

## ارزیابی فشار آب حفره‌ای پی و هسته سد سیوند پس از اولین دوره آبگیری در قیاس با نتایج

## ابزار دقیق

مهدی کماسی\* ۱

بهرنگ بیرانوند ۲

## چکیده

افزایش فشار آب حفره‌ای در بدنه سدهای خاکی موجب کاهش تنش مؤثر و در نتیجه کاهش مقاومت برشی مصالح بدنه سد می‌شود که این امر می‌تواند نتایج خطرناکی در برداشته و باعث عدم پایداری سدهای خاکی گردد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود Plaxis و Geostudio مقادیر ابزار دقیق فشار آب حفره‌ای هسته و پی سد خاکی سیوند پس از اولین دوره آبگیری محاسبه و با نتایج داده‌های مشاهداتی مقایسه و صحت‌سنجی شده است. با توجه به رفتار غیرخطی سد خاکی از مدل‌های رفتاری موهر کولمب و سخت‌شوندگی برای مدلسازی پی و مصالح بدنه سد استفاده شده است. بررسی تغییرات گرادیان هیدرولیکی و فشار آب منفذی سد سیوند نشان داد که در ساخت سد از مصالح بانفوذپذیری مناسب استفاده شده است. همچنین نتیجه ارزیابی مدل‌های Plaxis و Geostudio با داده‌های ابزار دقیق بر اساس محاسبه خطای استاندارد نسبی به ترتیب ۸۶/۳۱ و ۹۰/۷۳ درصد انطباق را نشان می‌دهد که بیانگر عملکرد مناسب هسته رسی و پرده آب‌بند در اثر تغییرات تراز آب مخزن است.

## واژه‌های کلیدی

فشار آب حفره‌ای، سد خاکی سیوند، پرده آب‌بند، Plaxis.Geostudio.

\*۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، [komasi@abru.ac.ir](mailto:komasi@abru.ac.ir)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره).

## مقدمه

خواهد کرد. در این صورت افزایش فشار آب در لایه‌ها حدود ۳۰٪ وزن لایه خاکریزی خواهد بود. در تحلیل سد خاکی در شرایطی که مخزن آن پر و نشت دائم و پایدار برقرار است، روش مرسوم و ساده استفاده از تنش مؤثر بر مبنای فشار حفره‌ای ایجاد شده نشت ثقلی از داخل سد است (رحیمی، ۱۳۸۹). توزیع فشار حفره‌ای ناشی از نشت ثقلی با استفاده از روش ترسیمی شبکه جریان تعیین می‌شود، اگرچه روش اجزاءمحدود نیز در این زمینه قابل استفاده است. روش اجزاء محدود اولین بار برای مسائل ژئوتکنیک توسط وودوارد و کلاف<sup>۲</sup> مطرح گردید، اما استفاده از این روش برای تحلیل سازه‌های بزرگ مانند سدهای خاکی توسط دانکن ارائه گردید، پس از آن دانکن و چانگ<sup>۳</sup> (۱۹۷۰) با توجه به توسعه رایانه‌ها و نرم‌افزارهای پیچیده‌تر از مدل‌های غیرخطی اجزاءمحدود برای تحلیل رفتار تنش و کرنش استفاده نمودند که استفاده از آن برای محیط‌های اشباع توسط نوباری و دانکن<sup>۴</sup> (۱۹۷۲) تکمیل گردید. همچنین زینکویچ<sup>۵</sup> (۱۹۷۷) گزارش‌هایی کلی درباره تحلیل استاتیکی سدهای خاکی ارائه داد. آبهیلاشا و بالان<sup>۶</sup> (۲۰۱۴) در تحلیل عددی تراوش در سدهای خاکی، نرم‌افزارهای کاربردی و تجاری که به‌طور مؤثر توسط پژوهشگران و طراحان برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف جریان تراوش در سدهای خاکی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که مدل‌سازی با  $Seep/w$  از صحت و دقت قابل قبول و بالایی برخوردار است و می‌تواند برای مسائل بزرگ و پیچیده نیز کارآمد و اقتصادی باشد. کارویی و بواسیدا<sup>۷</sup> (۲۰۱۶) در پژوهشی به تحلیل عددی رفتار سد سیدی ال باراک و مقایسه آن با داده‌های ابزار دقیق پرداختند. همچنین راشدی و حائری (۲۰۱۷) با ارزیابی فشار آب حفره‌ای و نشست سد خاکی گاووشان و مقایسه داده‌های ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC(2D) به این نتیجه رسیدند که عملکرد سد از نظر فشار آب حفره‌ای و نهایتاً پایداری سد مثبت است. عبادی و همکاران (۱۳۸۴) بررسی روند تغییرات فشار آب منفذی در بدنه و پی سد خاکی را به روش تحلیل عددی با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که تفاوت‌هایی در شکل و گستردگی نمودارهای مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد که دلیل آن می‌تواند در نحوه مدل کامپیوتری که در

رفتارنگاری به معنای بررسی عملکرد یک سازه در دوران ساخت و مرحله بهره‌برداری و تطبیق آن با پیش‌بینی‌های زمان طراحی است. رفتارنگاری به منظور اطمینان از طراحی بوده و در صورت متفاوت بودن رفتار با پیش‌بینی‌های زمان طراحی، می‌تواند مانع از بروز اتفاقات پیش‌بینی نشده گردد. به‌طور کلی ایمنی سد تنها به طراحی و ساخت آن مربوط نمی‌شود، بلکه به رفتارنگاری کاملی از عملکرد آن در سال‌های اولیه بهره‌برداری و همچنین سرویس‌دهی منظم در طول عمر سد وابسته است (جنتی، ۱۳۸۹). یکی از مشکلات اساسی در سدهای خاکی افزایش اضافه فشار آب حفره‌ای در هسته سد طی مراحل ساخت و آگیری می‌باشد که این مسئله می‌تواند منجر به کاهش تنش مؤثر و در نتیجه باعث کاهش مقاومت برشی مصالح هسته و در نهایت پیدایش ترک هیدرولیکی در سد شود؛ بنابراین توانایی پیش‌بینی گسترش و توزیع زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای در بررسی رفتار چنین سازه‌هایی از اهمیت بالایی برخوردار است. فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در خاک ریزدانه مورد استفاده در یک سد خاکی، از لحاظ مکانیک خاک بسیار اهمیت دارد و افزایش آن می‌تواند پایداری سد را به مخاطره بیندازد. اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در کنترل پایداری پی و جسم سازه‌های خاکی اهمیت ویژه‌ای دارد. در سدهای خاکی بررسی تغییرات فشار آب حفره‌ای و نحوه گسترش آن در بخش‌های ناتراوی سد و پی آن در مرحله ساختمان و یا مراحل مختلف عمر سرویس سد، جهت تفسیر رفتار عملکرد سد مفید است (نائب‌زاده، ۲۰۱۱)؛ بنابراین بسیار مهم است که بتوان مقادیر فشار آب منفذی را پیش‌بینی کرد، به‌گونه‌ای که در هر مرحله مقایسه آن‌ها با ارقام اندازه‌گیری شده در سد امکان‌پذیر باشد. این امر طراحان سد را قادر می‌سازد تا فرضیات طراحی را با واقعیت مقایسه و در هر مرحله ضریب اطمینان واقعی سازه در مقابل گسیختگی را ارزیابی کنند. امروزه اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در برنامه رفتارنگاری سدهای بزرگ به صورت یک استاندارد درآمده است (USBR1965)<sup>۱</sup>. تجربیات آیین‌نامه موسسه USBR نشانگر آن است که خاکریزی لایه‌های نفوذناپذیر با درصد آب متوسط یک تا سه درصد پایین‌تر از درصد بهینه ارائه شده از آزمایش تراکم، فشار آب را در حدود قابل قبولی کنترل

