

بررسی دبی نشت و عملکرد پرده آببند سد خاکی ایوشان با استفاده از تحلیل عددی

مهدی کماسی^{۱*}، بهرنگ بیرانوند^۲

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۹ تاریخ اولین بازنگری: ۹۸/۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۸/۲۷ صص: ۱-۱۴

چکیده

یکی از مهمترین مسائل در سدهای خاکی کنترل نشت آب و میزان دبی نشتی از پی و بدنه سدها می باشد. به همین دلیل با توجه به ساختگاه سدها و برای افزایش طول خزش و همچنین کاهش نشت روش های مختلفی برای آببندی مخزن سدها وجود دارد که احداث پرده آببند در زیر هسته رسی سدهای خاکی یکی از موثرترین روش ها به شمار می آید. در این پژوهش آنالیز تراوش سد ایوشان با هدف بررسی عملکرد و کارایی پرده آببند در مقطع مدل شده و محاسبه دبی کل خروجی از پی و بدنه سد، انجام شده است. حداکثر مقدار ابزار دقیق دبی نشت در شرایط مخزن پر برابر ۲۶/۳۷ لیتر بر ثانیه می باشد که با استفاده از رگرسیون چند متغیره و از معیار ضریب تعیین مقادیر $R^2=0/9892$ و $R^2=0/9930$ به ترتیب برای نرم افزارهای Geostudio و Plaxis به دست آمد که بیانگر همخوانی بسیار خوب بین داده های مشاهداتی و پیش بینی شده و عملکرد مناسب سد از لحاظ دبی نشت می باشد. همچنین میزان ارتفاع فشار آب در سمت پایین دست پرده آببند در نتایج ابزار دقیق و مدل سازی عددی دچار افت ناگهانی شده که نشان دهنده عملکرد صحیح پرده آببند می باشد.

واژه های کلیدی: نشت، سد خاکی ایوشان، پرده آببند، Plaxis, Geostudio.

^۱ استادیار مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی، عضو هیات علمی دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

* نویسنده مسؤل مقاله: komasi@abru.ac.ir

بلاکت و دیوار آببند پرداختند و در نهایت مشخص شد که موثرترین پارامتر کاهش نشت، کاهش نفوذپذیری بلاکت و دیوار آببند می‌باشد (۵). جینگ و یونگ باو (۲۰۱۲) جهت حل مساله نشت سدهای خاکی با استفاده از عنصر آزاد به این نتایج دست یافتند که روش عنصر آزاد می‌تواند مساله نشت سد را در شرایط پیچیده حل کند (۱۰). کین ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی به بررسی آنالیز نشت جریان در حالت پایدار و ناپایدار بر روی سد یانگتسه ناشی از ساخت و ساز پل پرداختند (۱۳). در پژوهشی دیگر بلوری بزاز و مبینی زاد (۱۳۸۹) به ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده‌های ابزار دقیق پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به همخوانی داده‌های ابزار دقیق و نتایج حاصل از تحلیل، می‌توان گفت پارامترهای مقاومتی خاک که از آزمایشات به دست آمده، به واقعیت نزدیک است و نیز مدل‌های رفتاری انتخاب شده قادر به پیش بینی مناسب رفتار سد در این مرحله هستند (۱). فریور و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی رفتار سد تبارک آباد در دوران ساخت با استفاده از تحلیل‌های برگشتی پرداختند (۴). همچنین نائب زاده و محمدی (۱۳۸۷) به تحلیل استاتیکی سدهای خاکی تحت تاثیر شکل هسته رسی پرداختند و مشخص شد که سدهای با هسته خاکی مایل از نقطه نظر تنش‌ها و نیروهای ناشی از تراوش در چند حالت بارگذاری رفتاری مناسب‌تر و در نتیجه از نظر استاتیکی پایدارتر بوده‌اند (۷). خساف و مادلوم (۲۰۱۷)، با استفاده از روشهای عددی به بررسی تاثیر مقدار نفوذپذیری و ضخامت هسته سد بر تعیین شیب هیدرولیکی، گرادیان خروجی، میزان اشباع و فشار کل پرداختند (۱۱). در این پژوهش تأثیر پرده آببند بر کاهش دبی نشت سد ایوشان بررسی شده است. همچنین نحوه عملکرد و تاثیر پرده آببند بر فشار آب منفذی و میزان دبی نشت سد خاکی ایوشان در ترازهای مختلف مخزن بررسی و نتایج داده‌های مشاهداتی (ابزار دقیق) با تحلیل عددی توسط نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis مقایسه شده است.

یکی از مهم‌ترین مسائل در سدهای خاکی حرکت آب در بدنه و شالوده آن می‌باشد. این جریان که زه نامیده می‌شود، هم به لحاظ محاسبه مقدار اتلاف آب و هم به لحاظ پایداری سد و همچنین محاسبه فشار آب در هر نقطه، محاسبه ضخامت و طول زهکش‌ها، بررسی لزوم چاه‌های کاهش فشار، بررسی لزوم و چگونگی تزریق حائز اهمیت است (۸). به همین منظور در بررسی و تحلیل سدهای خاکی، اندازه‌گیری فشار آب منفذی و میزان نشت خروجی از بدنه و پی آن از موارد مهم به حساب می‌آید. مساله مهمی که در ارتباط با نشت مطرح است آن است که شدت جریان نشت در حد قابل قبولی باشد. هرچند یکی از روش‌هایی که به منظور کاهش نشت در پی سدهای خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد احداث ترانشه و پرده آببند است ولی بررسی تاثیر آن بر موقعیت خط نشت آزاد و مقدار دبی تراوش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعه نشت از بدنه و پی سدهای خاکی همیشه مورد توجه مهندسان و محققان مختلف بوده است (۳). پاکباز و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از مدل Seep3D با ارزیابی ساخت دیوار آببند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه‌های راست و چپ سد خاکی کرخه به بررسی کاهش مقدار تراوش پرداختند (۱۲). نتایج آنها نشان داد که با ساخت دیوار آببند راست و چپ مقدار تراوش به ترتیب ۲۰ و ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. موهب زاده و همکاران (۱۳۹۰)، نشت در بدنه و پی سد خاکی کرخه را با استفاده از نرم افزار Seep/w مورد مطالعه قرار دادند و ضمن بررسی گزینه‌های متعدد و مقایسه خروجی‌ها با داده‌های مشاهداتی، نتایج را تحلیل و مورد واسنجی قرار دادند (۶). نتایج حاصله اختلاف حدود ۲ برابری داده‌های برآوردی با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌داد. نتایج نشان دادند که با کاهش ۳۰ درصدی ضرایب نفوذپذیری مقدار نشت برآورد شده توسط مدل به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. جهاندار و سلطانی (۱۳۹۲)، به بحث و بررسی تاثیر دیوار آببند، پتوی رسی و پوشش بتنی بالادست بر روی شبکه جریان در سد خاکی همگن پرداختند (۲). الجیری (۲۰۱۰) آنالیز دوبعدی سد خاکی را به روش المان محدود انجام داد و به این نتیجه دست یافت که مقدار نشت و سرعت حرکت آب پایین‌دست به هرگونه تغییر در نسبت نفوذپذیری نواحی بدنه و پی بسیار حساس می‌باشد (۹). قنبری و زریابی (۱۳۹۳) در پژوهشی به بررسی سیستم آببندی ترکیبی

مواد و روش‌ها

است به عنوان جامع‌ترین سیستم طبقه‌بندی ژئومکانیکی پی‌های سنگی جهت طبقه‌بندی توده سنگ استفاده گردیده است (جدول ۱).

