

## مطالعه رفتار سد مارون در مرحله دوم آبیگری به کمک اطلاعات کسب شده از ابزار دقیق

مسعود پلاسی<sup>۱\*</sup>، بهنام صالحی<sup>۲</sup> و علی اصغر میرقاسمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران  
<sup>۲</sup> کارشناس ارشد شرکت مهندسی مشاور فرازآب

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران  
(تاریخ دریافت ۸۵/۶/۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۹/۱۴، تاریخ تصویب ۸۹/۱۲/۱۰)

### چکیده

سد مارون یکی از مرتفع ترین سدهای کشور می باشد. این سد در شهر بهبهان، واقع در استان خوزستان ساخته شده و به دلیل اهمیت بالای این سد، سیستم ابزار دقیق نسبتاً جامعی در آن تعبیه شده است. در این سد از سلول های فشار کل جهت مطالعه تنش، از پیژومترها جهت بررسی فشار آب حفره ای، از انحراف سنج ها جهت کنترل تغییر شکل های سد و ابزار مختلف دیگری جهت مطالعه رفتار کلی سد استفاده شده است. در این مقاله مدلی سه بعدی از سد به کمک برنامه Flac3D که از روش تفاضل محدود در تحلیل ها استفاده می کند، ارائه گشته است. سپس این مدل با توجه به پارامترهای اولیه مصالح به کار رفته در سد تحلیل گشته و نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج کسب شده از ابزار نصب شده در سد مارون مقایسه شده است و به کمک این مقایسه تحلیل برگشتی انجام شده و پارامترهای واقعی مصالح به کار رفته در مناطق مختلف سد تخمین زده شده است.

**واژه های کلیدی:** سد مارون، رفتارنگاری، ابزار دقیق، روش تفاضل محدود، تحلیل برگشتی، Flac3D

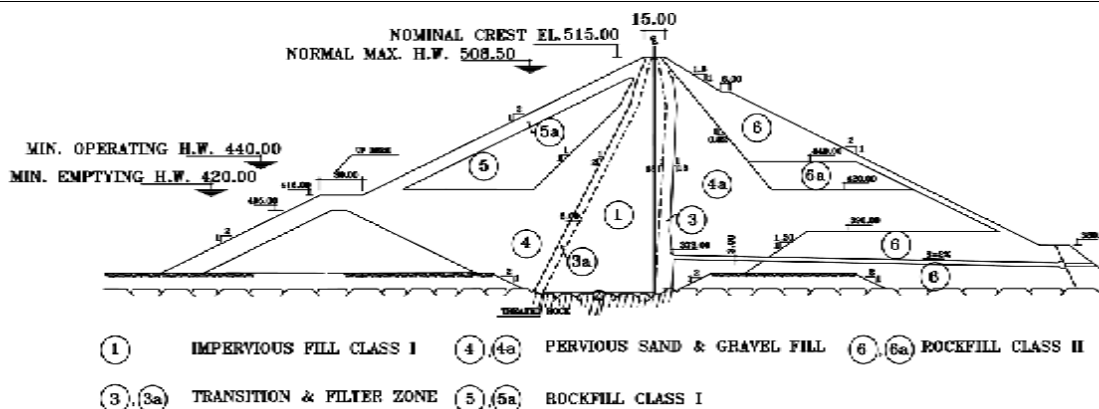
### مقدمه

کشور وجزو بلندترین سدهای خاکی دنیا محسوب می شود. طول تاج سد در حدود ۳۴۵ متر بوده و حجم مخزن آن معادل ۱۲۰۰ میلیون متر مکعب میباشد [۲]. مقطع عرضی تپ سد و مصالح بکار رفته در بدنه آن در شکل (۱) نشان داده شده است. ساخت این سد از اوایل سال ۱۳۷۴ شروع گردید و تا اواخر سال ۱۳۷۶ ادامه داشت. این سد در دو مرحله آبیگری شد که مرحله اول همزمان با ساخت سد بود و آب تا تراز ۴۲۶ متر بالا آمد ولی به سرعت مخزن تخلیه گردید. مرحله دوم آبیگری نیز از اوایل سال ۱۳۷۸ شروع شده است و در این مرحله آب حداکثر تا تراز ۴۸۵ متر بالا آمده است.

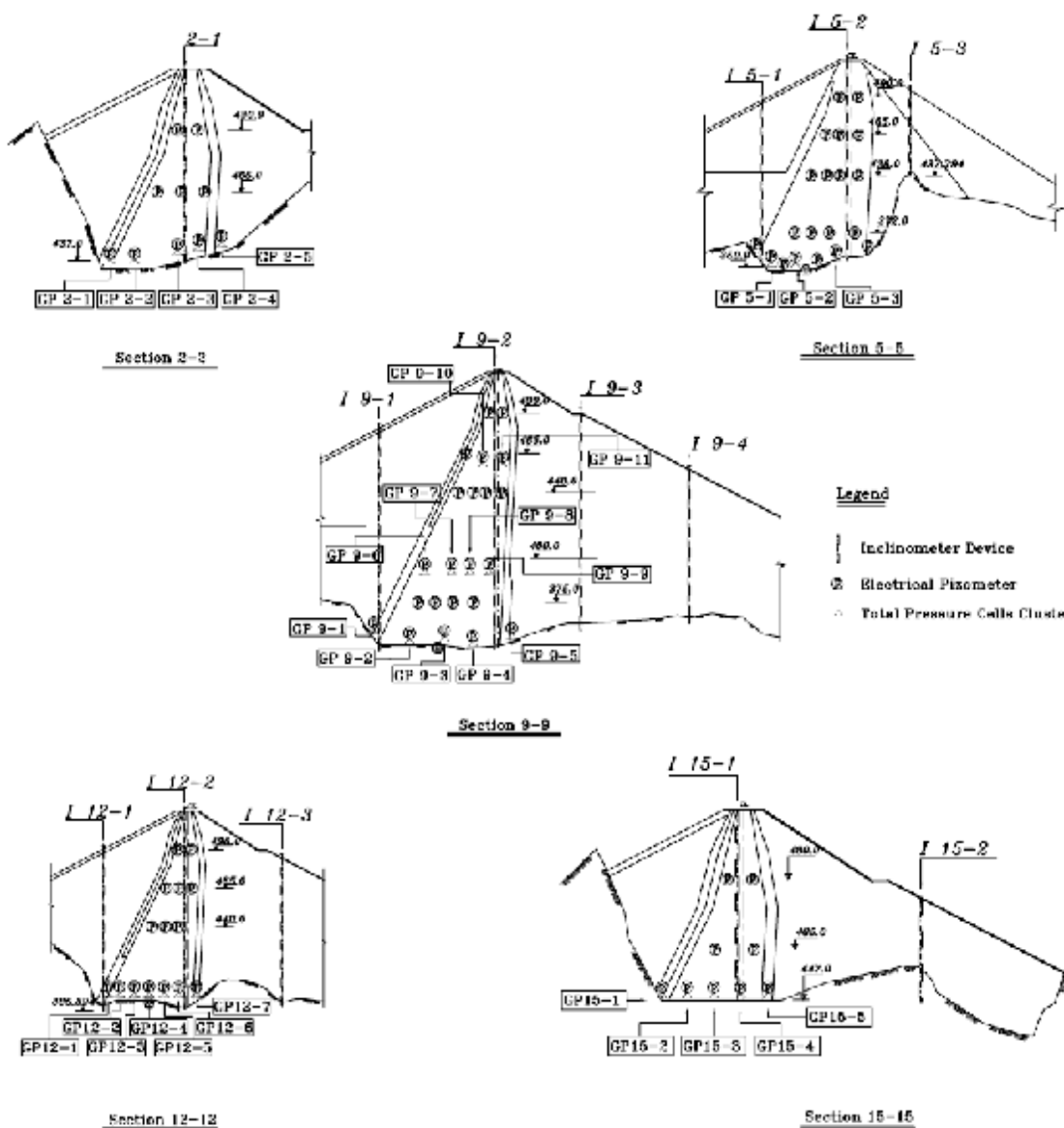
به منظور بررسی رفتار سد مارون سیستمی شامل پیژومترهای الکتریکی<sup>۱</sup>، پیژومترهای لوله ایستا<sup>۲</sup>، سلول های تنش کل<sup>۳</sup>، انحراف سنج ها<sup>۴</sup>، سلول های نشست سنج<sup>۵</sup>، گنج های تراز آب<sup>۶</sup> و شتاب نگارها<sup>۷</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. این ابزار در پنج مقطع مختلف سد، ۲-۲، ۵-۵، ۹-۹، ۱۲-۱۲ و ۱۵-۱۵ نصب گشته است. در شکل (۲) مقاطع مختلف ابزار بندی شده سد و ابزار نصب شده در آنها نشان داده شده است [۳].