<sup>۵</sup>.Zienkiewicz 1977

<sup>۶</sup>.Abhilasha & Balan 2014

<sup>۷</sup>.Karoui & Bouassida 2016

<sup>۱</sup>.United States Bureau of Reclamation 1965

<sup>۲</sup>.Woodward & clough 1967

<sup>۳</sup>.Duncan & Chang 1970

<sup>۴</sup>.Nobari & Duncan 1972

شده است. سنگ پی از سنگ‌های مختلف از جمله شیست، سنگ‌آهک دولومیت، واریزه‌های دامنه‌ای با متن رسی، آبرفتی تشکیل شده است (شرکت مهندسی مشاور سکو، ۱۳۹۰).

### رفتارنگاری و سیستم اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در بدنه و پی سد سیوند

به‌طور کلی ایمنی سد تنها به طراحی و ساخت آن مربوط نمی‌شود، بلکه به رفتارنگاری کاملی از عملکرد آن در سال‌های اولیه بهره‌برداری و همچنین سرویس‌دهی منظم در طول عمر سد وابسته است. از آنجایی که مشاهده و ثبت رفتار سدهای خاکی طی مرحله ساخت، اولین دوره آبرگیری و دوران بهره‌برداری اهمیت بسیاری زیادی دارد، از این رو به‌منظور دستیابی به این هدف وسایل و ابزار مناسبی در پی، تکیه‌گاه‌ها، بدنه سد و سازه‌های جانبی نصب و داده‌های حاصله به‌صورت مستمر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. داده‌های ثبت شده توسط این ابزارها می‌تواند مورد استفاده طراحان سد و مسئولان بهره‌برداری قرار گیرد و در صورت وجود احتمال وقوع خطر، هشدار لازم را جهت پیش‌گیری به مسئولان بدهد. وجود این نوع اطلاعات علاوه بر ارزیابی رفتار فعلی سد، ارزیابی صحت پارامترهای پیش‌بینی شده در مرحله طراحی را ممکن ساخته و مبنای علمی دقیق‌تری را برای طراحی سازه‌هایی که در آینده ساخته خواهند شد، در اختیار طراحان قرار خواهد داد. جهت اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای موجود در داخل بدنه و فونداسیون سد از این دستگاه‌ها استفاده می‌شود (وفائیان، ۱۳۷۷). ابزاربندی سد سیوند در سه مقطع از مقاطع ده‌گانه آن به‌وسیله پیزومتر الکتریکی پی، پیزومتر الکتریکی خاکریز<sup>۲</sup> (EPE)، پیزومتر کاساگرانده، چاه مشاهده‌ای، سلول فشار کل<sup>۳</sup> (TPC)، نقاط نقشه‌برداری دارای میکروژئودزی، ترکیب انحراف سنج<sup>۴</sup> (INC) و اندازه‌گیر نشست<sup>۵</sup> (MS) انجام شده است. در شکل (۱) جزئیات محل قرارگیری ابزار دقیق مورد استفاده در مقطع ۲۳۱ نشان داده شده است (مهندسی مشاور سکو، ۱۳۹۰).

آن نفوذپذیری‌ها ثابت و لایه‌بندی شده نیستند و بانفوذ مواد ریزدانه‌تر در مرز تماس لایه‌ها نفوذپذیری به‌تدریج تغییر می‌کند. در مطالعه حاضر تغییرات فشار آب حفره‌ای و گرادیان هیدرولیکی در هسته و پی سد خاکی سیوند با استفاده از نتایج ابزار دقیق در اولین دوره آبرگیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور تدقیق بهتر نتایج و صحت‌سنجی از روش‌های تحلیل عددی و از نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis استفاده شده است.

### معرفی سد سیوند

سد سیوند تأمین‌کننده آب قسمتی از اراضی کشاورزی استان فارس و بر روی رودخانه سیوند در حوزه آبریز دریاچه بختگان قرار دارد. حوزه آبریز سد سیوند دارای مساحت ۴۳۷۱/۱۹ کیلومترمربع، ارتفاع متوسط ۲۳۷۵ متر از سطح دریا و حداکثر ارتفاع ۳۷۱۸ متر از سطح دریا است. سد با تراز تاج ۱۸۶۸ از سطح دریا، عرض تاج ۱۲ متر و حجم مفید مخزن حدود ۹۱ میلیون مترمکعب، از نوع خاکی با هسته قائم رسی است. ارتفاع تاج سد از پی ۴۵ متر و تراز نرمال آب ۴۱ متر می‌باشد. عرض تاج هسته ۶ متر و عرض هسته در کف ۲۲ متر می‌باشد. همچنین شیب شیروانی بالادست ۱:۲/۵ و پایین دست ۱:۲ است. شروع عملیات آبرگیری سد با انسداد استاپ لاگ<sup>۱</sup> قبل از اتمام عملیات ساختمانی و در شرایطی که خاکریز در تراز ۱۸۵۵/۳۰ متر (۱۲/۷۰ متر زیرتراز تاج سد) بوده است، آغاز شده و پس از اتمام مراحل ساخت بدنه تراز آب مخزن در تراز ۱۸۴۳/۴۶ متر معادل ۲۴/۵۴ متر عمق آب قرار داشته است. هسته مرکزی از مصالح رس ماسه‌ای و سیلتی مخلوط با مقدار کمی شن تشکیل می‌شود، مصالح پوسته از منابع قرضه مصالح درشت‌دانه تأمین شده است، مصالح ناحیه انتقالی از منابع قرضه درشت‌دانه که ماسه بیشتری دارند استفاده شده و نواحی انتقالی به عرض ۳ متر و در طرف راست هسته غیرقابل نفوذ در نظر گرفته شده است. مصالح فیلتر از محل قرضه مصالح نفوذپذیر اخذ و با دستگاه سرنند و ماسه شور، دانه‌های درشت‌تر از ۵ میلی‌متر جدا و باقیمانده آن شسته