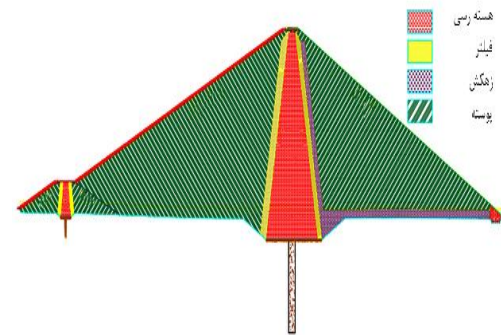
جدول ۱. طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه

سد ایوشان بر اساس سیستم RMR		
امتیاز	توصیف یا مقدار	پارامتر
۲	۹/۵	مقاومت فشاری تک محوره (مگا پاسکال)
۲۰	۹۰ >	RQD: کیفیت مغزه حفاری
۲۰	درزه ای وجود ندارد	فاصله داری (متر)
۳۰	-	وضعیت درزه ها
۱۵	توده سنگ فاقد آب	شرایط آب زیرزمینی
۰	بسیار مطلوب	تعدیل جهت لایه بندی و درزه ها نسبت به سطح بارگذاری
۸۷	بسیار خوب	کلاس توده سنگ

با توجه به نتایج به دست آمده کلاس توده سنگ پی سد ایوشان I (بسیار خوب) می‌باشد که برای پی خاکی بسیار مناسب است. در سدهای خاکی که بر روی بستر خاکی احداث می‌گردند، به علت امکان نفوذ و نشت آب از بالادست به سمت پایین دست در زیر بدنه سد خاکی، می‌بایست با طراحی و اجرای پرده آببند، مسیر حرکت آب در زیر سد را افزایش داده تا با ایجاد افت فشار، امکان تراوش آب در پایین دست را به صفر رساند. در اجرای پرده آببند سد ایوشان که به صورت تیغه و دیواره نفوذناپذیر در زیر هسته رسی قرار دارد، از مصالح رسی، بنتونیت، بتن پلاستیک استفاده شده است که علاوه بر نفوذناپذیری در برابر جریان آب، دارای انعطاف پذیری مناسب به منظور جلوگیری از ترک خوردگی و یا گسیختگی ناشی از جابجائی‌ها و نیروهای احتمالی می‌باشد. در این راستا پس از حفر دیواره مربوطه، مصالح با قالب بندی یک درمیان اجرا تا قطعات اجرا شده به طور مطلوبی در یکدیگر ترکیب شوند (شکل ۲). ابزار نصب شده در سد مخزنی ایوشان جهت بررسی پرده آببند شامل پیرومترهای پی می‌باشد که مطابق طراحی انجام شده ۲۴ عدد است.

مشخصات سد و تاسیسات وابسته سد خاکی ایوشان

سد خاکی ایوشان در فاصله ۱/۵ کیلومتری بالادست روستای ایوشان گلستان و حدود ۵۷ کیلومتری شهر خرم‌آباد در مختصات $2^{\circ}49'48''$ و 48° طول شرقی و $31^{\circ}28'33''$ عرض شمالی، بر روی رودخانه هرود واقع شده است. مساحت حوضه آبریز رودخانه هرود تا محور سد مخزنی ایوشان ۱۲۰ کیلومتر مربع 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 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. همچنین طول تاج سد ۶۰۰ متر می‌باشد. مقطع تیپ بدنه سد مخزنی ایوشان در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مقطع تیپ بدنه و پی سد مخزنی ایوشان

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. از نظر سنگ‌شناسی کنگلومرای محدوده محور و دریاچه از قطعات رادیولاریتی، ماسه سنگ، اسلیت، سنگهای متامورف و قطعات سنگ آذرین با یک ماتریس سیلتی- ماسه‌ای و گاهاً سیلتی- رسی تشکیل شده است. در بررسی ساختگاه محور سد ایوشان از سیستم طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR: Rock Mass Rating) که نخستین بار توسط بنیافسکی ارائه شده

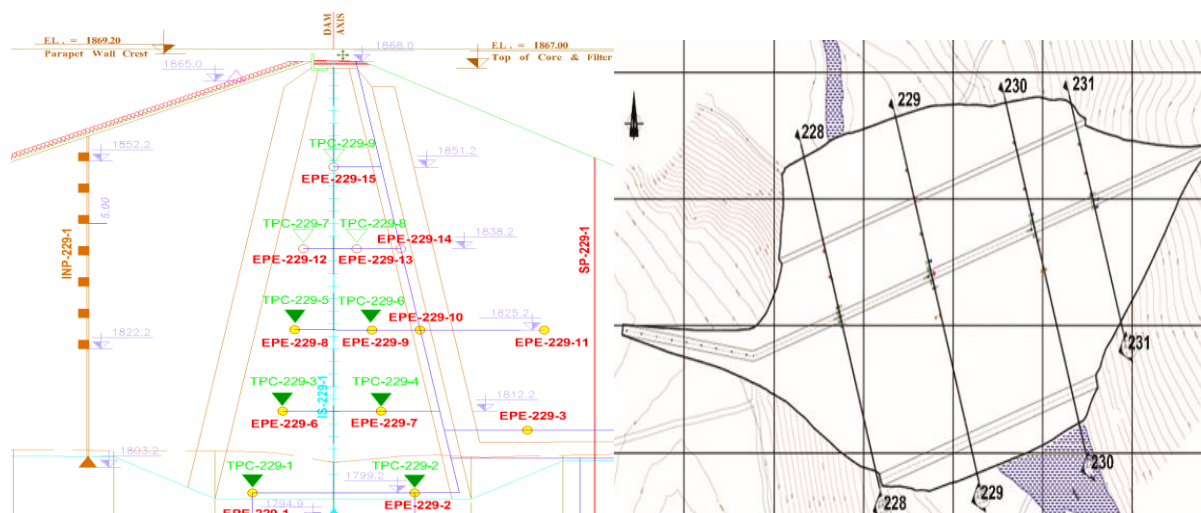


شکل ۲. اجرای پرده آببند سد خاکی ایوشان

می‌پردازد. در شکل ۳ موقیعت مقاطع عرضی و مقطع ابزاربندی ۲۲۹ سد ایوشان نشان داده شده است. بیشترین تراز ابزاربندی مربوط به مقطع ۲۲۹-۲۲۹ با ۷ تراز و کمترین تعداد تراز ابزاربندی مربوط به مقطع ۲۳۱-۲۳۱ با ۵ تراز می‌باشد. همچنین پیزومترهای الکتریکی پی و بدنه سد (EPF, EPE) در شکل ۳ نشان داده شده است.

مقاطع ابزارگذاری در سد مخزنی ایوشان

ابزاربندی سد ایوشان در ۴ مقطع با شماره‌های ۲۲۸-۲۲۸، ۲۲۹-۲۲۹، ۲۳۰-۲۳۰ و ۲۳۱-۲۳۱ به ترتیب در کیلومترهای ۰+۲۴۹، ۰+۳۵۶، ۰+۴۷۷ و ۰+۵۴۶ در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر به بررسی رفتارنگاری ابزار نصب شده در مقطع ۲۲۹ سد مخزنی ایوشان



شکل ۳. موقیعت مقاطع ابزاربندی پی سد روی پلان و در مقطع عرضی ۲۲۹-۲۲۹.

پس از شروع آگیری و در آخرین قرائت ارائه شده فشار پیزومتریک حدود ۷۰ متر و در پائین دست به ۵۸ متر فشار ستون آب نسبت به تراز نصب می‌رسد و اختلاف فشار بالادست نسبت به پائین دست به حدود ۱۲ متر می‌رسد. تراز پیزومتریک در این تراز در بالادست و پائین دست به ترتیب معادل ۱۸۴۹ و ۱۸۳۷ متر ارتفاع از سطح دریا می‌رسد (شکل ۴).

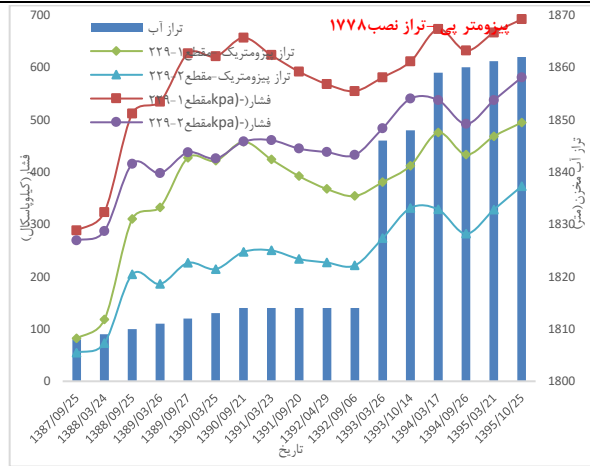
پیزومترهای الکتریکی پی (EPF)

تراز ۱۷۷۸ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در بالادست و پائین دست پی و به فواصل مساوی از محور نصب شده است. روند تغییرات فشار پیزومتریک در این تراز به گونه‌ای است که در زمان افزایش تراز خاکریزی روندی صعودی را نشان داده و در زمان توقف خاکریزی تقریباً سیر ملایم نزولی را نشان می‌دهد. این روند در دوره آگیری به یک روند افزایشی تبدیل شده است. در بالادست

با افزایش تراز آب مخزن تا رقوم ۱۸۶۲ متر پیزومترهای بالادست نیز متاثر از تغییرات تراز پیزومتريک محیط اطراف خود قرار می گیرند که پس از کاهش تراز آب مخزن تراز پیزومتريک نیز در این مقطع روندی کاهشی را نشان می دهد.