امروزه استفاده از ابزار دقیق در اکثر سدهای دنیا به امری کاملاً متداول و ضروری تبدیل شده است و استفاده از این ابزار کمک به سزایی در کنترل ایمنی و پایداری سدها می کند [۱].

طراحی و مدل سازی دقیق سدها نیز بسیار حائز اهمیت می باشد. اگر بتوان یک مدل رفتاری با پارامترهای واقع بینانه پیدا کرد که با نتایج ابزار دقیق تطابق داشته باشد، از این مدل می توان جهت بررسی رفتار سد در مقاطعی که ابزاربندی نشده و یا اینکه ابزار دچار خرابی شده اند استفاده نمود. از طرفی ممکن است در طول دوره آبیگری یا بهره برداری مشکلاتی پیش بیاید. بنابراین با داشتن مدلی مناسب از طرح می توان از ایمن بودن سد در وقوع چنین رخدادهایی اطمینان حاصل کرده و در صورت لزوم تدابیر لازم را اندیشید. سد مارون در استان خوزستان در جنوب غربی ایران و در ۱۹ کیلومتری شمال شرقی بهبهان واقع شده است و فاصله آن از شهر اهواز حدود ۲۲۰ کیلومتر است. این سد از نوع سدهای سنگریزه ای - شنی با هسته رسی با مقطع ناهمگن، با ارتفاع بیشینه ۱۷۰ متر از تراز فوقانی سنگ بستر، از بلندترین سدهای خاکی



شکل ۱: مقطع عرضی تیب سد مارون و مصالح به کار رفته در آن.



شکل ۲: مقاطع ابزار بندی شده سد مارون.

### ساخت مدل هندسی سد

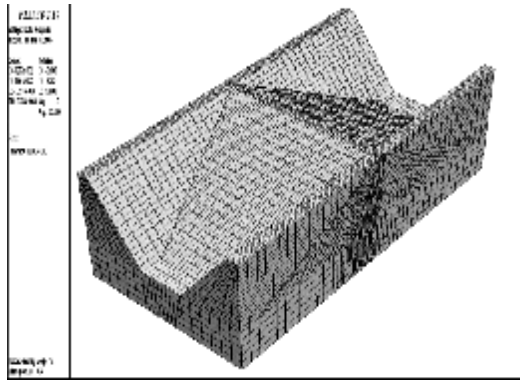
در این بخش، ابتدا مدل سه بعدی سد ارائه شده و با استفاده از پارامترهای استفاده شده در طراحی، مراحل ساخت و آگیری سد شبیه سازی شده است. جهت ساخت مدل عددی سد مارون از نرم افزار Flac3D استفاده شده است این برنامه از روش تفاضل محدود<sup>۸</sup> استفاده می کند و به کمک این نرم افزار مراحل ساخت و آگیری سد مدل گردید. دلیل انتخاب نرم افزار سه بعدی جهت مطالعه رفتار سد مارون، واقع شدن این سد در یک دره نسبتاً تنگ می باشد. ابتدا به منظور ساخت پی سد از اشکال هندسی پیش فرض خود برنامه استفاده گردید سپس به کمک برنامه جانبی Fish که جهت ساخت مدل های پیچیده در برنامه Flac3D تعبیه شده است، بدنه و تکیه گاه های سد مدل سازی گردید. جهت ساخت دره سد نیز از پروفیل دره واقعی استفاده گردید و دره ای به شیب تقریبی ۵۵ درجه که عرض آن در محل اتصال به پی سنگی ۱۰۰ متر بود انتخاب گردید.

شبکه بندی مدل سه بعدی نیز بسیار حائز اهمیت است زیرا شبکه بندی نادرست، هم می تواند زمان گیر باشد و هم اینکه نتایج نادرستی بدهد. جهت شبکه بندی مناسب بهتر است موارد زیر رعایت گردد [۴].

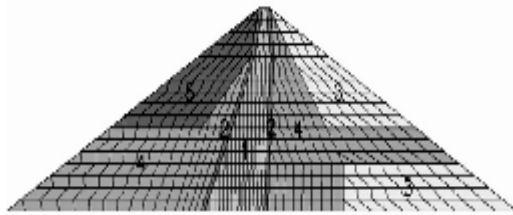
۱) شبکه بندی ریز باعث دقیق تر شدن نتایج خروجی می گردد ولی زمان بیشتری می طلبد  
۲) هر چه نسبت اندازه اضلاع واقع در یک المان به واحد نزدیکتر شود دقت کار بالاتر می رود.

۳) اگر المان های واقع در مدل اندازه های متفاوتی دارند بهتر است افزایش یا کاهش اندازه المان ها به صورت تدریجی انجام گیرد و این تغییر اندازه ها به صورت ناگهانی نباشد. علاوه بر در نظر گیری موارد بالا لازم به یادآوری می باشد که شبکه بندی باید به نحوی انجام شود که نسبت اندازه اضلاع در یک المان از یک به پنج بیشتر نگردد. بنابراین با توجه به مسائل ذکر شده شبکه بندی سد مارون انجام گرفت در این شبکه بندی المان های هسته به مراتب ریزتر از المان های فیلتر و به همین ترتیب المان های فیلتر ریزتر از المان های پوسته انتخاب گردید. در ضمن اندازه المان ها با دور شدن از هسته به سمت پوسته های بالا دست و پایین دست به صورت تدریجی افزایش پیدا کردند. در نهایت تعداد المان های تشکیل

دهنده سد مارون حدود ۴۰۰۰۰ المان گردید. اشکال (۳) و (۴) مدل هندسی سه بعدی سد و مقطع عرضی شبکه بندی شده سد را نشان می دهند.



شکل ۳: مدل هندسی سه بعدی سد مارون.



شکل ۴: مقطع میانی شبکه بندی شده با شماره مصالح به کار رفته در آن.

مدل رفتاری انتخاب شده برای این تحقیق مدل موهر-کلمب<sup>۹</sup> می باشد. منطبق بودن رفتار مصالحی چون شن و ماسه و بتن با این مدل [۵]، رایج بودن آن بین مهندسین عمران و از طرف دیگر همگرایی خوب آن با این نرم افزار دلیل انتخاب این مدل می باشد. پارامترهای استفاده شده در این مدل رفتاری، چسبندگی، زاویه اصطلاک، مدول بالک، مدول برشی، و مقاومت کششی می باشند. در صورت استفاده نشدن هر یک از این پارامترها در مدلسازی، آن پارامتر صفر منظور می شود. لازم به ذکر است این برنامه به جای استفاده از مدول یانگ (E) و ضریب پواسون، استفاده از مدول بالک (K) و مدول برشی (G) را پیشنهاد داده است که دلیل این امر همگرایی بهتر برنامه با این دو پارامتر می باشد [۴]. لازم به ذکر است زمانی که نیاز به بررسی اثر سیال در محیط باشد پارامترهایی نظیر ضریب نفوذپذیری و پوکی نیز لازم می باشند. مشخصات مصالح به کار رفته در طراحی این سد با توجه به شکل (۴) در جدول (۱) آورده شده است

جدول ۱: مشخصات مصالح به کار رفته در مدل اولیه سد مارون (تنش کل).