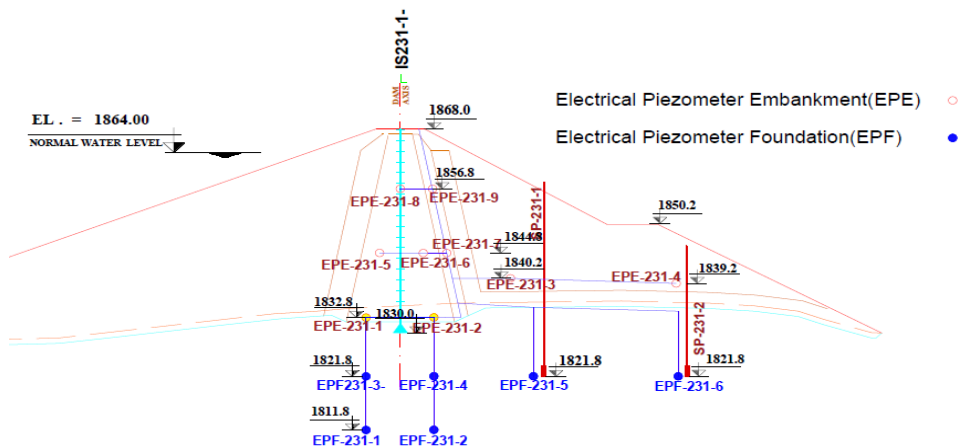
<sup>۴</sup>.Inclinometer pipe

<sup>۵</sup>.Settlement Meter

<sup>۱</sup>.Stop log

<sup>۲</sup>.Electrical Piezometer Embankment

<sup>۳</sup>.Total Pressure Cell



شکل (۱): موقعیت و جانمایی ابزار دقیق سد سیوند (مقطع ۲۳۱)

پارامتر ورودی است،  $E$  و  $\sigma$  برای الاستیسیته خاک،  $C, \phi$  برای پلاستیسیته خاک و  $\psi$  به عنوان زاویه اتساع پذیری استفاده شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح و مشخصات تکمیلی در مدل رفتاری سخت شونده با استناد به گزارش های فنی موجود برای مدلسازی با نرم افزارهای Plaxis و Geostudio در شرایط اولین دوره آبیگری انتخاب گردید (مهندسين مشاور سکو، ۱۳۹۰)، (جداول ۱ و ۲).

### مشخصات مصالح

ابزاربندی سد سیوند در ۴ مقطع با شماره های ۲۳۰، ۲۳۱، ۲۳۲ و ۲۳۳ در نظر گرفته شده است که در این پژوهش مقطع ۲۳۱ به دلیل بلندترین مقطع و وجود بیشترین تراز ابزاربندی مورد بررسی قرار گرفته است. در مقطع ۲۳۱ از مدل موهر کولمب (MC) که یک مدل الاستوپلاستیک و شامل ۵

جدول (۱): پارامترهای مصالح سد سیوند

مدل موهر - کولمب	$\gamma_{unsat}$ KN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{sat}$ KN/m <sup>3</sup>	K m/day	$\frac{K_y}{K_x}$	$E_{ref}$ KN/m <sup>2</sup>	$\nu$	$\phi$	$\psi$	$C_{ref}$ KN/m <sup>3</sup>
هسته	۱۷	۱۸	۰/۰۰۱	۰/۲	۴۶۰۰۰	۰/۳۵	۲۰	۰	۲۵
پوسته	۲۲	۲۳	۶۸/۹۰	۱	۱۳۰۰۰۰	۰/۲۵	۴۴	۱۳	۰/۲۰
زهکش	۲۱	۲۲	۹۴۵/۶	۱	۹۰۰۰۰	۰/۳۰	۴۰	۱۱	۰/۲۰
فونداسیون/شیبست	۲۱	۲۲	۰/۰۰۱	۱	۳۵۰۰۰۰۰	۰/۲۵	۲۲	۱۰	۳۵
فونداسیون/سنگ آهک	۲۴	۲۵	۰/۰۲۷	۱	۵۰۰۰۰۰۰	۰/۲۵	۴۵	۱۲	۵۰۰
فیلتر بالادست	۱۹	۲۰	۱۷/۲۹	۰/۵	۸۰۰۰۰	۰/۲۵	۴۰	۱۱	۰/۲۰
فیلتر پایین دست	۲۰	۲۱	۱۲۲/۴	۰/۵	۸۵۰۰۰	۰/۲۵	۴۱	۱۲	۰/۲۰
پرده آببند	۲۴	۲۴	*	۱	۸۰۰۰۰	۰/۲۰	*	*	*

جدول (۲): مشخصات تکمیلی مصالح در مدل رفتاری سخت شونده

مدل سخت شونده	$E_{50}^{ref}$ (kn/m <sup>2</sup> )	$E_{oed}^{ref}$ (kn/m <sup>2</sup> )	$E_{ur}^{ref}$ (kn/m <sup>2</sup> )
هسته رسی	$۳/۴ \times 10^4$	$۴/۱ \times 10^4$	$۱/۲ \times 10^5$
پوسته	$۸/۶ \times 10^4$	$۹/۱ \times 10^4$	$۲/۵ \times 10^5$
فیلتر	$۱/۳ \times 10^5$	$۱/۶ \times 10^5$	$۲/۸ \times 10^5$

بررسی نتایج ابزار دقیق پیزومترهای الکتریکی هسته سد سیوند

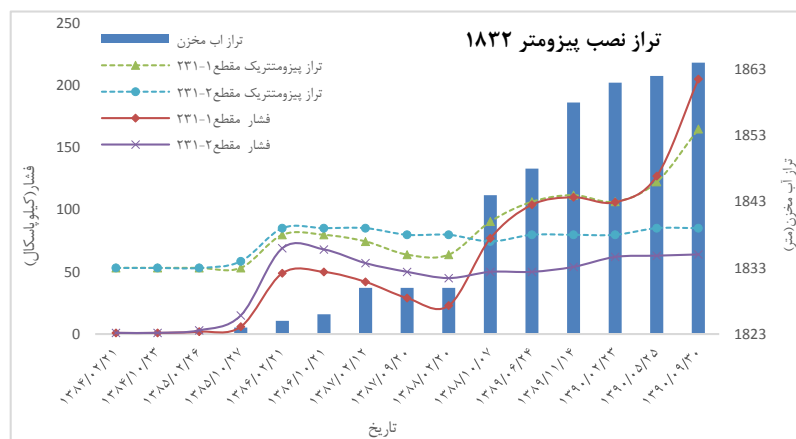
در مقطع ۲۳۱-۲۳۱ مجموعاً ۸ پیزومتر الکتریکی خاکریز نصب شده است که ۵ پیزومتر در هسته سد جانمایی شده است (جدول ۳).