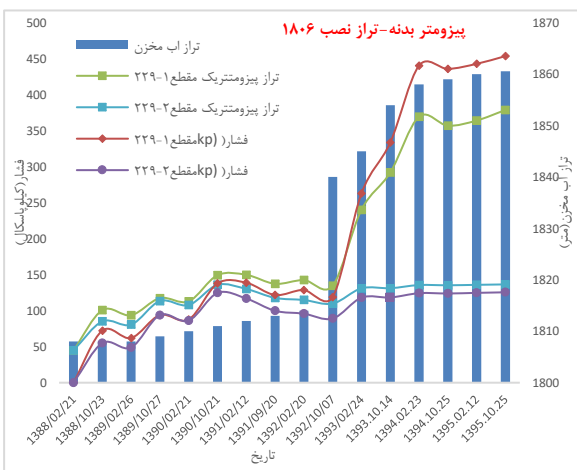
پیزومترهای الکتریکی خاکریز (EPE)

در تراز ۱۸۰۶ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر الکتریکی خاکریز در بالادست و پایین دست هسته رسی نصب شده است. تغییرات فشار منفذی ایجاد شده در هسته رسی تابع افزایش خاکریزی بوده و در اواخر سال ۹۲ با افزایش تراز آب مخزن مقدار فشار منفذی روندی صعودی داشته، در آخرین قرائت انجام شده در بالادست ۴۵۴ کیلو پاسکال و در پایین دست به ۱۲۶ کیلو پاسکال رسیده است که در شکل (۶) مشاهده می گردد. در تراز ۱۸۱۲ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر الکتریکی در هسته رسی و در تراز ۱۸۰۹ متر ارتفاع از سطح دریا سه پیزومتر الکتریکی در پوسته پایین دست جانمایی و نصب شده است. پیزومترهایی که در داخل هسته رسی نصب شده اند روند یکنواختی را از زمان نصب تاکنون تجربه نموده اند به گونه ای پس از اتمام عملیات خاکریزی و شروع دوره آگیری فشار منفذی ایجاد شده مستهلک شده و در هر دو پیزومتر بالادست و پایین دست این فشار بسیار ناچیز می باشد و در شکل (۷) نشان داده شده است.

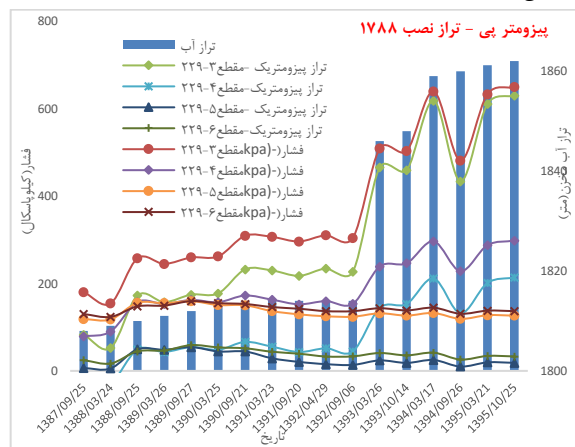


شکل ۴. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای پی، تراز ۱۷۷۸.

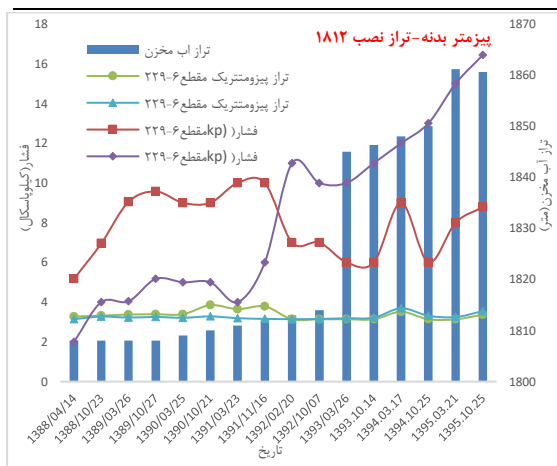
در تراز ۱۷۸۸ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در بالادست و پایین دست محور و دو پیزومتر الکتریکی همجوار پیزومتر های کاساگرانده در پایین دست محور نصب شده است. تراز پیزومتريک در بالادست و پایین دست در آخرین قرائت انجام شده به ترتیب ۱۸۵۵ و ۱۸۱۹ متر ارتفاع از سطح دریا می رسد. همان طور که مشخص است رقوم تراز پیزومتريک در بالادست حدود ۳۶ متر نسبت به تراز پایین دست بیشتر است. ضمن آنکه این اختلاف با افزایش تراز دریاچه روندی افزایشی داشته که می تواند تا حدودی حاکی از عملکرد صحیح پرده آببند باشد. پیزومترهای نصب شده در پایین دست نیز روند تقریباً یکسانی را با پیزومترهای همجوار خود نشان می دهند و تراز پیزومتريک محاسبه شده در این ابزار (EPF-229-5,6) به ترتیب ۱۸۰۳ و ۱۸۰۲ متر ارتفاع از سطح دریا می رسد و روند تقریباً یکسانی را در پایین دست مشاهده می گردد (شکل ۵).



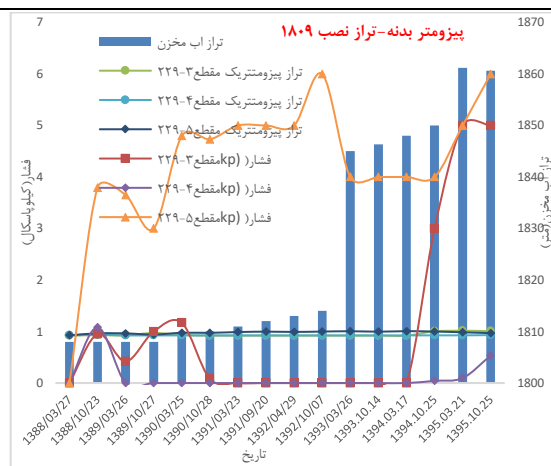
شکل ۶. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای خاکریز، تراز ۱۸۰۶.



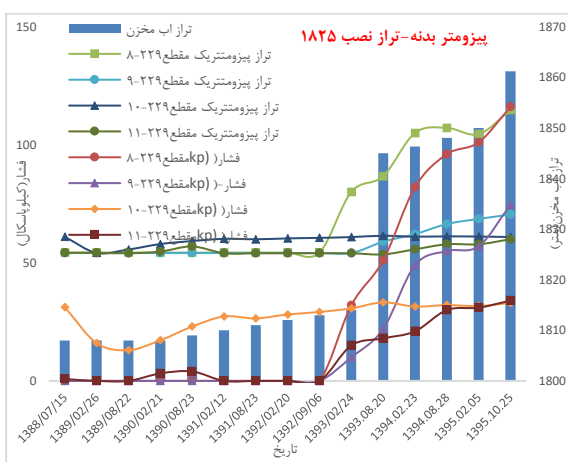
شکل ۵. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای پی، تراز ۱۷۸۸/۲.



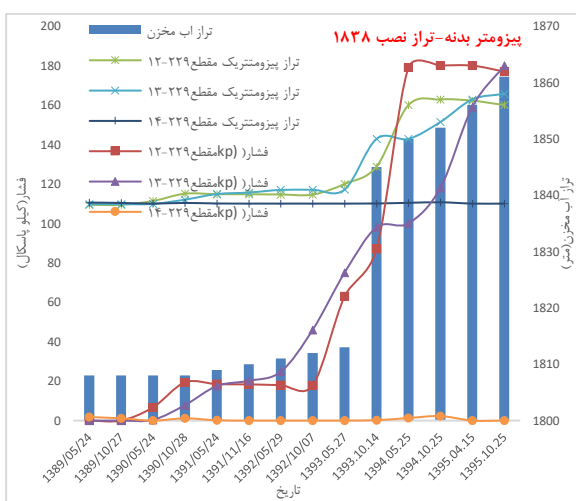
شکل ۸. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای خاکریز، تراز ۱۸۱۲.