شماره	نوع مصالح	$\gamma_d (kN/m^3)$	$k (cm/s)$	$C (kPa)$	$\phi$ درجه	$E (kPa)$	$U$
۱	مصالح نفوذ ناپذیر هسته	۱۷/۱	$10^{-7}$	۵۰	۲۰	۲۰۰۰۰	۰/۴۵
۲	مصالح فیلتر و ترانزیشن	۲۱	$10^{-4}$	۰	۳۵	۴۰۰۰۰	۰/۳
۳	مصالح سنگریز پایین دست	۲۱/۵	۴۰۰	۰	۴۳	۸۰۰۰۰	۰/۲۵
۴	شن و ماسه نفوذپذیر	۲۰	۱۰	۰	۴۰	۶۵۰۰۰	۰/۲۵
۵	مصالح سنگریز بالا دست	۲۱/۵	۵۰۰	۰	۴۵	۹۰۰۰۰	۰/۲۵

مصالح، اندازه المانها و ضریب پوکی، که دو عامل اول تاثیر اصلی را در میزان گام زمانی دارند. هر چه مقدار نفوذپذیری و مدول بالک آب بیشتر باشد میزان گام زمانی نیز کمتر می‌گردد و با کمتر شدن گام زمانی مدت زمان تحلیل نیز افزایش می‌یابد. با در نظرگیری نفوذپذیری واقعی در مرحله ساخت، میزان گام زمانی بسیار پایین می‌آید. نرم‌افزار نیز جهت هر چه دقیقتر شدن محاسبات و کمتر شدن زمان محاسبات پیشنهاد داده اگر مدل دارای نواحی با نفوذپذیری‌های متفاوت باشد جهت همگرایی مدل بهتر است تفاوت نفوذپذیری‌ها زیاد نباشد. به عنوان مثال اگر نفوذپذیری یک ناحیه ۲۰۰ برابر ناحیه دیگر باشد اگر این مقدار را به ۲۰ پایین بیاوریم تاثیر چندانی در نتایج نخواهد داشت. با توجه به مطالب فوق و این نکته که در هنگام ساخت، سیال نقش خاصی در مصالح پوسته ندارد، مقدار نفوذپذیری این ناحیه از سد به جهت هماهنگی بیشتر مدل افزایش داده شد و مشاهده گردید هیچ تاثیری در نتایج ایجاد نمی‌شود.

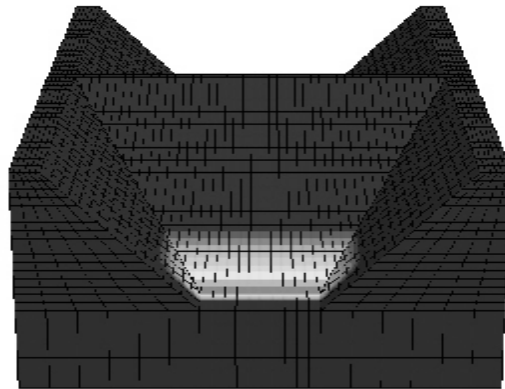
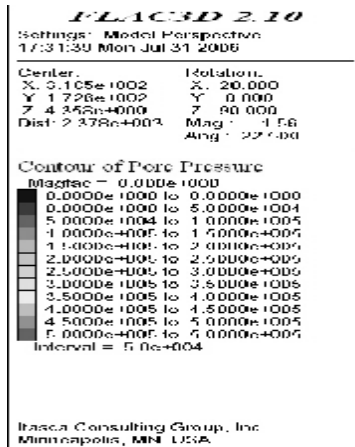
پس از ساخت سد به صورت لایه به لایه آبیگری سد شبیه‌سازی شد. لازم به ذکر است که سد مارون در دو مرحله آبیگری شده است که در اولین آبیگری تراز آب چندان بالا نیامده و تاثیر خاصی در مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق نداشته است. به دلیل زمان‌گیر بودن شبیه‌سازی آبیگری، تنها دومین آبیگری در این تحقیق شبیه‌سازی شد، که در سه مرحله آب به ترتیب به ترازهای ۴۰۰، ۴۴۰ و ۴۹۰ رسید. شکل (۵) سه مرحله آبیگری را در این سد نشان می‌دهد. جهت شبیه‌سازی پدیده آبیگری در سد ابتدا نیروی مکانیکی ناشی از بار آب بر پوسته بالا دست سد اعمال گردید سپس بار آب در همان منطقه وارد گردید. با توجه به اینکه مقادیر نفوذپذیری در پوسته‌ها جهت هماهنگی تحلیل و کاهش

جهت بررسی رفتار سد مارون در مرحله ساخت ابتدا بدنه سد حذف گردید. سپس پی و تکیه گاه سد با اعمال وزن مخصوص و شتاب ثقل به حالت تعادل رسید و تنش‌های ناشی از وزن مصالح سنگی به دست آمد. در مرحله بعد سد به صورت لایه‌ای ایجاد گردید. لازم به ذکر است که سد مارون در ۱۷ لایه ۱۰ متری مدل گردیده است. پس از ایجاد هر لایه مشخصات مصالح موجود در آن لایه و وزن مخصوص آن اعمال گردید.

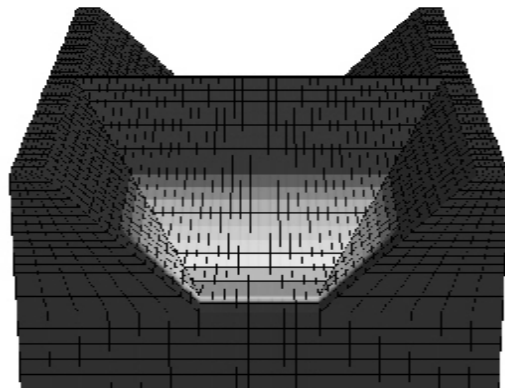
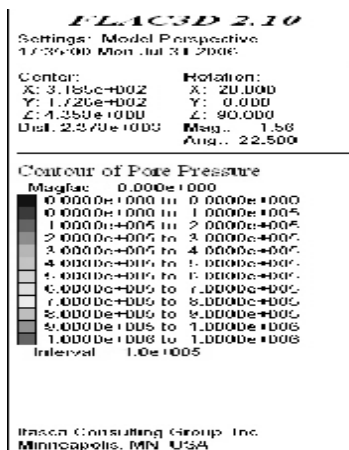
برای بررسی پدیده تحکیم و فشار منفذی در سد، ابتدا برنامه زمان‌بندی با توجه به زمان واقعی ساخت سد در نظر گرفته شد. زمان ساخت سد مارون طبق پیش‌بینی اولیه ۱۸۰۰ روز در نظر گرفته شده بود ولی در عمل این سد در ۱۰۰۰ روز ساخته شد. بنابراین زمان کل ساخت سد ۱۰۰۰ روز در نظر گرفته شد. سرعت متوسط ساخت سد ۱۷ سانتیمتر در روز محاسبه شد. بنابراین زمان تحلیل هر لایه ۱۰ متری ۶۰ روز در نظر گرفته شد. البته با توجه به اینکه ایجاد لایه‌های ۱۰ متری به صورت ناگهانی می‌باشد و در عمل چنین نیست بنابراین زمان تحلیل برای هر لایه‌ای که ایجاد می‌شود از مقدار واقعی آن کمتر است ولی با کمتر کردن زمان تحلیل برای یک لایه، زمان تحکیم لایه‌هایی زیرین نیز کاهش می‌یابد که این با واقعیت سازگاری ندارد و زمان واقعی، برای تحلیل هر لایه در نظر گرفته شد. پس از ساخت هر لایه از سد و اعمال مشخصات مصالح به کار رفته در آن هنگام تحلیل، نرم‌افزار به صورت خودکار گام زمانی تحلیل آن لایه را محاسبه می‌کند. گام زمانی، مدت زمانی در واقعیت است که به ازای هر گام تحلیل سپری می‌شود. به عنوان مثال گام زمانی معادل ۱۰۰ یعنی در نظر گرفتن ۱۰۰ ثانیه در واقعیت به ازای هر گام تحلیل می‌باشد. عوامل موثر در میزان گام زمانی عبارتند از مدول بالک آب، نفوذپذیری

بسیار کمتر گردید و مدت زمان تحلیل هر مرحله بسیار زیادت‌ر گردید.

