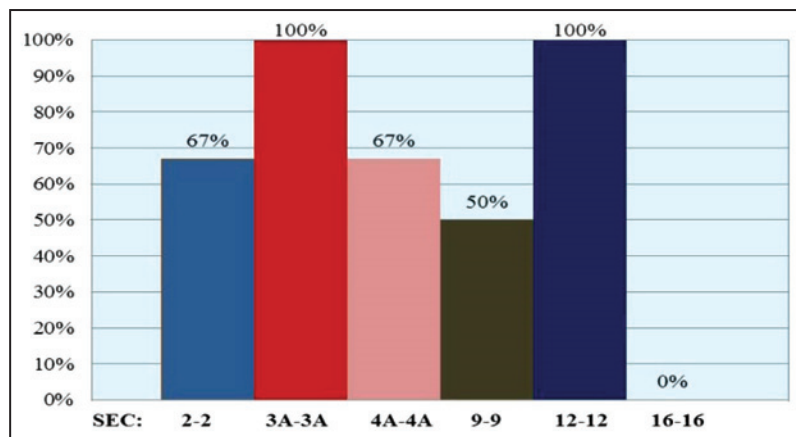
شکل ۳- سیستم ابزاربندی سد دوستی و وضعیت کلی ابزارهای نصب شده.



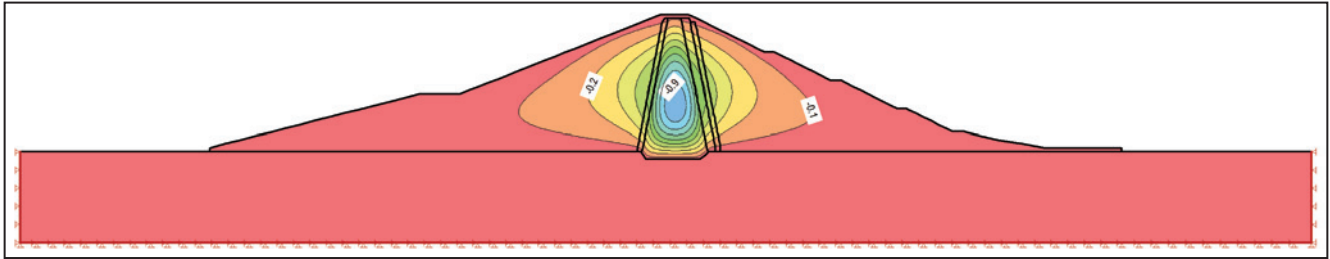
شکل ۴- مقطع عرضی 3A-3A سد دوستی.



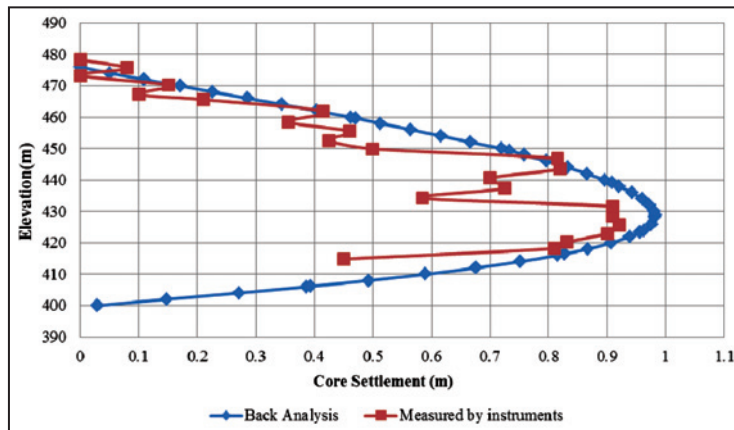
شکل ۵- شبکه المان محدود ایجاد شده برای مقطع عرضی 3A-3A سد دوستی.