شکل ۷. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای خاکریز، تراز ۱۸۰۹.



شکل ۹. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای خاکریز، تراز ۱۸۲۵.

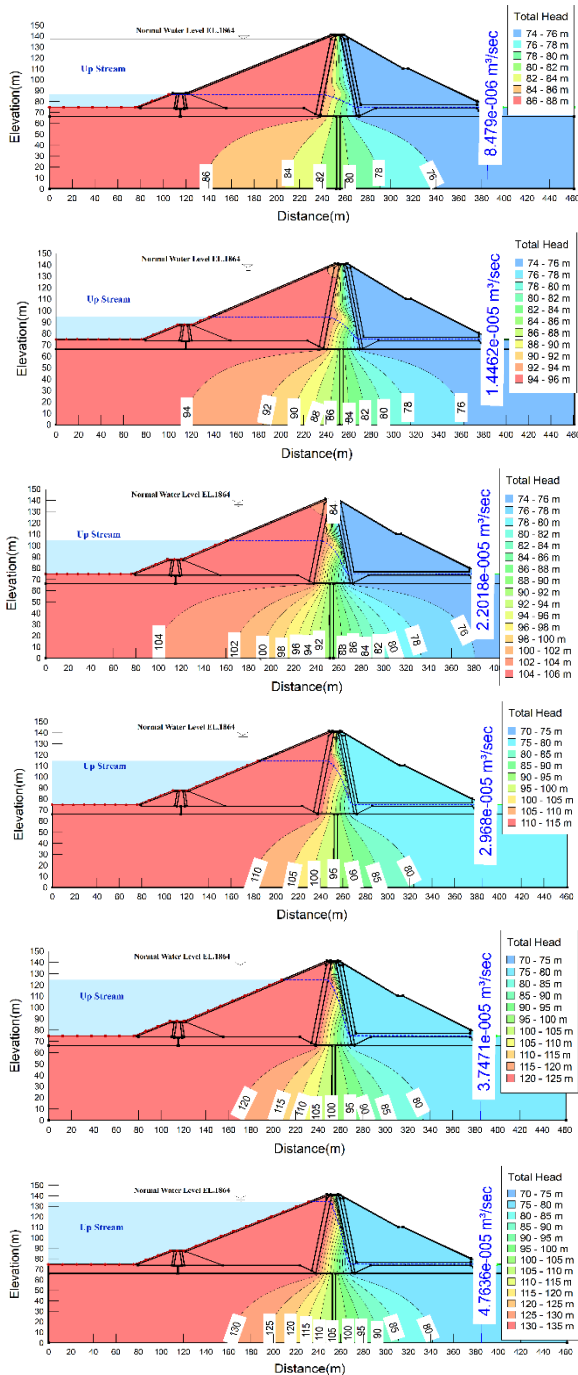


شکل ۱۰. تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای خاکریز، تراز ۱۸۳۸.

در پوسته پایین دست نیز مقدار فشار منفذی ایجاد شده روندی یکنواخت و ثابت را نشان می دهند و فشار منفذی ایجاد شده بسیار ناچیز می باشد که در شکل (۸) نشان داده شده است. در تراز ۱۸۲۵ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در بالادست و پایین دست هسته رسی و دو پیزومتر در فیلتر و پوسته پایین دست نصب شده است، پیزومتر نصب شده در بالادست پس از شروع آبدگیری و در آخرین قرائت فشار ۱۶۷ کیلوپاسکال را ثبت نموده است، همچنین پیزومتر نصب شده در پایین دست در آخرین قرائت ارائه شده، فشار منفذی نزدیک ۷۵ کیلو پاسکال را نشان می دهند ولی پیزومتر نصب شده در فیلتر پایین دست از ابتدای سال ۹۰ و با شروع عملیات خاکریزی سیر ملایم صعودی را نشان داده و در آخرین قرائت انجام شده فشار حدود ۳۳ کیلوپاسکال را نشان می دهد. پیزومتر نصب شده در پوسته پایین دست در آخرین قرائت انجام شده فشار پیزومتری ۳۶ کیلوپاسکال را ثبت نموده است که در شکل (۹) نشان داده شده است. در تراز ۱۸۳۸ متر ارتفاع از سطح دریا سه پیزومتر الکتریکی در هسته رسی و در فیلتر جانمایی و نصب شده است. پیزومتر بالادست هسته رسی فشار منفذی ۱۷۶ کیلوپاسکال و پیزومتر پایین دست فشار حدود ۱۸۰ کیلوپاسکال را نمایش می دهد. پیزومتر داخل مصالح فیلتر، فشار منفذی بسیار ناچیز را نشان می دهد که با توجه به محیط اطراف این ابزار طبیعی به نظر می رسد. پیزومتر الکتریکی نصب شده در تراز ۱۸۵۱ مطابق شکل (۱۰) تاکنون فشار منفذی ناچیز و در حد صفر را نشان می دهد که تا حدودی می توان به محیط خشک اطراف این ابزار اشاره نمود.

تحلیل عددی دبی نشت سد خاکی ایوشان

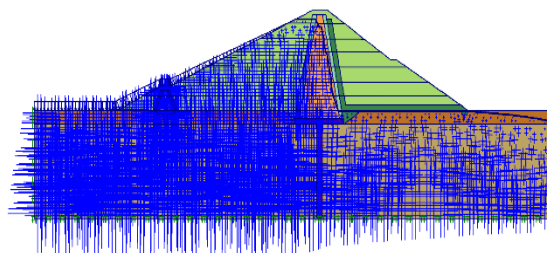
جهت بررسی میزان دبی نشت سد ایوشان از نتایج ابزار دقیق و مقایسه آن با نتایج نرم افزارهای Geostudio و Plaxis استفاده شده است. از قابلیت های نرم افزار Geostudio، ترسیم تراز آب عبوری از درون خاک و بردارهای سرعت، ترسیم خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل و محاسبه دبی عبوری برای مقطع مشخصی از خاک و یا به عبارت دیگر مقطع یک سد خاکی می باشد. در روش اجزاء محدود ابتدا بدنه و پی سد با المان های کوچک المان بندی شده و بعد از اعمال شرایط مرزی با توجه به ترازهای مختلف آب مقدار دبی نشتی محاسبه می گردد. برای تحلیل نشت از بدنه و پی سد ایوشان و برای رسیدن به نتایج معقول و قابل قبول و مقایسه بهتر شرایط نشت در حالت واقعی و محاسبه با نرم افزار از شش تراز مختلف آب در بالادست جهت آنالیز با نرم افزار در حالت جریان گذرا استفاده شده و خروجی های آن بعد از تاثیر عرض دریاچه (طول سد) با داده های واقعی مقایسه گردیده است. در بررسی عملکرد پرده آببند چون در طول بازه زمانی قرائت داده های ابزار دقیق شرایط مرزی با زمان در حال تغییر است (ارتفاع آب بالادست ثابت نبوده و در طول زمان در حال تغییر است)، در نتیجه تحلیل تراوش از نوع ناپایدار خواهد بود. در این نوع تحلیل از شرط مرزی هد در مقابل زمان استفاده شده است که به خوبی نحوه تغییر تراز مخزن را با گذر زمان نشان می دهد. باید توجه کرد که مدت زمان تحلیل تراوش ناپایدار برابر مدت زمان تغییر شرایط مرزی باشد. برای مدلسازی در حالت گذرا نیاز به تعریف شرایط اولیه و خط فریاتیک هستیم. بنابراین با بررسی سطح آب بالادست و مشاهده حالت پایدار در بالادست ابتدا اقدام به یک تحلیل حالت پایدار نموده و جواب های حاصل با نتایج پیرومتریک حاصل از پیرومترهای تار مرتعش مقایسه گردید. سپس با تعریف خط فریاتیک اولیه اقدام به تحلیل حالت گذرا شده است. نتایج مربوط به آنالیز نشت در ترازهای ۱۸۱۲، ۱۸۲۰، ۱۸۳۰، ۱۸۴۰، ۱۸۵۰ و ۱۸۶۱/۲۰ توسط نرم افزار Geostudio در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. آنالیز دبی نشتی سد ایوشان با نرم افزار Geostudio

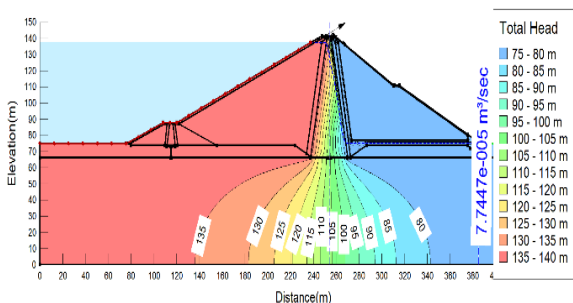
در این پژوهش همچنین جهت صحت سنجی توسط نرم افزار Plaxis2D از مدل کرنش مسطح با المان بندی مثلثی ریزدانه ۱۵ گره ای و مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است (شکل ۱۲).