جدول (۳): مشخصات پیزومترهای الکتریکی خاکریز نصب شده در مقطع ۲۳۱-۲۳۱

نام ابزار	محل نصب	فاصله از محور (متر)	تراز نصب (متر ارتفاع از سطح دریا)	موقعیت نصب
EPE 231-1	هسته	۵/۹۷	۱۸۳۲/۹۸	بالادست
EPE 231-2	هسته	۵/۱۲	۱۸۳۲/۸۴	پایین دست
EPE 231-3	خاکریز	۱۸/۴۶	۱۸۴۰/۲۳	پایین دست
EPE 231-5	هسته	۳/۶۸	۱۸۴۴/۹۷	بالادست
EPE 231-6	هسته	۳/۵۴	۱۸۴۴/۷۶	پایین دست
EPE 231-7	فیلتر	۶/۶۱	۱۸۴۴/۷۶	پایین دست
EPE 231-8	هسته	۰/۰۱	۱۸۵۶/۷۷	آکس
EPE 231-9	فیلتر	۴,۷	۱۸۵۶/۸۰	پایین دست

آبگیری فشار منفذی به‌مرور و با توجه به زمان در حال افزایش است ضمن اینکه نسبت به محور سد تقارن دارند ولی پس از اولین دوره آبگیری، جهشی ناگهانی مشاهده می‌شود. این جهش در بالادست هسته سد بیشتر مشاهده می‌شود و مقادیر فشار منفذی در بالادست، در مقایسه با پایین دست هسته، از آن تقارنی که در مرحله ساخت وجود داشت خارج شده که آن نشان‌دهنده تبعیت فشارسنج‌های بالادست هسته، از تراز آب مخزن است.

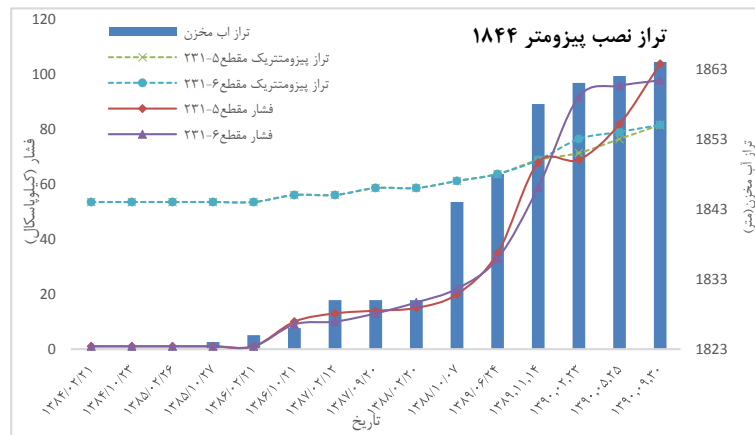
در تراز ۱۸۳۲ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در بالادست و پایین دست هسته رسی نصب شده است پیزومترهای نصب شده در این تراز پس از نصب تا قبل از آبگیری روند یکنواخت و محیط تقریباً خشکی را نشان داده ولی پس از آبگیری فشار منفذی ایجاد شده صعودی بوده به طوری که در آخرین قرائت انجام شده این مقدار در بالادست به ۲۰۵ کیلو پاسکال و در پایین دست به ۶۴ کیلو پاسکال رسیده است شکل (۲). در واقع در دوران ساخت و قبل از



شکل (۲): تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای هسته در تراز ۱۸۳۲

می‌رسد شکل (۳). دلیل کاهش نتایج پیزومترهای پایین دست می‌تواند ناشی از مجاورت آن در ناحیه فیلتر و زهکش باشد. در واقع وجود زهکش در اطراف هسته موجب استهلاک فشار آب حفره‌ای می‌گردد. این امر سبب هدایت مناسب آب به خارج از هسته و در پی آن کاهش فشار آب حفره‌ای در هسته سد می‌گردد.

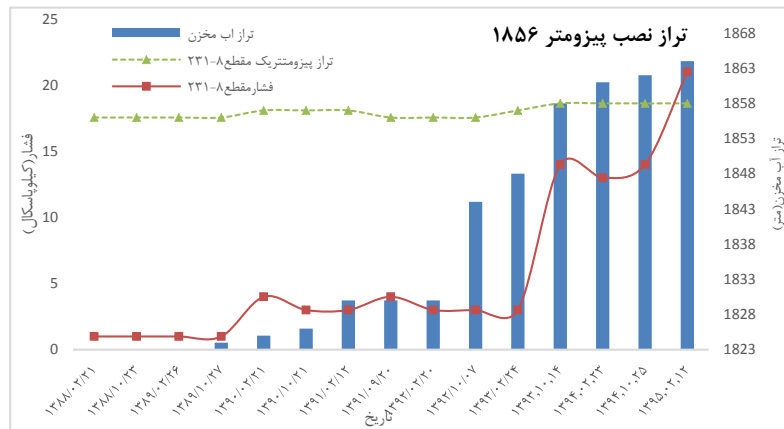
در تراز ۱۸۴۴ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در هسته رسی، روند فشار منفذی ایجاد شده در هسته رسی تا قبل از آبگیری نزدیک به صفر بوده و پس از آن روندی تقریباً صعودی را نشان می‌دهد به نحوی که در آخرین قرائت انجام شده مقدار فشار منفذی ایجاد شده در بالادست هسته رسی به ۱۰۴ کیلو پاسکال و در پایین دست هسته رسی به ۹۷ کیلو پاسکال



شکل (۳): تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای هسته در تراز ۱۸۴۴

ابتدای عملیات اجرایی، رطوبت خاک معادل رطوبتی است که مصالح پخش شده به تراکم موردنظر می‌رسد و طبقاً این رطوبت با شرایط اشباع فاصله زیادی داشته و بخشی از فضاهای خالی بین ذرات همچنان بدون آب مانده‌اند. بر اثر استمرار عملیات خاکی و افزایش فشار سربار، تراکم خاک در لایه‌های زیرین افزایش یافته و حجم فضاهای خالی کاهش می‌یابد که تداوم این امر منجر به وضعیتی خواهد شد که در آن شرایط مقدار آب موجود در لایه‌های رسی تمام فضاهای خالی را پر کرده و لایه خاک اشباع می‌شود.

در تراز ۱۸۵۶ متر ارتفاع از سطح دریا یک پیزومتر الکتریکی خاکریز در مرکز هسته رسی نصب شده است که در آخرین قرائت انجام شده پیزومتر نصب شده در هسته رسی فشاری در حدود ۲۰ کیلو پاسکال نشان می‌دهد شکل (۴). به‌طور کلی مشاهده می‌گردد با افزایش ارتفاع خاکریزی مقادیر فشار منفذی در داخل هسته افزایش یافته است و آن به دلیل وقوع پدیده تحکیم در اثر افزایش مداوم سربارهای ناشی از افزایش ضخامت خاکریزی است، بدین صورت که در



شکل (۴): تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای هسته در تراز ۱۸۵۶

هیدرولیکی به‌وجود نخواهد آمد و افزایش فشار منفذی در شرایط آبدگیری اولیه سد رخ داده که طبیعی است. نمودارهای رسم شده به‌صورت تصادفی از نتایج قرائت هفتگی پیزومترهای نصب شده در هسته سد سیوند از زمان نصب تا پس از آبدگیری اولیه استخراج شده است.