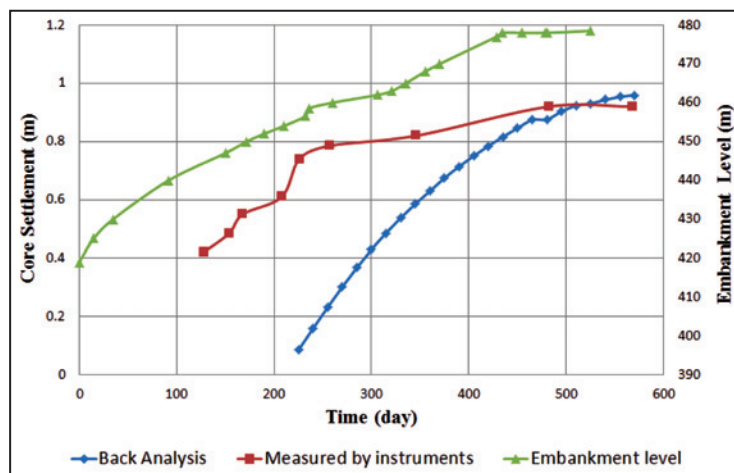
شکل ۶- درصد نتایج قابل قبول نشست سنجه‌ها در مقاطع مختلف سد دوستی (فلاح قهرودی، ۱۳۹۰).



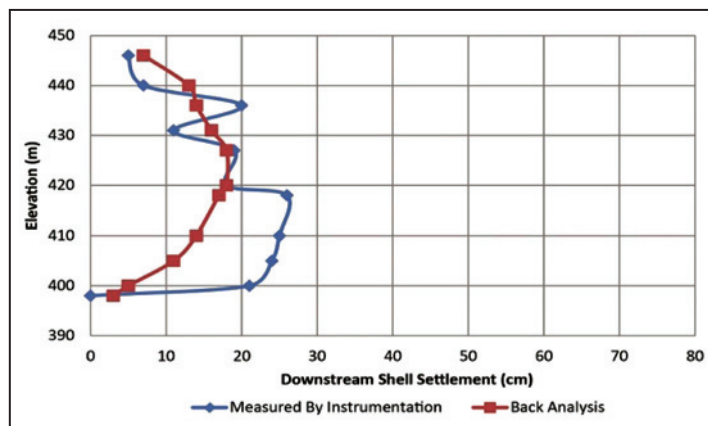
شکل ۷- توزیع نشست در پایان ساخت.



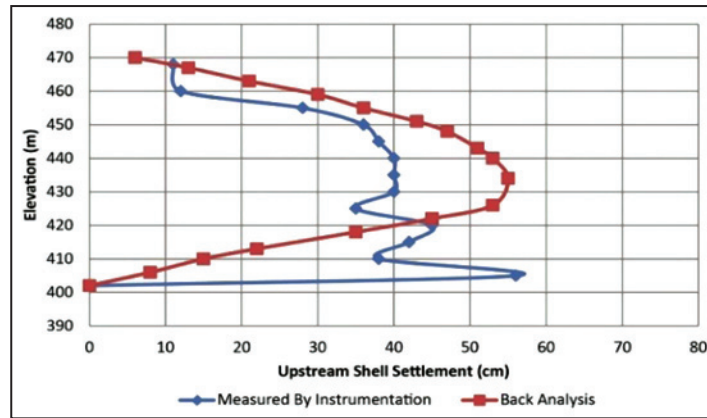
شکل ۸- تغییرات نشست هسته در پایان ساخت و مقایسه نتایج تحلیل عددی و ابزار INC3A-2.