مصالح در طراحی و واقعیت باشد. همچنین به جهت بررسی میزان تاثیر پرده آببند در کاهش دبی نشت سد ایوشان مدلسازی در حالت مخزن پر (تراز ۱۸۶۱/۲۰ بدون وجود پرده آببند در نرم افزار Geostudio انجام گردید (شکل ۱۴).



شکل ۱۲. خط تراوش جریان (فریاتیک) سد خاکی ایوشان در مدل Plaxis

مقادیر دبی نشت واقعی و نتایج آنالیز نشت توسط نرم افزار Geostudio و Plaxis در نشان داده شده است (جدول ۲). همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود مقدار دبی نشت محاسبه شده در عرض واحد می باشد و با تاثیر طول سد که ۶۰۰ متر می باشد محاسبه می گردد.



شکل ۱۴. آنالیز دبی نشتی سد ایوشان در حالت بدون پرده آببند

میزان دبی نشست در حالت بدون پرده آببند و مخزن پر برابر ۴۶/۴۶ لیتر بر ثانیه محاسبه گردید که در مقایسه با حالت وجود پرده آببند (۲۸/۵۸ لیتر بر ثانیه) حدود ۶۲/۵۶ درصد افزایش دبی نشت را نشان می دهد. به منظور ارزیابی و مقایسه دقیق آماری نتایج داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده، از معیارهای مربع مجذور میانگین خطای نرمال شده (NRMSE) رابطه (۱) و خطای استاندارد نسبی (RSE) رابطه (۲) و میانگین قدر مطلق درصد خطا (MAPE) رابطه (۳) و همچنین از میانگین قدر مطلق خطا (MAE) رابطه (۴) در محاسبه خطای نسبی (RE) رابطه (۵) استفاده شده است.

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

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

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \times \frac{100}{n} \quad (3)$$

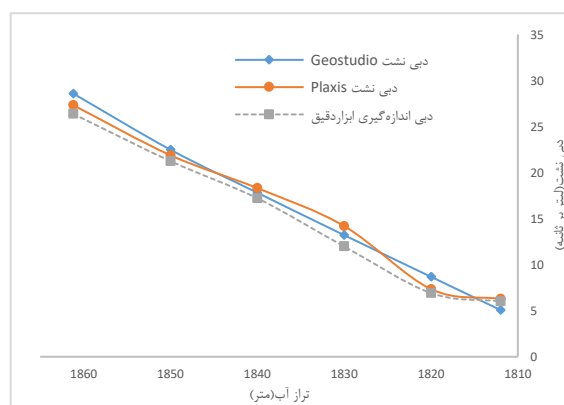
$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (4)$$

$$RE = \frac{MAE}{O_{ave}} \times 100 \quad (5)$$

در روابط بالا P_i مقادیر شبیه سازی شده (نرم افزار)، O_i مقادیر مشاهداتی (ابزار دقیق)، O_{ave} متوسط مقادیر مشاهداتی، O_{max} بیشینه مقادیر مشاهداتی، O_{min} کمینه مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده ها می باشد. پس از اعمال

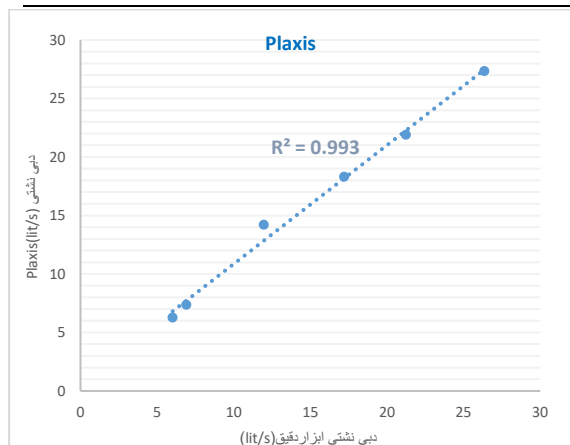
جدول ۲. مقادیر دبی نشت واقعی و نرم افزار Geostudio.

ابزار دقیق	Plaxis (لیتر بر ثانیه)	Geostudio (لیتر بر ثانیه)	تراز آب مخزن (متر)
۲۶/۳۷	۲۷/۳۲	۲۸/۵۸	۱۸۶۱/۲۰
۲۱/۲۴	۲۱/۸۸	۲۲/۴۸	۱۸۵۰
۱۷/۲۱	۱۸/۳۱	۱۷/۸۱	۱۸۴۰
۱۱/۹۸	۱۴/۱۹	۱۳/۲۱	۱۸۳۰
۶/۹۲	۷/۳۵	۸/۶۸	۱۸۲۰
۶/۰۱	۶/۲۷	۵/۰۸	۱۸۱۲



شکل ۱۳. مقایسه نتایج دبی نشت ابزار دقیق و تحلیل عددی.

با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می شود که مقادیر دبی نشتی به دست آمده از آنالیز عددی با نتایج واقعی تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی ندارند. بخشی از این اختلاف مقادیر می تواند ناشی از اختلاف مقادیر وزن مخصوص



شکل ۱۶. نمودار پراکنش دبی نشتی مقادیر ابزار دقیق و Plaxis

نتایج و بحث

بررسی پرده آببند سد ایوشان

بررسی عملکرد پرده آببند با استفاده از نتایج حاصل از پیرومترهای پی قابل بررسی می باشد، لذا با مقایسه فشارهای منفذی در طرفین المان پرده آببند و میزان افت فشار منفذی به سمت پایین دست به انجام خواهد رسید. بدین منظور محاسبه افت فشار پیرومتریک در اطراف پرده آببند کارائی این پرده را نشان می دهد و به صورت ضریب کارائی پرده آببند (K) طبق رابطه (۷) نشان داده می شود.

$$K = \frac{P_u - P_d}{H_r - H_p} \quad (7)$$

P_u = تراز آب در پیرومتر بالادست پرده

P_d = تراز آب در پیرومتر پایین دست پرده

H_r = تراز آب مخزن و H_p = تراز نصب پیرومترها

در صورتی که در بالادست پرده آببند پیرومتر نصب نشده باشد بررسی عملکرد پرده آببند با عامل دیگری تحت عنوان هد باقیمانده (H_{Res}) صورت می پذیرد. این هد به صورت رابطه (۸) تعریف می شود.