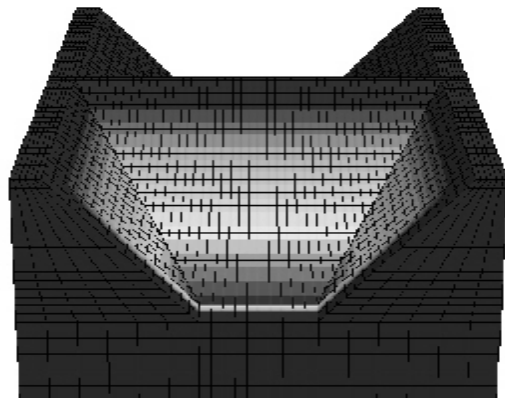
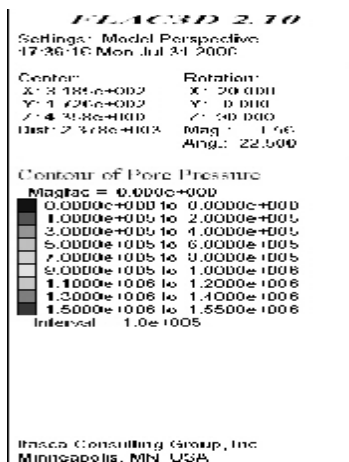
زمان تحلیل پایین آورده شده بود، در این مرحله لازم گردید مقادیر واقعی نفوذپذیری‌ها اعمال گردد. بنابراین با اعمال مقادیر واقعی نفوذپذیری‌ها گام زمانی<sup>۱</sup>



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵: مدل آبگیری سد در سه مرحله، (الف) تراز ۴۰۰، (ب) تراز ۴۴۰، (ج) تراز ۴۹۰.

## مقایسه فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده و محاسباتی

به منظور کنترل فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در سد مارون مجموعاً تعداد ۷۶ پیژومتر در ۵ مقطع (۲-۲)، (۵-۵)، (۹-۹)، (۱۲-۱۲) و (۱۵-۱۵) نصب گردیده است که تعداد ۴۷ پیژومتر در ۵ تراز ۳۷۵، ۴۰۰، ۴۴۰، ۴۶۵، ۴۹۰ قرار داشته و سایر پیژومترها در محل تماس سنگ بستر با هسته رسی نصب گشته‌اند [۳]. پیژومترهای واقع در هسته رسی سد مارون خود به دو دسته، از لحاظ موقعیت نصب، تقسیم می‌شوند. پیژومترهای موجود در فیلتر بالا دست، در منطقه ای که تحت تأثیر تغییرات سریع سطح آب مخزن قرار دارد. هدف از نصب ابزارها در این قسمت، بررسی عملکرد فیلتر مزبور می‌باشد. و پیژومترهای نصب شده در محدوده هسته رسی که به منظور تعیین درجه تحکیم هسته رسی و کنترل فشارهای آب منفذی حین ساخت و آگیری، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جهت انجام تحلیل‌های برگشتی در سدهای خاکی یکی از اصلی‌ترین پارامترها جهت کالیبره کردن، فشار آب حفره‌ای می‌باشد. بنابراین ابتدا با انجام تحلیل‌های مختلف سعی شد مقدار فشار آب حفره‌ای محاسباتی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مقطع (۹-۹)، که بلندترین مقطع سد میباشد تطابق خوبی داشته باشد. پارامترهای زیادی در مقدار فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته تأثیر می‌گذارند که از آن جمله می‌توان به جنس مصالح استفاده شده در هسته رسی، سرعت تراکم و درصد رطوبتی که خاک با آن کوبیده می‌شود اشاره نمود.

پس از تحلیل مدل با پارامترهای اولیه که در جدول (۱) آورده شده مشاهده گردید که اولاً مقدار فشار آب حفره‌ای در مقاطع پایینی بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد و از طرف دیگر مقدار فشار آب حفره‌ای در مقاطع میانی تفاوت نسبتاً زیادی با مقاطع پایینی دارد. ثانیاً پس از اتمام ساخت سد فشار آب حفره‌ای با سرعت بسیار بالایی کاهش پیدا می‌کند در حالی که ابزار چنین نشان نمی‌دهند. نمودارهای به دست آمده از قرائت پیژومترها نشان می‌دهند که توزیع فشار آب حفره‌ای در هسته رسی سد کاملاً یکنواخت نمی‌باشد. بدین معنی که فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در قسمت‌های بالایی هسته نسبتاً زیاد می‌باشد. دلیل این مساله، کوبیده شدن

قسمت‌های پایینی هسته با رطوبت نسبتاً کم می‌باشد که در نتیجه، در صد اشباع این قسمت‌ها، از قسمت‌های بالایی کمتر می‌باشد. جهت مدل کردن چنین حالتی ابتدا سعی شد درصد اشباع قسمت‌های پایینی هسته کمتر از قسمت‌هایی بالایی انتخاب گردد. بنابراین چندین تحلیل با تغییر درجه اشباع مصالح انجام گرفت ولی مشاهده گردید که نتایج چندان مناسب نمی‌باشد. دلیل این مساله نیز متفاوت بودن روند اشباع شدن مصالح در مدل و در کارگاه می‌باشد.

در کارگاه با پیشرفت عملیات خاکریزی و اعمال سربار، تمامی حباب‌های هوای موجود در خاک خارج نمی‌شوند بنابراین زمانی که فشار آب حفره‌ای ایجاد می‌شود درصد اشباع مصالح لزوماً ۱۰۰٪ نمی‌باشد. یعنی ممکن است حباب‌های هوا در خاک محبوس شده باشند و خارج نگردند. ولی در مدل عددی و نرم‌افزار Flac3D تنها زمانی فشار آب حفره‌ای ایجاد می‌شود که هیچگونه حباب هوایی در خاک نباشد و درجه اشباع مصالح دقیقاً ۱۰۰٪ گردد. در نهایت پس از انجام چندین تحلیل بدین روش مشاهده گردید که با دادن درجه اشباع ۹۸٪ به قسمت‌های پایینی هسته و درجه اشباع ۱۰۰٪ به قسمت‌های بالای هسته نتایج نسبتاً با واقعیت سازگار می‌گردند. با این حال سازگاری خوبی با نتایج به دست آمده از ابزار دقیق از خود نشان نمی‌دهند. بنابراین جهت تطابق نتایج به دست آمده از مدل با واقعیت روش دیگری در پیش گرفته شد و آن تغییر مدول بالک آب بود.