**بررسی نتایج ابزار دقیق پیزومترهای الکتریکی پی سد سیوند**

در مقطع ۲۳۱-۲۳۱ مجموعاً ۶ پیزومتر الکتریکی پی نصب شده است جدول (۴).

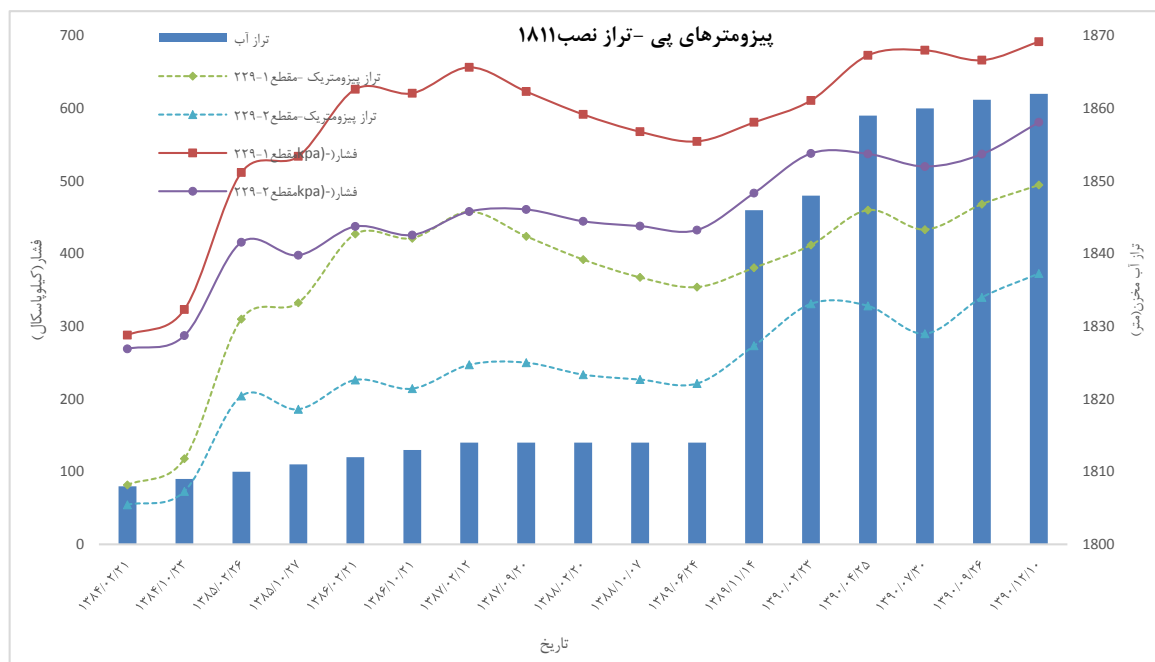
از این مرحله به بعد، افزایش بیشتر سربار بر اثر استمرار عملیات خاکریزی و ازدیاد ضخامت هسته، موجب بالا رفتن فشار آب منفذی شده و چون نفوذپذیری هسته رسی بسیار پایین و خروج آب از آن مستلزم زمان زیادی است، بنابراین شرایط بعدی حاکم بر هسته از نظر وضعیت فشارها، تابع سرعت نسبی افزایش سربار و خروج آب بوده و با توجه به اینکه سرعت عملیات خاکریزی چندان زیاد نبوده، ضمن بالا رفتن فشار آب منفذی در داخل هسته، بر اثر افزایش سربار به تدریج استهلاک فشارها صورت گرفته به‌گونه‌ای که خطر افزایش ناگهانی فشار آب منفذی و بروز پدیده شکست

جدول (۴): مشخصات پیزومترهای الکتریکی پی نصب‌شده در مقطع ۲۳۱-۲۳۱

نام ابزار	محل نصب	فاصله از محور (متر)	تراز نصب (متر ارتفاع از سطح دریا)	موقعیت نصب
EPF 231-1	پی	۵/۹۷	۱۸۱۱/۰۸	بالادست
EPF 231-2	پی	۵/۱۲	۱۸۱۱/۰۸	پایین‌دست
EPF 231-3	پی	۵/۹۷	۱۸۲۱/۸۰	بالادست
EPF 231-4	پی	۵/۱۲	۱۸۲۱/۸۰	پایین‌دست
EPF 231-5	پی	۱۸/۴۶	۱۸۲۱/۸۰	پایین‌دست
EPF 231-6	پی	۳۶/۱۶	۱۸۲۱/۸۰	پایین‌دست

آبگیری و در آخرین قرائت ارائه‌شده فشار پیزومتریک حدود ۷۰ متر و در پایین‌دست به ۵۸ متر فشار ستون آب نسبت به تراز نصب می‌رسد و اختلاف فشار بالادست نسبت به پائین‌دست به حدود ۱۲ متر می‌رسد، تراز پیزومتریک در این تراز در بالادست و پایین‌دست به ترتیب معادل ۱۸۴۹ و ۱۸۳۷ متر ارتفاع از سطح دریا می‌رسد شکل (۵).

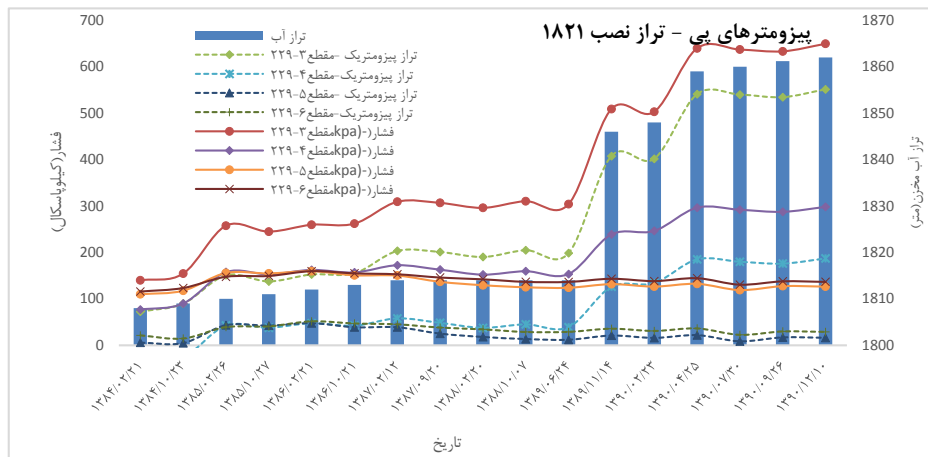
در تراز ۱۸۱۱ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در بالادست و پائین‌دست پی و به فواصل مساوی از محور نصب‌شده است. روند تغییرات فشار پیزومتریک در این تراز به‌گونه‌ای است که در زمان افزایش تراز خاکریزی روندی صعودی را نشان داده و در زمان توقف خاکریزی تقریباً سیر ملایم نزولی را نشان می‌دهد. این روند در دوره آبگیری به یک روند افزایشی تبدیل شده است. در بالادست پس از شروع