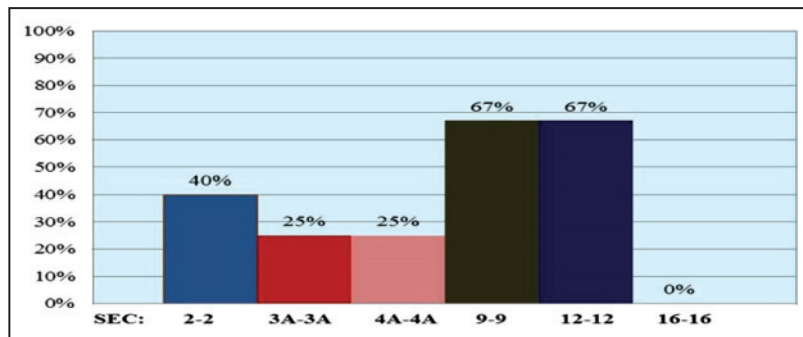
شکل ۹- نتایج نشست به دست آمده از تحلیل و ابزار دقیق در تراز ۴۳۰.



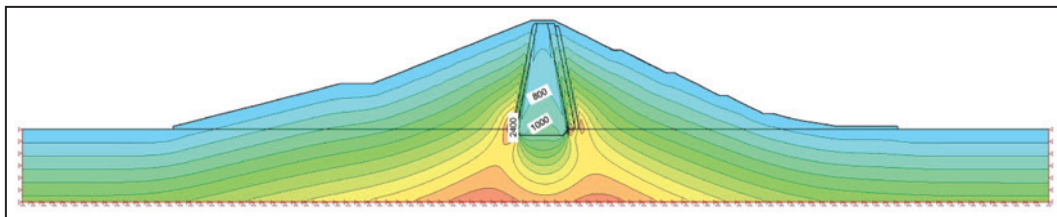
شکل ۱۰- تغییرات نشست در پایان ساخت و مقایسه نتایج تحلیل عددی و ابزار INC3A-3.



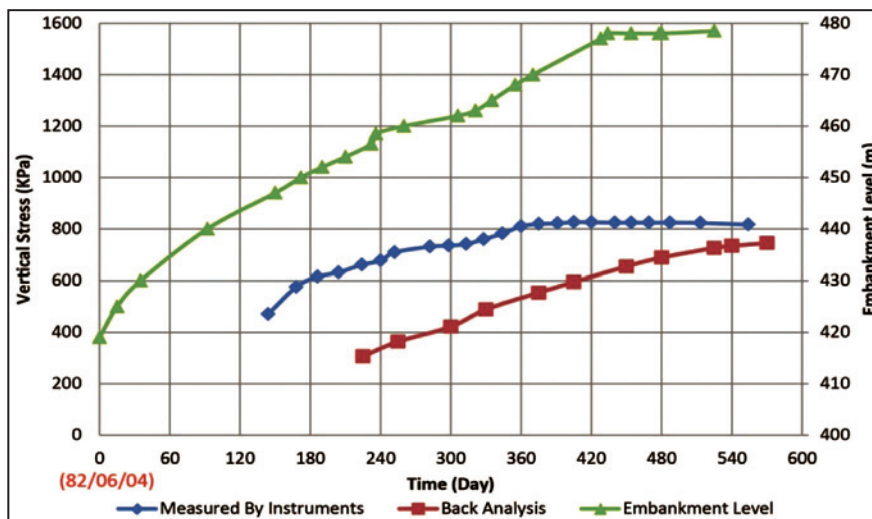
شکل ۱۱- تغییرات نشست در پایان ساخت و مقایسه نتایج تحلیل عددی و ابزار INC3A-1.



شکل ۱۲- درصد نتایج قابل قبول تنش سنج‌ها در مقاطع مختلف سد دوستی (فلاح قهرودی، ۱۳۹۰).