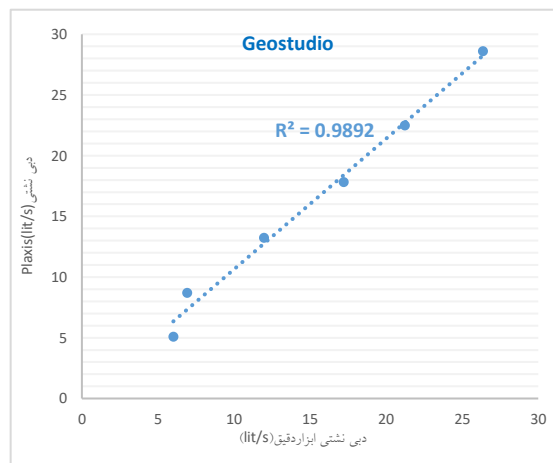
$$H_{Res} = \frac{P_d - H_p}{H_r - H_p} \quad (8)$$

در این حالت هر چه مقدار هد باقیمانده کمتر باشد. نشان دهنده عملکرد بهتر پرده آببند سد خواهد بود. روش دیگر بررسی عملکرد پرده آببند، کنترل فشار پایین دست پرده آببند با مقادیر کنترل حدی معیارهای طراحی برحسب درصد ارتفاع آب مخزن می باشد. با توجه به اینکه در مقطع ۲۲۹-۲۲۹ پیرومترهای بالادست و پایین دست دارای اطلاعات خروجی می باشد محاسبه ضریب کارائی

روابط بر روی داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده نتایج میانگین خطای نرمال شده، خطای استاندارد نسبی، میانگین قدر مطلق درصد خطا و میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای نتایج مربوط به دبی نشت برای نرم افزار Geostudio به ترتیب ۹۵/۵۷، ۹۲/۲۰، ۹۱/۶۳ و ۹۱/۱۲ و همچنین برای نرم افزار Plaxis به ترتیب ۹۶/۵۰، ۹۳/۸۳، ۹۴/۱۰ و ۹۳/۷۷ بدست آمد که بیانگر کارایی مدل ها و انطباق مقادیر اندازه گیری شده با نرم افزارها می باشد. همچنین به منظور ارزیابی و مقایسه دقیق تر عملکرد نتایج ابزار دقیق و مدل ها از رگرسیون چند متغیره از معیار ضریب تعیین (رابطه ۶) استفاده شده است.

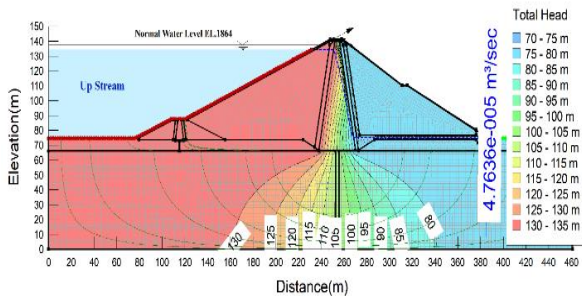
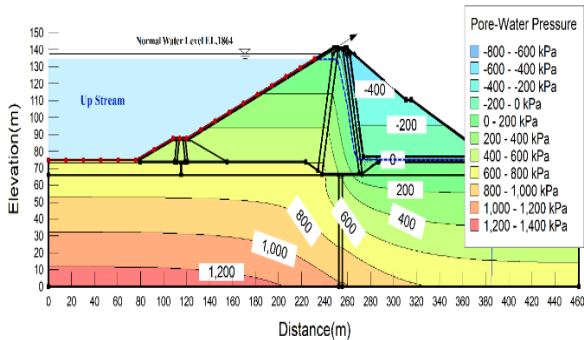
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_{ave})^2} \quad (6)$$

در رابطه (۶) تعداد نمونه هاست، P_{O} به ترتیب مقادیر مشاهده ای و مقادیر پیش بینی شده و O_{ave} میانگین مقادیر مشاهداتی است. ضریب تعیین، نشان می دهد که خط رگرسیون بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک، نزدیک است. در محاسبات هرچقدر مقدار R^2 به عدد یک نزدیکتر باشد کارایی بیشتر مدل را نشان می دهد. در واقع چنانچه مقدار R^2 معادل یک گردد برازش کاملی را نشان می دهد و بیانگر انطباق کامل بین داده های مشاهداتی و پیش بینی شده است. با اعمال رابطه (۶) بر روی داده های مشاهداتی و Geostudio مقدار ضریب تعیین ۰/۹۸۹۲ و Plaxis مقدار ۰/۹۹۳۰ به دست آمد که نشانگر همخوانی نتایج مربوط به دبی نشتی برای مقادیر ابزار دقیق و نرم افزارها می باشد (شکل های ۱۶ و ۱۵).

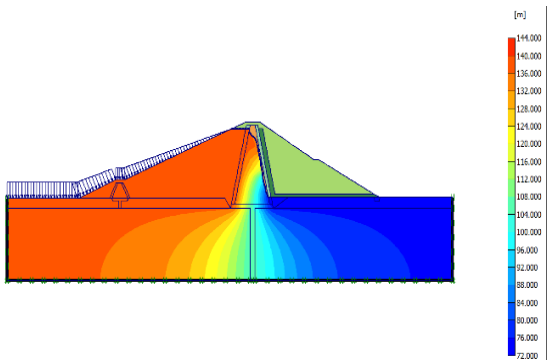
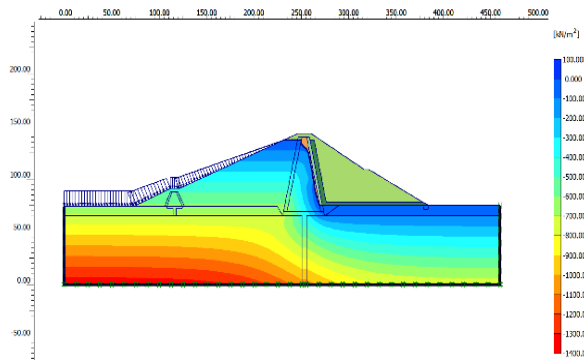


شکل ۱۵. نمودار پراکنش دبی نشتی مقادیر ابزار دقیق و Geostudio

نقاط واقع در بالای این خط دارای مقادیر فشار آب حفره‌ای منفی می‌باشند که علت آن وقوع پدیده مکش در نواحی فوقانی است. در این پژوهش مقادیر منفی فشار آب حفره-ای با عدد صفر نشان داده شده است. این امر نمایانگر واقع شدن نقطه در تراز بالاتر از تراز خط آزاد جریان است.



شکل ۱۷. خطوط جریان و هم پتانسیل و کانتورهای هد کل در نرم افزار Geostudio، تراز آب مخزن ۱۸۶۱/۲۰ متر.



شکل ۱۸. خطوط جریان و هم پتانسیل و کانتورهای هد کل در نرم افزار Plaxis، تراز آب مخزن ۱۸۶۱/۲۰ متر.

پرده آببند از طریق فرمول اول محاسبه می شود، بدین منظور در تراز ۱۷۷۸ ضریب کارائی پرده آببند حدود ۰/۱۷ می باشد، در تراز ۱۷۸۷ این ضریب به ۰/۵ رسیده است. جهت بررسی فشار آب منفذی در بدنه سد ایوشان ابزارهای نصب شده در مقطع ۲۲۹ انتخاب شده‌اند. مقطع ۲۲۹، مقطع با ارتفاع بیشینه سد ایوشان بوده و نتایج شامل قرائت‌های انجام شده در تراز مخزن برابر با ۱۸۶۱/۲۰ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. در این پژوهش، صحت‌سنجی داده‌های تراوش ابزار دقیق، بدنه سد ایوشان توسط نرم-افزارهای Geostudio و Plaxis مدلسازی شده و مقایسه شده است. پارامترهای نفوذپذیری مصالح که در آنالیز تراوش مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۳ ارائه شده است. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مدل نرم‌افزاری مقطع ۲۲۹ سد را نشان می‌دهد. فشار آب حفره‌ای در تراز کف مخزن برابر با ۵۳/۵ متر آب می‌باشد که معادل با تراز آب مخزن (۱۸۶۱/۲۰ متر ارتفاع از سطح دریا) است. خط فراتیک به دلیل نفوذپذیری زیاد پوسته بالادست افقی را در این بخش نشان نمی‌دهد و گرادیان هیدرولیکی قابل توجه در هسته مرکزی مشاهده می‌شود که گواهی بر عملکرد صحیح هسته، یعنی مقابله با نفوذپذیری جریان آب می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزی خطوط هم فشار در جسم سد خاکی، حاکی از تداوم جریان تراوشی پایدار در بدنه سد خاکی می‌باشد.