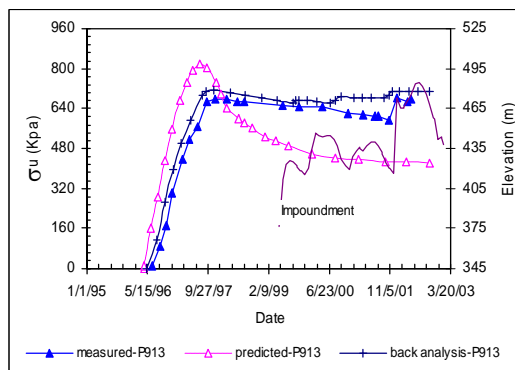
مدول بالک آب تأثیر به‌سزایی در مقدار فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته رسی سد دارد. مقدار مدول بالک آب زمانی که هیچگونه حباب هوایی در آب وجود نداشته باشد دو گیگاپاسکال می‌باشد. ولی در خاک واقعی ممکن است مقداری هوا به صورت حباب در آب وجود داشته باشد که این مساله باعث کاهش مدول بالک آب می‌گردد [۶]. بنابراین همان‌طور که خود نرم‌افزار پیشنهاد داده است نباید مدول بالک آب در مقایسه با مدول بالک خاک خیلی بزرگ باشد. فرمولی که نرم‌افزار جهت کاستن مدول بالک آب پیشنهاد داده است عبارت است از [۴]:

$$K_f^a = 20 \times \left( \frac{K + 4/3G}{n} \right) \quad (1)$$

که در این فرمول پارامترهای K، G و n به ترتیب مدول

می‌شود که فشار آب حفره‌ای شروع به مستهلک شدن می‌کند. البته این استهلاک درست بعد از اتمام ساخت شروع نمی‌شود و مدتی پس از ساخت نیز با شیب کمتر حالت افزایشی دارد و سپس مستهلک می‌گردد. دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای پس از اتمام ساخت در ترازهای پایینی نیز می‌تواند اثر آبیگری اول باشد. البته قابل ذکر است که در آبیگری اول دریاچه به سرعت تخلیه گشته ولی با این حال این پیژومترها را تحت تاثیر قرار داده، همان‌طور که مشاهده می‌شود این افزایش فشار آب حفره‌ای در این پیژومترها در دومین آبیگری نیز کاملاً مشهود می‌باشد. همان‌طور که از این اشکال برداشت می‌شود به احتمال زیاد حداکثر فشار آب حفره‌ای در زمان پایان ساخت بین دو تراز ۳۷۵ و ۴۰۰ رخ داده است. بنابراین حداکثر فشار آب حفره‌ای در محدوده یک سوم پائینی هسته به وجود آمده است.

از طرف دیگر در این اشکال مشخص است که نتایج حاصل از تحلیل‌های برگشتی تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند در حالی که مقادیر به دست آمده از تحلیل اولیه تفاوت زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. با توجه به این اشکال مشخص است که در قسمت‌های پایینی هسته مقادیر به دست آمده از تحلیل اولیه بمراتب بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد که این مساله در پیژومترهای واقع در ترازهای ۳۷۵ و ۴۰۰ یعنی دو شکل (۶) و (۷) به وضوح دیده می‌شود در صورتی که در پیژومترهای واقع در ترازهای بالایی برعکس این حالت رخ داده است. یعنی مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر از مقادیر به دست آمده از تحلیل اولیه می‌باشند که اشکال (۸) و (۹) این مساله را تأیید می‌کنند.

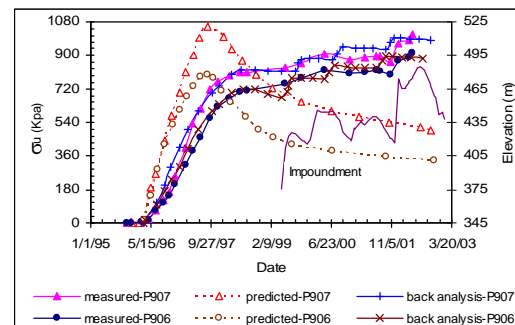


شکل ۷: فشار آب حفره ای اندازه گیری شده و محاسباتی در پیژومتر تراز ۴۰۰ مقطع (۹-۹).

بالک خاک، مدول برشی خاک و ضریب پوکی خاک می‌باشند و  $k_f^a$  مقدار اصلاح شده مدول بالک آب می‌باشد. با توجه به این فرمول مدول بالک آب به ۱۰۰ مگاپاسکال کاهش یافت. بنابراین جهت در نظرگیری حباب‌های هوای موجود در خاک نیز مدول بالک آب کاهش داده شد و درجه اشباع ۱۰۰٪ در نظر گرفته شد.

از طرفی نفوذپذیری خاک نیز تاثیر زیادی در مقدار فشار آب حفره‌ای دارد. بنابراین با انجام چندین تحلیل با در نظر گیری مدول بالک آب و نفوذپذیری‌های مختلف نتایج سازگاری خوبی با ابزار نشان دادند. مشاهده گردید که نفوذپذیری هسته بمراتب کمتر از مقدار اولیه خود می‌باشد و مدول بالک آب نیز از ۷ مگا پاسکال در قسمت‌های پایینی هسته تا ۱۰۰ مگاپاسکال در قسمت‌های بالایی متغیر می‌باشد.

اشکال (۶) تا (۹) مقدار فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده و محاسباتی را در پیژومترهای مختلف واقع در هسته مقطع مقطع ۹-۹ سد نشان می‌دهند. در این اشکال فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده به کمک پیژومترها با فشار آب حفره‌ای بدست آمده از تحلیل‌های برگشتی، همچنین فشار آب حفره‌ای پیش‌بینی شده در طراحی یا تحلیل اولیه مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از تحلیل‌های برگشتی تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند در حالی که مقادیر به دست آمده از تحلیل اولیه تفاوت زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

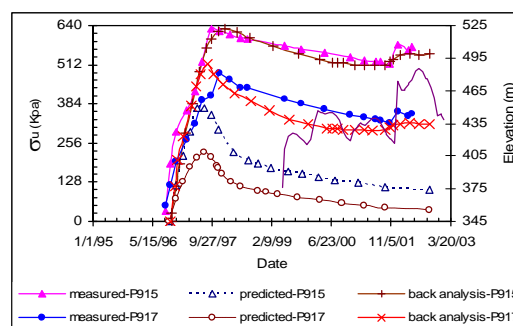


شکل ۶: فشار آب حفره ای اندازه گیری شده و محاسباتی در پیژومترهای تراز ۳۷۵ مقطع (۹-۹).

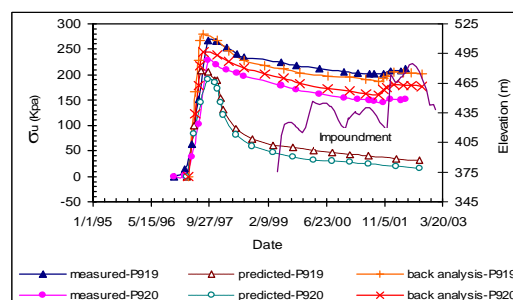
همان‌طور که در این اشکال مشاهده می‌گردد با پیشرفت خاکریزی میزان فشار آب حفره‌ای نیز در اثر وزن لایه‌های فوقانی و نفوذپذیری پایین مصالح هسته رسی افزایش می‌یابد. پس از پایان عملیات خاکریزی مشاهده

## مقایسه تنش‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی

اندازه‌گیری تنش کل توسط ۱۲۴ سلول فشار کل و در قالب ۳۱ گروه سلولی، در مقاطع ابزار بندی شده سد مارون انجام گرفته است. هر گروه سلول، شامل حداکثر ۵ عدد سلول فشار کل تکی است که هر کدام با یک جهت‌گیری و یک تیب نصب مشخص قرار گرفته‌اند. این جهت‌گیری‌ها عبارت است از [۳]:



شکل ۸: فشار آب حفره ای اندازه گیری شده و محاسباتی در بیژومتر تراز ۴۴۰ مقطع (۹-۹).