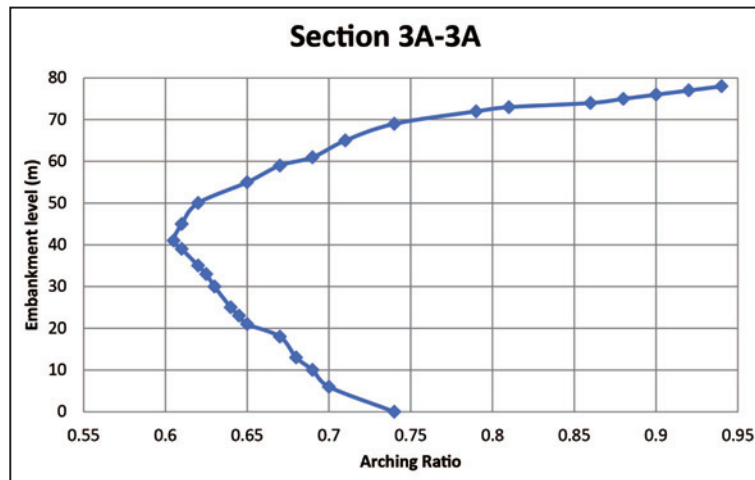


شکل ۱۳- توزیع تنش‌های قائم کل در پایان ساخت.



شکل ۱۴- نتایج تنش قائم به دست آمده از تحلیل و ابزار دقیق در تراز ۴۱۶.





شکل ۱۵- منحنی تغییرات نسبت قوس زدگی در ارتفاع محور هسته (مقطع 3A-3A).

جدول ۱- وضعیت کلی ابزارهای نصب شده در سد دوستی.

نام مقطع	تراز کف (m)	تراز تاج (m)	ارتفاع (m)	تعداد ابزار تشش سنج	تعداد ابزار پیزومتر	تعداد ابزار تشش سنج
2-2	۴۰۷	۴۷۸	۷۱	۵	۹	۳
3A-3A	۴۰۲	۴۷۸	۷۶	۸	۱۳	۳
4A-4A	۴۰۰	۴۷۸	۷۸	۸	۱۳	۳
9-9	۴۰۰	۴۷۸	۷۸	۳	۵	۲
12-12	۴۲۵	۴۷۸	۵۳	۳	۵	۲
16-16	۴۴۰	۴۷۸	۳۸	۴	۶	۲
جمع کل						
				۳۱	۵۱	۱۵

جدول ۲- ویژگی‌های مصالح به کار رفته در مدل اولیه سد دوستی.

متغیرهای مصالح	وزن مخصوص مرطوب (kN/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص اشباع (kN/m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (kPa)	مدول الاستیسیته (kPa)	ضریب پواسون	زاویه اتساع	نفوذپذیری (cm/s)
هسته	۲۱	۲۱/۵	۲۸/۵	۲۰۰	۱۷۰۰۰	۰/۲	۰	$2/5 \times 10^{-6}$
پوسته	۲۲	۲۳	۳۶/۴	۰	۹۰۰۰۰	۰/۲	۶	$4 \times 10^{-3}$
فیلتر	۲۱	۲۲	۳۵	۰	۵۰۰۰۰	۰/۲	۵	$10^{-4}$
زهکش	۲۱	۲۲	۳۵	۰	۵۰۰۰۰	۰/۲	۵	$10^{-4}$
پی	۲۲/۶	۲۶	۳۵	۲۰۰	۱۶۰۰۰۰	۰/۲۷	۰	$10^{-6}$

جدول ۳- ویژگی‌های مصالح به کار رفته در مدل پایانی سد دوستی (به دست آمده از تحلیل‌های برگشتی).

متغیرهای مصالح	وزن مخصوص مرطوب (kN/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص اشباع (kN/m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (kPa)	مدول الاستیسیته (kPa)	ضریب پواسون	زاویه اتساع	نفوذپذیری (cm/s)
هسته	۲۱	۲۳/۵	۳۰	۱۰۰	۲۲۰۰۰	۰/۲	۰	$2/5 \times 10^{-6}$
پوسته	۲۲	۲۳	۳۶/۴	۰	۹۰۰۰۰	۰/۲	۶	$4 \times 10^{-3}$
فیلتر	۲۱/۴	۲۳	۴۰	۰	۵۰۰۰۰	۰/۲	۵	$10^{-4}$
زهکش	۲۱/۴	۲۳	۴۰	۰	۵۰۰۰۰	۰/۲	۵	$10^{-4}$
پی	۲۲/۶	۲۶	۳۵	۲۰۰	۱۶۰۰۰۰	۰/۲۷	۰	$10^{-6}$