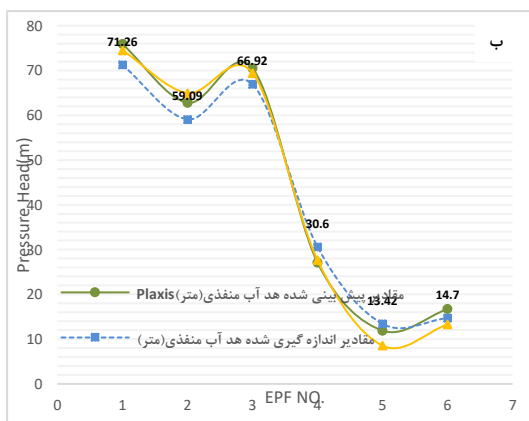
جدول ۳- نفوذپذیری مصالح مختلف سد ایوشان

مصالح	K_x (m/sec)	K_y/K_x
هسته	$2/5 \times 10^{-9}$	۰/۲
پوسته	1×10^{-3}	۱
فیلتر	1×10^{-4}	۰/۵
زهکش	2×10^{-2}	۱
آبرفت پی	5×10^{-3}	۱
پی	1×10^{-9}	۱
پرده آببند	1×10^{-7}	۱

در جدول ۴ مقادیر فشار آب حفره‌ای قرائت شده توسط پیزومترها و نتایج حاصل از مدلسازی کامپیوتری به صورت ارتفاع فشار ارائه شده است. به طور کلی خط سطح آزاد جریان در سد، مرز بین فشارهای حفره‌ای مثبت و منفی می‌باشد، به این صورت که نقاط واقع در زیر خط سطح آزاد جریان دارای مقادیر فشار آب حفره‌ای مثبت و

جدول ۴- مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده فشار آب منفذی هسته و پی سد ایوشان، تراز آب مخزن برابر ۱۸۶۱/۲۰ متر.

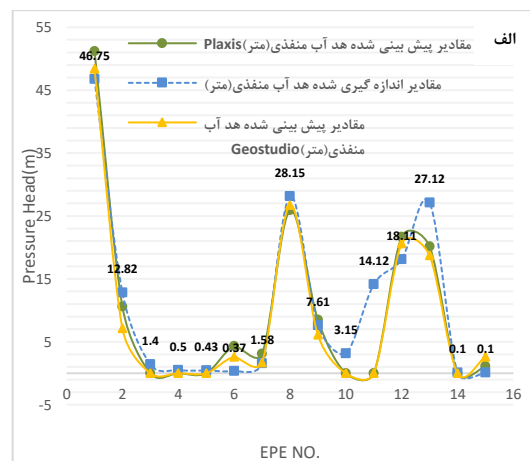
پیزومتر	ارتفاع از سطح دریا (m)	مقادیر اندازه گیری شده هد آب منفذی (m)	مقادیر پیش بینی شده هد آب منفذی (m) Plaxis	مقادیر پیش بینی شده هد آب منفذی (m) Geostudio
EPE-1	۱۸۰۶/۳۲	۴۶/۷۵	۵۱/۲	۴۸/۴
EPE-2	۱۸۰۶/۳۰	۱۲/۸۲	۱۰/۶	۷/۱
EPE-3	۱۸۰۹/۲۰	۱/۴	۰	۰
EPE-4	۱۸۰۹/۲۵	۰/۵	۰	۰
EPE-5	۱۸۰۹/۲۶	-۰/۴۳	۰	۰
EPE-6	۱۸۱۲/۲۰	-۰/۳۷	۴/۳	۲/۶
EPE-7	۱۸۱۲/۱۲	۱/۵۸	۳/۱	۱/۷
EPE-8	۱۸۲۵/۳۶	۲۸/۱۵	۲۵/۹	۲۶/۷
EPE-9	۱۸۲۵/۲۷	۷/۶۱	۸/۵	۶/۱
EPE-10	۱۸۲۵/۲۹	۳/۱۵	۰	۰
EPE-11	۱۸۲۵/۲۲	۱۴/۱۲	۰	۰
EPE-12	۱۸۳۸/۲۹	۱۸/۱۱	۲۱/۷	۲۰/۶
EPE-13	۱۸۳۸/۴۱	۲۷/۱۲	۲۰/۱۴	۱۸/۷
EPE-14	۱۸۳۸/۵۱	۰/۱	۰	۰
EPE-15	۱۸۵۱/۳۵	۰/۱	۱/۱	۲/۶
EPF-1	۱۷۷۸/۲	۷۱/۲۶	۷۵/۹	۷۴/۵۱
EPF-2	۱۷۷۸/۲	۵۹/۰۹	۶۲/۸	۶۴/۹۴
EPF-3	۱۷۷۸/۲	۶۶/۹۲	۷۰/۵	۶۹/۴۶
EPF-4	۱۷۸۸/۲	۳۰/۶	۲۷/۱	۲۷/۶۴
EPF-5	۱۷۸۸/۲	۱۳/۴۲	۱۱/۹	۸/۵۴
EPF-6	۱۷۸۸/۲	۱۴/۷	۱۶/۷	۱۳/۲۸

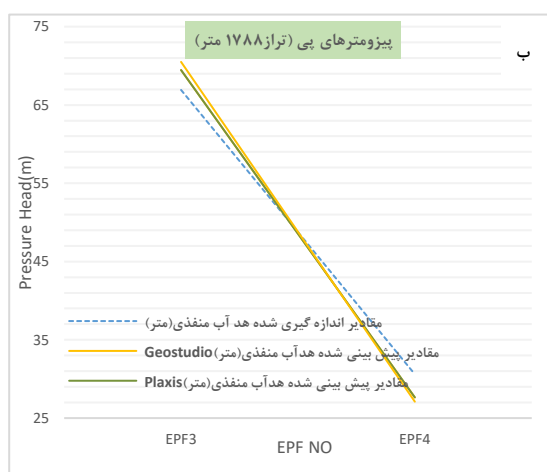
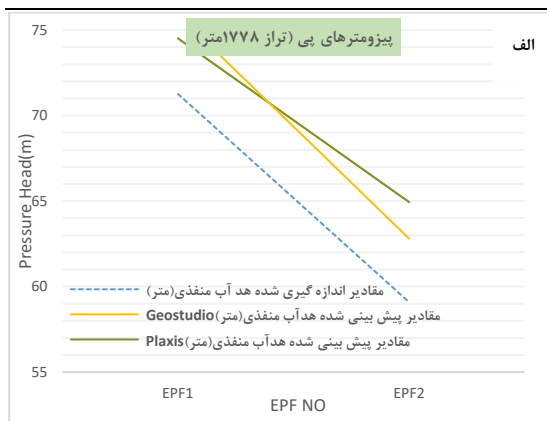


شکل ۱۹. مقایسه مقادیر ابزار دقیق و تحلیل عددی هد آب منفذی (الف) پیزومترهای الکتریکی خاکریز، (ب) پیزومترهای الکتریکی پی

به طور کلی مقادیر به دست آمده از قرائت های ابزار دقیق و آنالیز عددی هم از نظر عددی و هم از نظر روند دارای تطابق نسبتاً خوبی با یکدیگر هستند. همان طور که در شکل ۲۰ ملاحظه می شود نتایج قرائت پیزومترهای الکتریکی درون هسته رسی در ترازهای ۱۸۰۶ و ۱۸۲۵

شکل ۱۹ مقادیر قرائت شده از ابزار دقیق و نتایج مدل سازی عددی برای پیزومترهای الکتریکی خاکریز و پی را مقایسه می کند. این مقادیر مربوط به فشار آب منفذی در بدنه و پی سد ایوشان می باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش فشار آب حفره ای در تراز بالاتر از سطح آزاد جریان برابر با صفر در نظر گرفته شده است.