شکل (۵): تغییرات فشار منفذی در پیزومترهای پی در تراز ۱۸۱۱

پایین‌دست بیشتر است. ضمن آنکه این اختلاف با افزایش تراز دریاچه روندی افزایشی داشته که می‌تواند تا حدودی حاکی از عملکرد صحیح پرده آب‌بند باشد. پیزومترهای نصب‌شده در پایین‌دست نیز روند تقریباً یکسانی را با پیزومترهای همجوار خود نشان می‌دهند و تراز پیزومتریک محاسبه‌شده در این ابزار (EPF-229-5,6) به ترتیب ۱۸۰۲ و ۱۸۰۳ متر ارتفاع از سطح دریا می‌رسد و روند تقریباً یکسانی را در پایین‌دست نشان می‌دهد شکل (۶).

در تراز ۱۸۲۱ متر ارتفاع از سطح دریا دو پیزومتر در بالادست و پایین‌دست محور و دو پیزومتر الکتریکی همجوار پیزومترهای کاساگرانده در پایین‌دست محور نصب‌شده است شکل (۶). تراز پیزومتریک در بالادست و پایین‌دست در آخرین قرائت ارائه‌شده به ترتیب ۱۸۵۵ و ۱۸۱۹ متر ارتفاع از سطح دریا می‌رسد. همان‌طور که مشخص است رقوم تراز پیزومتریک در بالادست حدود ۳۶ متر نسبت به تراز

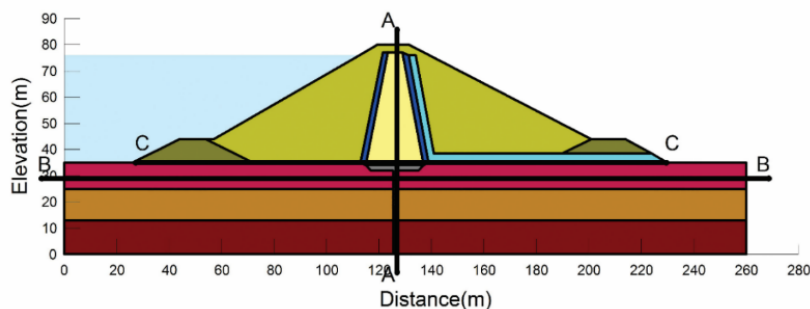


شکل (۶): تغییرات فشار منفذی در پیژومترهای پی در تراز ۱۸۲۱

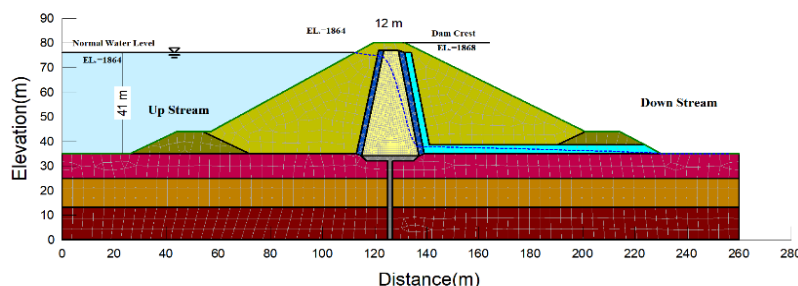
کلیه نتایج بر روی سه مقطع A-A و B-B، C-C مورد بررسی قرار خواهند گرفت. مقطع A-A از روی خط تقارن مقطع و داخل دیوار آب بند عبور نموده، در حالی که مقطع B-B از وسط عمق پی آبرفتی عبور می نماید و مقطع C-C در تراز ۳۵ متری کف سد و به صورت عرضی رسم می شوند (شکل ۷). شبکه اجزای محدود در مدل سد سیوند مطابق شکل (۸) است. همان طور که در این شکل ملاحظه می گردد، با توجه به افزایش فشار آب حفره های در هسته سد و همچنین وجود دیوار آب بند در ارتفاع های مختلف، شبکه المان ها در هسته و دیوار آب بند ریزتر از سایر نقاط در نظر گرفته شده است. از المان های مربعی در شبکه اجزاء محدود و همچنین از شرایط مرزی استاندارد موجود در برنامه برای مرزهای مدل استفاده شده است. همچنین جهت مدلسازی سد و بررسی پارامترهای مختلف از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است.

### مدل سازی در نرم افزار Geostudio

هدف اصلی، این پژوهش بررسی تغییرات فشار آب حفره ای و گرادیان هیدرولیکی و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از قرائت میدانی ابزار دقیق سد است. در مدل سازی نرم افزار Geostudio اثر تغییرات عوامل مختلفی همچون عمق نفوذ دیوار آب بند به داخل پی آبرفتی و مشخصه های مقاومتی مصالح هسته رسی و پی آبرفتی مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت شیب بالادست هسته سد خاکی از فیلتر جهت جداسازی پوسته سد از هسته رسی استفاده شده است. همچنین در شیب پایین دست هسته سد خاکی نیز از فیلتر به منظور جلوگیری از حرکت دانه ها و از زهکش جهت جلوگیری از ورود خطوط جریان به شیب پایین دست پوسته استفاده شده است. در شکل (۷) مدل سد سیوند در نرم افزار Geostudio نشان داده شده است.



شکل (۷): مدل ساخته شده سد خاکی سیوند در نرم افزار Geostudio



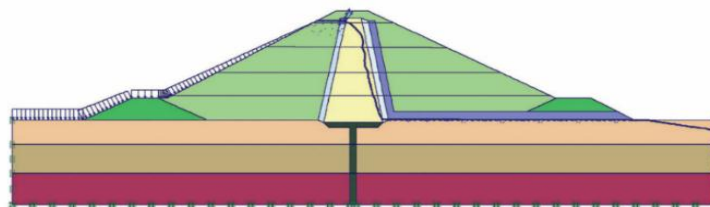
شکل (۸): شبکه اجزاء محدود استفاده شده برای مدلسازی سد سیوند (Geostudio)