## کتابنگاری

- بلوری بزاز، ج. و مبینی‌زاد، م.، ۱۳۸۹- ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق، مجله پژوهش آب ایران، سال چهارم، شماره ششم، بهار و تابستان ۱۳۸۹، صص. ۱ تا ۱۰.
- پلاسی، م. و حاجیانی، ح.، ۱۳۷۹- مطالعه حرکات درونی سد مارون با استفاده از اطلاعات ابزار دقیق، چهارمین کنفرانس سد سازی ایران، تهران، ایران، ۱۱ تا ۱۲ آذر. حسنی، ن.، راستی اردکانی، ر. و زین‌رام، ف.، ۱۳۸۲- کنترل پایداری سدهای بتنی، انتشارات صنعت آب و برق.
- زمردیان، م. و صاحب‌زاده، ک.، ۱۳۸۳- بررسی تعریف تعداد مراحل ساخت سدهای خاکی و سنگریزه‌ای برای انجام آنالیز تحکیمی در مدل‌های کامپیوتری، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، ۲۲ تا ۲۴ اردیبهشت.
- شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان، ۱۳۷۹- طرح مشترک هریرود، مطالعات مرحله دوم سد مخزنی دوستی.
- فریور، ع.، میرقاسمی، ع. ا. و مهین‌روستا، ر.، ۱۳۸۹- بررسی رفتار سد تبارک‌آباد در دوران ساخت با استفاده از تحلیل‌های برگشتی، نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دوره ۴۴، شماره ۳، صص. ۴۰۷ تا ۴۱۲.
- فلاح قهرودی، ع.، ۱۳۹۰- بررسی عملکرد ابزارگذاری مورد استفاده در محیط‌های آبی- خاکی مطالعه موردی سد دوستی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- کریمی، ف.، ۱۳۸۵- مطالعه رفتار سدهای خاکی با استفاده از نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی برگشتی- مطالعه موردی سد تهم، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مهدوی، ع.، ۱۳۸۳- تحلیل پایداری پی و بدنه سد شهید یعقوبی، مجموعه مقالات دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۱۶ تا ۲۴ آذر، صص. ۳۵۹ تا ۳۶۸.
- همتی، ا. و برخورداری، ک.، ۱۳۸۵- رفتار سنجی سد شیرین دره در انتهای ساخت به کمک قرائت‌های ابزار دقیق، سیزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، کرمان، ایران، ۲۱ تا ۲۴ اسفند.