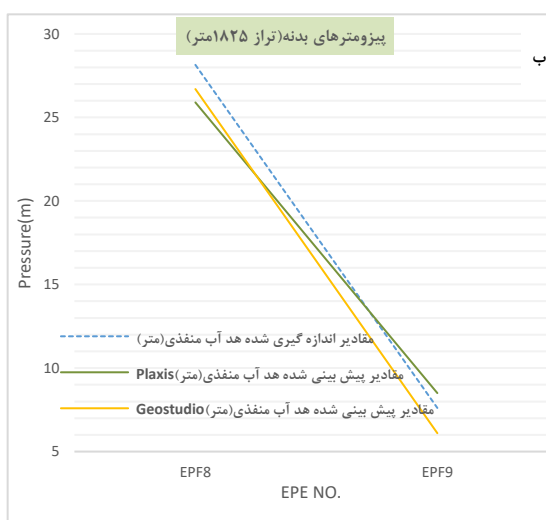
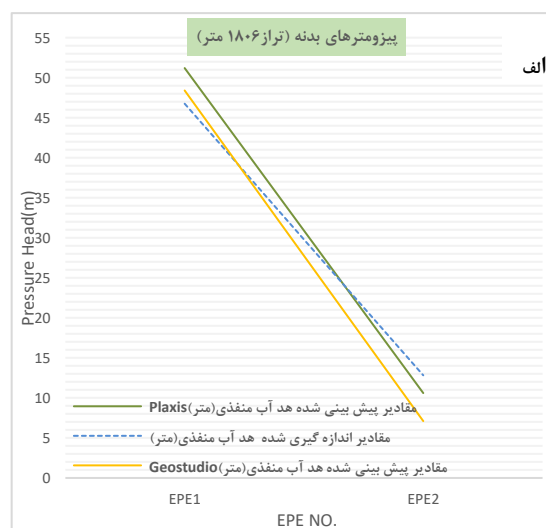


شکل ۲۱. افت ارتفاع فشار با عبور جریان از پرده آب‌بند در دو تراز مختلف از پی سد، الف: تراز ۱۷۷۸ متر ب: تراز ۱۸۸۸ متر

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اجرای سد ایوشان در شرایط وجود پرده آب‌بند باعث کاهش ۶۲/۵۶ درصدی دبی نشتی نسبت به حالت بدون پرده آب‌بند خواهد شد. مقادیر به‌دست آمده از آنالیز عددی هم از نظر کمی و هم از نظر روند شکل، تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق دارند. همچنین خط سطح آزاد جریان (خط فراتیک) به‌دست آمده از مدلسازی عددی در جسم سد از لحاظ کمی و کیفی بسیار شبیه به خط واقعی سطح آزاد جریان استخراجی از پیژومترهای نصب شده می‌باشد. به عبارت دیگر عملکرد هسته در مقابله با نشت، با شرایط اولیه طراحی سد تطابق خوبی داشته و نشانگر رفتار پایدار سد از لحاظ تراوشی می‌باشد. تغییر اندکی که از لحاظ کمی در خط فراتیک حاصل از مدل عددی نسبت به شرایط واقعی جریان از جسم و پی سد مشاهده می‌شود ممکن است ناشی از کاربرد پارامترهای مکانیکی خاک

متر ارتفاع از سطح دریا، کاهش ارتفاع فشار از بالادست به سمت پایین‌دست هسته را نشان می‌دهند که این امر نشانگر عملکرد صحیح این پیژومترهاست. همچنین در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که مقادیر به‌دست آمده از آنالیز عددی هم از نظر کمی و هم از نظر روند شکل، تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از قرائت‌های ابزار دقیق دارند. پیژومترهای EPF-1 و EPF-3 در سمت بالادست پرده آب-بند و پیژومترهای EPF-2 و EPF-4 در سمت پایین‌دست و بسیار نزدیک به آن قرار دارند. همچنین در شکل ۲۱، میزان ارتفاع فشار در سمت پایین‌دست پرده آب‌بند در نتایج مدل‌سازی عددی و در نتایج مشاهده‌ای دچار افت ناگهانی شده که این امر نشان‌دهنده عملکرد صحیح پرده تزریق می‌باشد.



شکل ۲۰. افت ارتفاع فشار بالادست به سمت پایین‌دست هسته در دو تراز مختلف (نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی)، الف: تراز ۱۸۰۶ متر و ب: تراز ۱۸۲۵ متر

- ۳) رحیمی ح، ۱۳۸۹. سدهای خاکی. چاپ سوم، فصل هفتم، انتشارات دانشگاه تهران.
- ۴) فریور ع، میرقاسمی ع. ا.، مهین روستا ر، ۱۳۸۹. بررسی رفتار سد تبارک آباد در دوران ساخت با استفاده از تحلیل های برگشتی. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری. ۳(۴): ۴۱۲-۴۰۷.
- ۵) قنبری ع، زریابی س، ۱۳۹۳. روشی ساده برای محاسبه مقدار نشت از پی سدهای خاکی با وجود بلانکت و دیوار آبنند. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۴۴(۶): ۷۵-۹۳.
- ۶) موهبت زاده آ، مشعل م، هدایت ن، ۱۳۹۰. تحلیل نشت در سد های خاکی با هسته رسی با استفاده از نرم افزار w/seep مطالعه موردی خاکی کرخه خوزستان. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. ۶ تا ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰.
- ۷) نایب زاده ر، محمدی م، ۱۳۷۹. تحلیل استاتیکی سدهای خاکی تحت تاثیر شکل هسته رسی. مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران، ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت ۱۳۸۷.
- ۸) وفائیان م، ۱۳۷۷. سدهای خاکی. چاپ اول، فصل ششم، مرکز انتشارات جهاد سازندگی واحد صنعتی اصفهان.

- 9) Al Jairy H. 2010. 2D-Flow analysis through zoned earthusng finite element approach. Eng & tech journal, Vol.28, No.21.
- 10) Jing T, Yongbio L, 2012. Penalty function element free method to solve complex seepage field of earth fill dam. IERI procedia 1. 117-123.
- 11) Khassaf S.I, Madhloom A.M, 2017. Effect of impervious core on seepage through zoned earth dam (Case study: Khassa chai dam) Int J Sci Eng Res, Vol.8 (2).
- 12) Pakbaz M.S, Dardaei A, Salahshoor J, 2009. Evaluation of Performance of Plastic Concrete Cutoff Wall in Karkheh Dam Using 3-D Seepage Analysis and Actual Measurement. Journal of applied science, 9(4), 724-730.
- 13) Zhang Q, Shaohua Hu, Zhang F, Chen Y, 2013. Steady and Nonsteady Seepage Flow Analysis for the Yangtze Embankment due to Bridge Construction, Procedia Earth and Planetary Science. Vol.5, 124-129.

لحاظ شده در طراحی سد باشد. احتمالاً جنس مصالح خاکی واقعی استفاده شده در بدنه سد ایوشان و در نتیجه پارامترهای نظیر تفاوتی با مقادیر طراحی داشته باشد. علاوه بر این، تحلیل عددی تراوش به صورت دو بعدی صورت گرفته در حالی که جریان واقعی در سدهای خاکی تا حدودی سه بعدی بوده بنابراین این اختلاف در خط فراتیک قابل توجه می باشد. با اعمال رگرسیون چند متغیره و رابطه معیار ضریب تعیین بر روی داده های مشاهداتی و Geostudio مقدار ضریب تعیین ۰/۹۸۹۲ و Plaxis مقدار ۰/۹۹۳۰ به دست آمد که نشانگر همخوانی نتایج مربوط به دبی نشتی برای مقادیر ابزار دقیق و نرم افزارها می باشد. نتایج دو نرم افزار بسیار دقیق و نزدیک به هم می باشد ولی با توجه به مقایسه نتایج مشاهداتی (ابزار دقیق) با تحلیل عددی می توان گفت که نتایج تحلیل عددی توسط نرم افزار Plaxis نسبت به نرم افزار Geostudio دقیق تر می باشد. میزان ارتفاع فشار در سمت پایین دست پرده آبنند در نتایج مدل سازی عددی و در نتایج مشاهده ای دچار افت ناگهانی شده که این امر نشان دهنده عملکرد صحیح پرده تزریق می باشد که صحت عملکرد پرده آبنند را تایید می نماید.

منابع

- ۱) بلوری بزاز ج، مبینی زاد م، ۱۳۸۹. ارزیابی رفتار سد خاکی نهرین در طول ساخت به روش اجزای محدود و مقایسه با مقادیر واقعی حاصل از داده های ابزار دقیق. مجله پژوهش آب ایران ۴(۶): ۱-۱۰.
- ۲) جهاندارس، سلطانی ف، ۱۳۹۲. بررسی تاثیر دیوار آبنند، پتوی رسی رسی و پوشش بتنی بالادست بر روی شبکه جریان و نیروی uplift در سد خاکی همگن. همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، مرکز همایش شهدای پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۳۰ بهمن تا ۱ اسفند ۱۳۹۲.