شکل ۹: فشار آب حفره ای اندازه گیری شده و محاسباتی در بیژومتر تراز ۴۶۵ مقطع (۹-۹).

سمت بالا دست سد و یا پایین دست سد می‌سازند. با داشتن سلولهای فشار کل در جهت‌های مختلف در یک گروه سلولی، علاوه بر اندازه‌گیری تنش کل در این جهات می‌توان به خطای هر یک از این سلول‌ها نیز پی برد [۷]. سلول‌های نصب شده در سد مارون اکثراً در محل تماس پی با هسته رسی قرار گرفته اند و تنها در مقطع ۹-۹ در دو تراز ۴۰۰ و ۴۶۵ تعداد شش گروه سلولی نصب شده است. سلول‌های نصب شده در محل تماس پی با هسته رسی در مقطع ۹-۹ سد که در جهت افقی و جهت قائم در راستای محور طولی سد قرار دارند، عمدتاً از کار افتاده اند [۸]. در جدول (۲) درصد سلول‌های از کار افتاده در تک تک مقاطع و کل بدنه سد آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود بیشترین درصد از کار افتادگی سلولهای فشار کل مربوط به مقطع ۹-۹ می‌باشد که در حدود ۳۶٪ سلول‌های فشار کل موجود در این مقطع در طول عملیات ساخت سد، از کار افتاده اند. سلولهای فشار کل مایل در جهت بالا دست با ۴۱٪ بیشترین درصد از کار افتادگی و سلول‌های قائم در راستای عمود بر محور طولی سد با ۱۴٪ کمترین درصد از کار افتادگی را نشان می‌دهند.

در کل، به طور میانگین در حدود ۳۰٪ سلول‌های نصب شده در سد در طول عملیات ساخت خراب شده اند که مقدار نسبتاً بالائی می‌باشد. دلیل از کار افتادگی سلولهای فشار کل عمدتاً نصب ناصحیح و در نتیجه چرخش بیش از اندازه آنها در اثر خاکریزی می‌باشد. در ادامه، فشارهای ایجاد شده در بدنه سد در اثر خاکریزی و آگیری به کمک سلول‌های فشار کل سالم مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار تنش کل قائم و افقی محاسباتی در مقطع میانی مدل با همان مقطع ۹-۹ سد در اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌گردد تنش کل قائم در هسته سد افت پیدا کرده است که این نشان از وقوع پدیده قوس‌زدگی می‌باشد که این مساله توسط نتایج به دست آمده از سلول‌های فشار نیز مشاهده گردید. مقایسه بین مقادیر محاسباتی تنش و مقادیر حاصل از اندازه‌گیری نشان داد که هر دو مقدار در یک محدوده قرار دارند و تطابق خوبی با هم دارند. شکل (۱۲) مقدار تنش اندازه‌گیری شده و تنش محاسباتی را در عرض مقطع میانی سد در دو تراز ۴۰۰ و ۴۶۵ نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که

(۱) جهت‌گیری قائم و عمود بر محور طولی سد : کمیت اندازه‌گیری شده توسط این سلول‌ها، مقدار تنش کل در جهت افقی و به موازات محور طولی سد می‌باشد.  
 (۲) جهت‌گیری افقی : این دسته از سلول‌های فشار کل، مشخص کننده مقدار تنش قائم در گروه سلولی مربوطه بوده و بیشترین تعداد سلول‌های فشار کل موجود در سد مارون، دارای این جهت‌گیری می‌باشند.  
 (۳) جهت‌گیری قائم و موازی با محور طولی سد : کمیت اندازه‌گیری شده توسط این سلول‌ها نیز مقدار تنش کل در جهت افقی و عمود بر محور طولی سد می‌باشد.  
 (۴) جهت‌گیری مایل : جهت‌گیری صفحات این سلول‌ها به گونه‌ای است که با صفحه افقی زاویه ۴۵ درجه، به

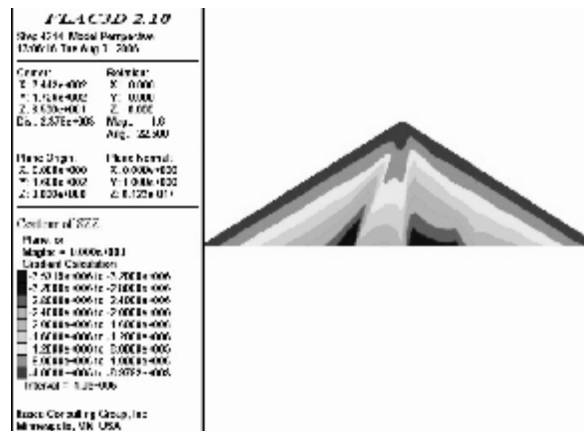


اندازه‌گیری شده تنش در هسته سد مقادیر مشابهی داشتند.

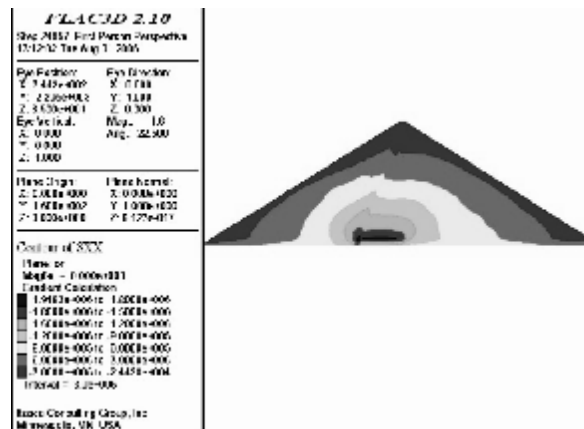
مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده در یک محدوده قرار دارند و از طرفی افت تنش در هسته مدل کاملاً مشهود می‌باشد. در سایر مقاطع نیز مقادیر محاسباتی و

جدول ۲: درصد سلول‌های از کار افتاده در بدنه سد مارون.

مقطع	نسبت سلول‌های از کار افتاده در یک جهت به کل سلول‌ها در همان جهت (درصد)					کل سلول‌های از کار افتاده مقطع (درصد)
	افقی	قائم عمود بر محور سد	قائم در راستای محور سد	مایل به سمت بالادست	مایل به سمت پایین دست	
۲-۲	۲۰	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۲۸
۵-۵	۳۳	-	-	-	-	۳۳
۹-۹	۴۵	۱۷	۴۳	۳۳	۳۳	۳۶
۱۲-۱۲	۴۳	۱۴	۱۴	۴۳	۱۴	۲۶
۱۵-۱۵	۲۵	۰	۷۵	۵۰	۰	۳۰
کل مقاطع	۳۷	۱۴	۳۵	۴۱	۲۳	۳۰

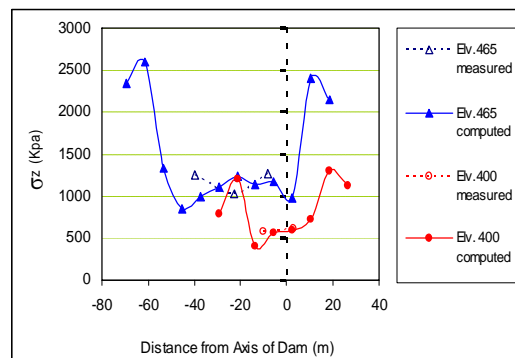


شکل ۱۰: توزیع تنش قائم در مقطع (۹-۹) در زمان پایان ساخت.



شکل ۱۱: توزیع تنش افقی در مقطع (۹-۹) در زمان پایان ساخت.