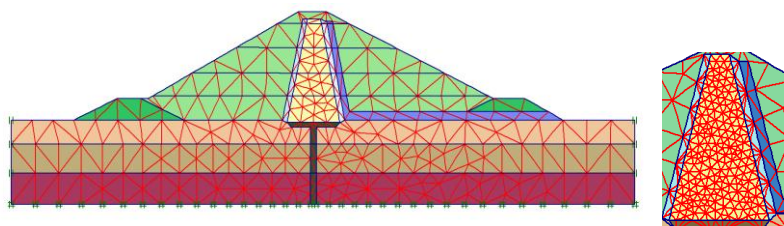
### مدل‌سازی در نرم‌افزار Plaxis

مش‌بندی خیلی ریز در آن استفاده شده است (شکل ۱۰). همچنین برای مدل‌سازی پی از مدل رفتاری الاستوپلاستیک مبتنی بر معیار موهر-کولمب<sup>۱</sup> و برای مصالح بدنه سد از مدل سخت‌شوندگی<sup>۲</sup> که در نرم‌افزار وجود دارد، استفاده گردید. مدل موهرکولمب از ساده‌ترین مدل‌های رفتاری خاک می‌باشد و از آنجایی که در این مدل بیشتر پارامترهای اساسی خاک، اعم از خمیری و کشسان وجود دارد برای مدل کردن اکثر حالات رفتاری خاک مناسب است. مدل سخت‌شونده برای شبیه‌سازی تراکم برگشت‌ناپذیر خاک تحت فشار اولیه به کار می‌رود و همچنین برای شبیه‌سازی رفتار ماسه و شن و هم برای انواع نرم‌تر خاک همانند سیلت‌ها و رس‌ها به کار می‌رود.

مدل هندسی سد سیوند توسط مدل هندسی کرنش مسطح مدل می‌گردد و مش‌بندی توسط عناصر ۶ گره‌ای مدل شده است (شکل ۹). محاسبات شامل شش فاز است. اولین فاز محاسباتی شامل لایه فونداسیون (سه لایه) و پرده آب‌بند است. از فونداسیون تا تاج سد شامل ۴ فاز ۱۰ متری و ۱ فاز ۶ متری می‌باشد. مش‌بندی در برنامه Plaxis به صورت خودکار انجام می‌شود و می‌بایست اندازه مش‌ها را به صورت نسبی تعیین نماییم. در این مدل از مش‌بندی ریز استفاده شده است. با توجه به اینکه جهت آنالیز تراوش هسته سد از حساسیت و اهمیت بیشتری برخوردار است از



شکل (۹): مدل ساخته‌شده سد خاکی سیوند در نرم‌افزار Plaxis



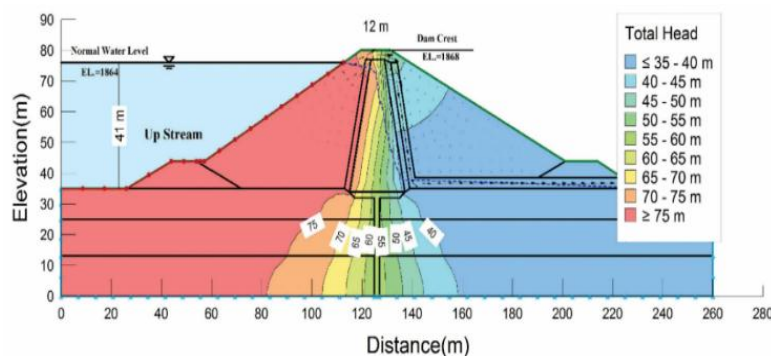
شکل (۱۰): شبکه اجزاء محدود استفاده‌شده برای مدل‌سازی سد سیوند (Plaxis)

است. خط فراتیک به دلیل نفوذپذیری زیاد پوسته بالادست افتی را در این بخش نشان نمی‌دهد و گرادیان هیدرولیکی قابل توجه در هسته مرکزی مشاهده می‌شود که گواهی بر عملکرد صحیح هسته، یعنی مقابل با نفوذپذیری جریان آب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ترازوی خطوط هم‌فشار در جسم سد خاکی، حاکی از تداوم جریان تراوشی پایدار در بدنه سد خاکی است.

### نتایج و بحث

#### تحلیل نتایج مدل‌سازی عددی و تغییرات گرادیان هیدرولیکی

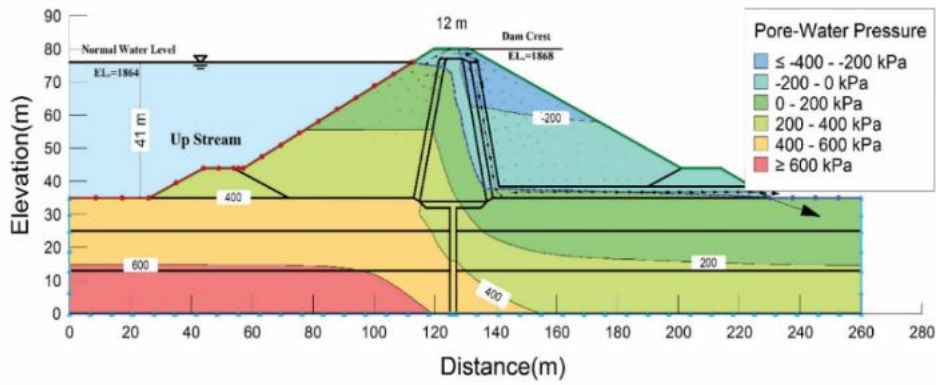
در این بخش به بررسی مسئله تراوش پرداخته شده است. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ شمارگرهای مربوط به خطوط پتانسیل هد کل و فشار آب حفره‌ای در سد خاکی سیوند مدل‌سازی شده با نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis نشان داده شده



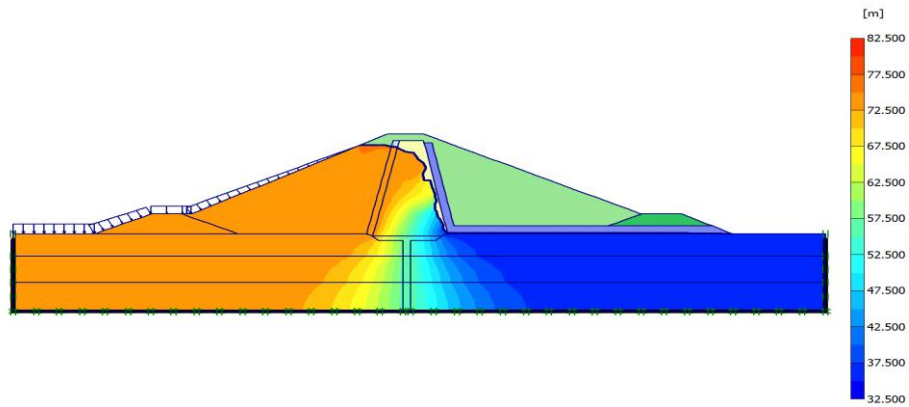
شکل (۱۱): شمارگرهای مربوط به هد کل در سد خاکی سیوند (Geostudio)