## References

- Alba, M., Fregonese, L., Prandi, F., Scaioni, M. & Valgoi, P., 2006- Structural monitoring of a large dam by terrestrial LASER scanning, In: Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'. Dresden, Germany 25-27 September 2006.
- ASCE Task Committee, 2000- Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance.
- Beheshti, A., Kamanbedast, A. & Akbari, A., 2013- Seepage Analysis of Rock-Fill Dam Subjected to Water Level Fluctuation: A case study on Gotvand-Olya Dam, Iranica Journal of Energy & Environment. Vol. 4, pp.155- 160.
- Clough, R. W. & Woodward, R. J., 1967- Analysis of Embankment Stresses and Deformations, Journal of Soil Mechanics and Found. Div., ASCE, Vol.93, pp. 529-549.
- Emre, K. M., Bayraktar, A. & Basaga, H. B., 2012- Nonlinear finite element reliability analysis of Concrete-Faced Rockfill (CFR) dams under static effects, Journal of Applied Mathematical Modelling. Vol 36, pp.5229- 5248.
- GeoStudio user's manual., version 2007.
- Hunter, G. & Fell, R., 2003- Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, PP. 909-917.
- Motamedi, M. & Mir Mohammad Hosseini, S. M., 2008- Arching Ratio of Mixed-Clay Core in Embankment Dams, Case Study: Karkheh Dam, Iran, International Commission ON Large Dams, 76th Annual Meeting, Sofia , Bulgaria, June 2-6.
- Myers, B. & Stalier, J., 2008- Why include instrumentation in dam monitoring programs? United States Society on Dams, Committee on Monitoring of Dams and their Foundations.
- Ohne, Y. & Narita, K., 1977- Discussion on cracking and hydraulic fracturing in filltype dams, Special session 8, 9th ICSMFE.
- Rakhshandehroo, G. & Bagherieh, A., 2006- Three Dimensional Analysis of Seepage in 15-Khordad Dam after Impoundment, Iranian Journal of Science & Technology. Vol. 30, pp. 55-68.
- Sharma, H. D., 1991- Embankment Dams, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd
- Szostak, A. & Massiera, M., 2004- Modeling of Deformations during Construction of a Large Earth Dam in the La Grande Complex, Canada, Technical Science, pp.7-13.
- Tomas, R., Cano, M., Garcia-Barba, J., Vicente, F., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J. M. & Mallorqu, J. J., 2013- Monitoring an earthfill dam using Differential SAR Interferometry: LaPedrera dam, Alicante, Spain, Journal of Engineering Geology. Vol.157, pp. 21-32.
- Vladimiror, V. B., Zaretskii, Yu. K. & Orekhov, V. B., 2003- A Mathematical Model For Monitoring The Rock-Earthen Dam of The HOABINH Hydraulic Power Systems, Power Technology and Engineering. Vol. 37, pp. 161-166
- Yeh, G. G., Kim, T. H., Kim, J. H. & Kim, H. Y., 2013- Rehabilitation of the Core Zone of an Earth-Fill Dam, Journal of Performance of Constructed Facilities. Vol.27, pp.485-495.
- Yong-Seong, K. & Byung-Tak, K., 2008- Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model, Journal of Computers and Geotechnics. v 35. P 313-322.
- Yufeng, J. & Chi, Sh., 2015- Back-analysis of soil parameters of the Malutang II concrete face rockfill dam using parallel mutation particle swarm optimization, Computers and Geotechnics. Vol. 65. Pp. 87-96.
- Yuzhen, Yu., Bingyin, Zh. & Huina, Y., 2007- An intelligent displacement back-analysis method for earth-rockfill dams, Journal of Computers and Geotechnics, Vol. 34. pp. 423-434.

## Doosti dam monitoring until the end of construction using instrumentation data and numerical analyses

H. Asadian <sup>1\*</sup>, E. Rahimi <sup>2</sup>, M. Ghafoori <sup>3</sup> & M. Bashirgonbadi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Damghan University, Damghan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Damghan University, Damghan, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 2014 October 28

Accepted: 2015 August 16

### Abstract

Recently the instrumentation of dams has gained a special place in Iran. In large-scale projects, such as earthen and concrete dams, instrumentation installation and monitoring, especially during the construction and operation, is an integral and essential component. Dam stability is one of the most important issues related to geotechnical engineering. Therefore, considering the uncertainty of geotechnical parameters, risk analyses are inevitable in dam projects. This study has first examined the accuracy of the instrumentation installed in the dam, then dealt with the quantification of the maximum settlement, vertical stress in the core, and arching phenomenon based on the results of numerical analysis and instrumentation. For numerical analyses, the GeoStudio 7.1 Software was used. In addition to simultaneous analyses, this software is also capable of analyzing the stage construction and two-dimensional consolidation. Behavioral models used in the analysis consist of linear-elastic and elastic-perfectly plastic Mohr-Coulomb models. A comparison between modeling and concise instrument results suggests that the doostidam is in a stable and safety condition.

**Keywords:** Monitoring, Doosti Dam, Numerical Analysis, Instrumentation, Settlement.

For Persian Version see pages 213 to 222

\*Corresponding author: H. Asadian; E-mail: Asadian.hmd@gmail.com