نشست سنج نصب شده در امتداد انحراف سنج‌ها نداشتند. با این حال در بعضی مناطق نشست محاسباتی از مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر و در بعضی مناطق کمتر بود. با توجه به این مساله که تغییر شکل رخ داده در پوسته‌های سد بر روی تغییر شکل هسته تاثیر می‌گذارد بنابراین ابتدا به کمک نتایج کسب شده از انحراف سنج‌های نصب شده در پوسته بالا دست و پایین دست سد و تغییر مدول الاستیسیته خاک، مقدار نشست محاسباتی و اندازه‌گیری شده پوسته‌های بالا دست و پایین دست همخوانی پیدا کردند در نهایت با تثبیت شدن مدول تغییر شکلی مصالح پوسته با تغییر مدول الاستیسیته مصالح هسته نشست در هسته نیز با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق پیدا کرد. البته لازم به ذکر است که تغییر مدول الاستیسیته مصالح هسته در مقدار فشار آب حفره‌ای بوجود آمده تاثیر می‌گذارد و این تاثیر نیز در تحلیل‌های برگشتی ملاحظه گردید. در جدول (۳) مشخصات نهایی به دست آمده از سعی و خطا و تحلیل‌های برگشتی نشان داده شده است. مقدار نشست به دست آمده از تحلیل‌های برگشتی سد مارون در مرحله پایان ساخت و پس از آبیگری در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود بیشترین نشست در هسته سد رخ داده است. با مقایسه نشست محاسباتی پس از آبیگری با نشست در مرحله پایان ساخت مشاهده گردید که آبیگری تاثیر چندانی در نشست کل سد نداشته است. این مسأله در بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری به کمک صفحات نشست سنج نیز ملاحظه گردیده بود. در اشکال (۱۴) تا (۱۷) نیز مقدار نشست‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی در انحراف‌سنج‌های واقع در مقطع ۹-۹ سد مارون به صورت مقایسه‌ای آورده شده است.



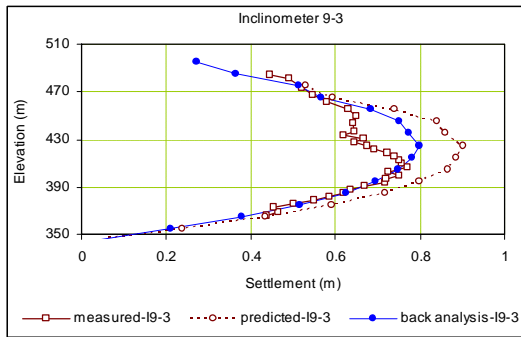
شکل ۱۲: مقدار تنش قائم اندازه‌گیری شده و محاسباتی در عرض مقطع (۹-۹).

### مقایسه تغییر شکل‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده

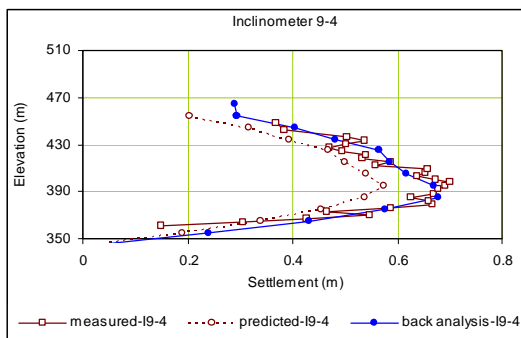
اندازه‌گیری تغییر شکل‌های داخلی بدنه سد مارون در قسمت‌های مختلف توسط لوله‌های انحراف‌سنج و صفحات نشست سنج تعبیه شده در راستای این انحراف‌سنج‌ها، به همراه یک سیستم ترازیابی، انجام می‌گیرد. تعداد ۱۳ انحراف‌سنج در ۵ مقطع ابزار بندی شده سد مارون نصب گردیده است. به منظور اندازه‌گیری نشست‌های قائم بدنه نیز مجموعاً تعداد ۳۷۲ صفحه نشست‌سنج در ترازهای مختلف هر یک از این لوله‌ها، نصب شده است [۳]. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر گردید قبل از انجام تحلیل‌های برگشتی برنامه‌ای با مشخصات مصالح طراحی نوشته شد و سپس با توجه به آن تحلیل‌های برگشتی انجام گردید. در اولین مرحله از تحلیل‌های برگشتی فشار آب حفره‌ای سد با مدل تطبیق داده شده و در مرحله بعد نیز سعی بر آن شد تا با تغییر دادن پارامترهای مربوط به سختی خاک تغییر شکل‌های قائم سد با مدل همخوانی داشته باشد. پس از تحلیل اولیه مشاهده گردید که تغییر شکل‌های قائم سد تفاوت زیادی با تغییر شکل‌های قائم اندازه‌گیری شده به کمک صفحات

جدول ۳: مشخصات مصالح به کار رفته در مدل نهایی سد مارون (تنش کل).

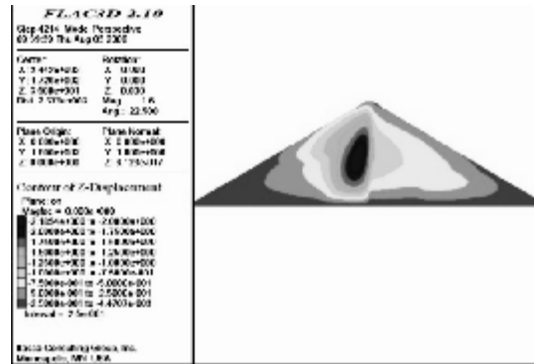
شماره	نوع مصالح	$\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	$k$ ( $cm/s$ )	$C$ ( $kPa$ )	$\phi$ درجه	$E$ ( $kPa$ )	$\nu$
۱	مصالح نفوذ ناپذیر هسته	۱۷/۱	$3 \times 10^{-8}$	۵۰	۲۵	۸۰۰۰	۰/۴۵
۲	مصالح فیلتر و ترانزیشن	۲۱	$10^{-4}$	۰	۳۵	۴۰۰۰۰	۰/۳
۳	مصالح سنگریز پایین دست	۲۱/۵	۴۰۰	۰	۴۳	۷۰۰۰۰	۰/۲۵
۴	شن و ماسه نفوذپذیر	۲۰	۱۰	۰	۴۰	۱۳۰۰۰۰	۰/۲۵
۵	مصالح سنگریز بالا دست	۲۱/۵	۵۰۰	۰	۴۵	۴۰۰۰۰	۰/۲۵



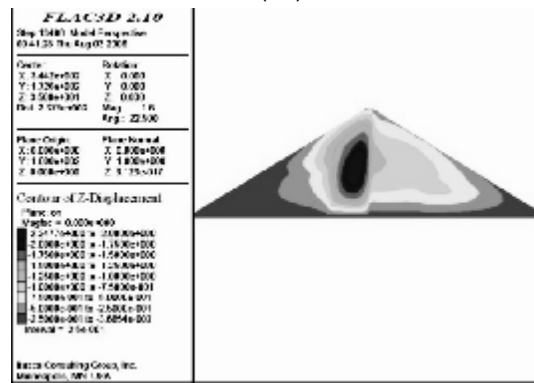
شکل ۱۶: نشست اندازه گیری شده و محاسباتی در پوسته پایین دست مقطع (۹-۹).



شکل ۱۷: نشست اندازه گیری شده و محاسباتی در پوسته پایین دست مقطع (۹-۹).



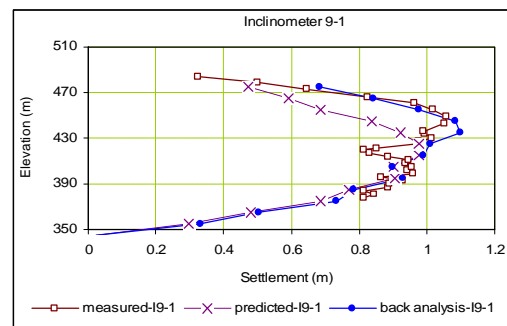
(الف)



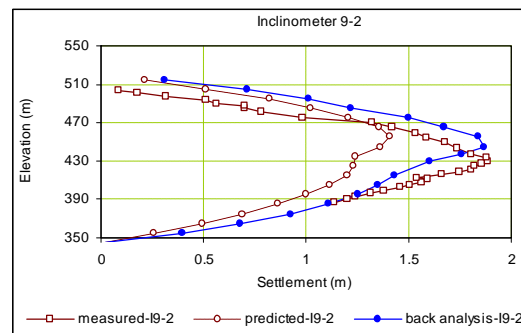
(ب)

شکل ۱۳: نشست قائم در بدنه سد مارون، پایان ساخت (الف) و آبگیری (ب).

همان‌طور که در اشکال قبل ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از تحلیل اولیه با مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج تحلیل برگشتی تفاوت زیادی ندارد با این وجود تطابق نتایج تحلیل برگشتی با مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر می‌باشد. به کمک صفحه‌های نشست سنج می‌توان پدیده قوس زدگی را نیز بررسی نمود. پدیده قوس زدگی<sup>۱۱</sup> به آویزان شدن هسته از پوسته اطلاق می‌شود. نشست متفاوت هسته و پوسته در نتیجه متفاوت بودن تراکم پذیری مصالح آنها باعث وقوع این پدیده می‌شود [۹]. در شکل (۱۸) نحوه تغییرات نشست نقاط واقع در تراز ۴۲۰ و در راستای بالا دست - پائین دست مقطع ۹-۹ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد، مقدار نشست در هسته سد با گذشت زمان رشد بیشتری نسبت به پوسته‌های بالادست و پایین دست دارد که این رشد بیشتر ناشی از پدیده تحکیم در مصالح رسی می‌باشد و می‌تواند علامتی از افزایش میزان قوس زدگی در این راستا باشد با این حال بررسی مساله قوس زدگی به کمک سلول‌های تنش نتایج دقیق‌تری می‌دهد.



شکل ۱۴: نشست اندازه گیری شده و محاسباتی در پوسته بالادست مقطع (۹-۹).

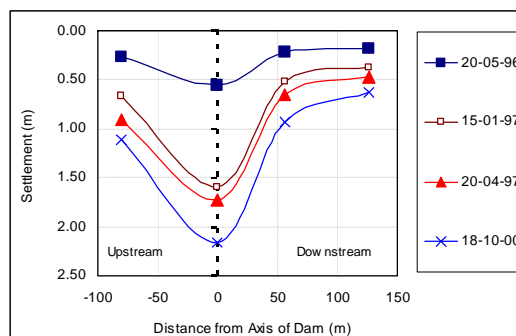


شکل ۱۵: نشست اندازه گیری شده و محاسباتی در هسته رسی مقطع (۹-۹).

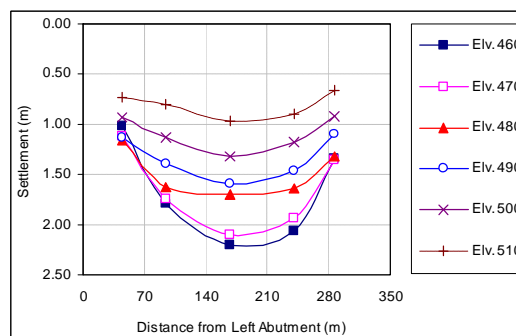
با این حال این قوس زدگی و اختلاف نشست تا این زمان در حدی نبوده که بتواند باعث ایجاد ترک در هسته رسی گردد و مشکلی بوجود بیاورد.

### نتیجه گیری

در این مقاله رفتار سد مارون به کمک اطلاعات بدست آمده از ابزار دقیق نصب شده در سد مورد مطالعه قرار گرفت. پیزومترها نشان دادند که توزیع فشار آب حفره ای در هسته سد مارون یکنواخت نمی باشد و فشار آب حفره ایجاد شده در ترازهای بالایی هسته بر خلاف تصور مقادیر بالایی دارد. بنابر این مدل کردن این حالت با استفاده از تغییر مدول بالک آب صورت گرفت و مشاهده گردید که نتایج به مراتب بهتر از استفاده از درجه اشباع متغیر می باشد. از طرف دیگر در مدل اولیه کاهش فشار آب حفره ای پس از پایان ساخت سرعت بیشتری نسبت به مقادیر اندازه گیری شده داشت که با انجام چند سعی و خطا مشخص گردید که نفوذ پذیری واقعی مصالح هسته از مقادیر استفاده شده در طراحی کمتر می باشد. به کمک اطلاعات بدست آمده از انحراف سنجها و نشست سنجها نیز مدول الاستیسته واقعی مصالح به کار رفته در سد مارون تخمین زده شد. مشاهده گردید که مدول الاستیسته مصالح سنگریزه ای بالادست و پایین دست از مدول الاستیسته شن و ماسه نفوذ پذیر کمتر می باشد. در نهایت اطلاعات به دست آمده از نشست سنجها نشان دادند که چه در راستای عرض دره و چه در راستای بالادست-پایین دست قوس زدگی اتفاق افتاده است. ولی تا این زمان این مساله باعث هیچ گونه خرابی و ترکی خوردگی در سد نشده است.



شکل ۱۸: نشست نقاط واقع در تراز ۴۲۰ مقطع (۹-۹) در زمان های مختلف.



شکل ۱۹: نشست نقاط همتراز در مقاطع مختلف در راستای عرض دره پس از آبیگری.

به دلیل قرار گرفتن انحراف سنجهای مقاطع مختلف واقع در هسته رسی سد مارون در یک راستا قوس زدگی این سد در راستای عرض دره نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۹) نیز مقدار نشست در چند تراز مختلف در عرض دره و در اواخر سال ۸۰ را نشان می دهد. مشاهده می شود نشست نقاطی که به تکیه گاه های سمت راست و سمت چپ نزدیکترند، به مراتب کمتر از نشست نقاط میانی سد می باشد. که این مساله قوس زدگی سد را در این راستا نشان می دهد. از طرفی میزان قوس زدگی در تراز های میانی بیشتر از ترازهای بالایی و پایینی می باشد.

### مراجع

- 1 - U.S. Army Corps of Engineers (1984). *Instrumentation of Embankment Dams and Levees*.
- 2 - Mahab Ghods Consulting Engineers (1987). *Maroon Project, Final Report, 2<sup>nd</sup> Phase, Static Analysis Report, Stability of Dam and Seepage*.
- 3 - JTMA Co. (1995). *Maroon Dam Instrumentation Report*.
- 4 - Itasca Consulting Group, Inc. (2005). *Flac3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User's Guide*.
- 5 - Vermeer, P. A., and R. de Borst. (1984) *Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock*. Heron, Vol. 29, No. 3, PP. 3-64.

- 6 - Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). "*Soil mechanics for unsaturated soils.*" John Wiley and Sons.
- 7 - Dunicliff J. (1988). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.*
- 8 - JTMA Co. (1999). *Maroon Dam Instrumentation and Monitoring Report*
- 9 - Sharma H.D. (1991). *Embankment Dams.* Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Electric Piezometers
- 2 - Stand Pipe Piezometers
- 3 - Total Pressure Cells
- 4 - Inclimeters
- 5 - Settlement Plates
- 6 - Water Level Gauge
- 7 - Accelerographs
- 8 - Finite Difference
- 9 - Mohr-Coulomb
- 10 - Time Step
- 11 - Arching