<sup>۱</sup>.Hardening Soil Model

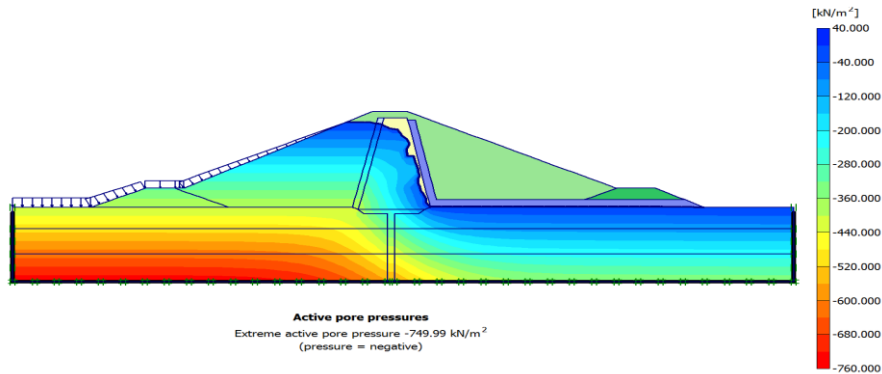
<sup>۲</sup>.Mohr-Coulomb



شکل (۱۲): شمارگرهای مربوط به فشار آب حفره‌ای در سد خاکی سیوند (Geostudio)



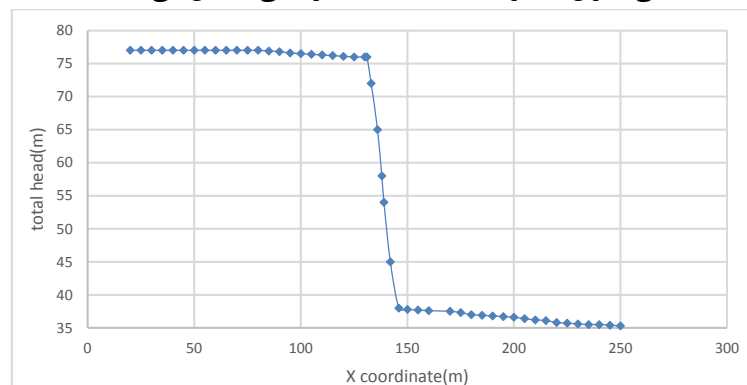
شکل (۱۳): شمارگرهای مربوط به هد کل سد خاکی سیوند (Plaxis)



شکل (۱۴): شمارگرهای مربوط به فشار آب حفره‌ای سد خاکی سیوند (Plaxis)

بسیار کم است و پس از رسیدن به هسته سد خاکی میزان هد با شیب زیادی کاهش می‌یابد و پس از عبور از هسته سد خاکی نیز میزان تغییرات دوباره به مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد.

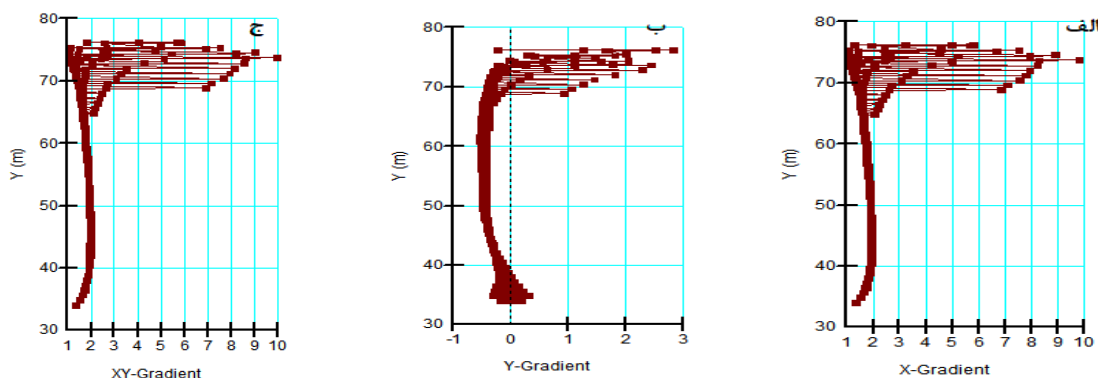
همچنین در شکل (۱۵) تغییرات هد آب در راستای افقی در مقطع C-C در سد خاکی سیوند، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) ملاحظه می‌گردد تا قبل از رسیدن به هسته سد خاکی میزان تغییرات هد



شکل (۱۵): تغییرات هد آب در مقطع C-C در سد خاکی سیوند

در این قسمت به بررسی تغییرات گرادیان هیدرولیکی در راستای عمق و در راستای افقی پرداخته شده است. شکل (۱۶) میزان تغییرات گرادیان هیدرولیکی، در راستای عمق، در مقطع A-A و در جهت‌های مختلف را در سد خاکی سیوند نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد میزان تغییرات گرادیان در جهت افقی، بزرگ‌تر از میزان گرادیان هیدرولیکی در جهت قائم است که این مسئله با توجه به خطوط جریان منطقی است. با توجه به نمودار مربوط به گرادیان هیدرولیکی در جهت افقی با افزایش عمق در هسته سد خاکی از میزان گرادیان هیدرولیکی کاسته می‌شود که این مسئله با توجه به نفوذپذیری کم هسته سد خاکی منطقی است؛ اما در ناحیه پی آبرفتی و در محل اتصال دیوار آب‌بند به هسته سد خاکی، میزان گرادیان هیدرولیکی

افزایش خواهد داشت که این مسئله ناشی از افزایش نفوذپذیری مصالح در پی آبرفتی نسبت به هسته سد خاکی است. میزان تغییرات گرادیان هیدرولیکی در جهت افقی به دلیل این فرض که نفوذپذیری پی آبرفتی در تمام عمق ثابت است، بدون تغییر خواهد ماند. در مورد نمودار مربوط به گرادیان هیدرولیکی در جهت قائم می‌توان بیان نمود که میزان تغییرات گرادیان هیدرولیکی در جهت قائم و در راستای عمق در این حالت تقریباً یکنواخت است و تنها در محل اتصال دیوار آب‌بند به هسته سد خاکی، حالت بحرانی خواهد داشت و همچنین ملاحظه می‌گردد که در تمام طول دیوار آب‌بند نیز مقدار تقریباً ثابتی خواهد داشت. در مورد تغییرات گرادیان هیدرولیکی در جهت XY نیز وضعیت نمودار مانند میزان تغییرات در راستای افقی است.



شکل (۱۶): تغییرات گرادیان هیدرولیکی در مقطع A-A (سد خاکی سیوند)

الف: در جهت X ب: در جهت Y ج: در جهت XY

آب‌بند و پی‌زومترهای EPF-2 و EPF-4 در سمت پایین‌دست و بسیار نزدیک به آن قرار دارند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشاهده می‌شود، میزان ارتفاع فشار در سمت پایین‌دست پرده آب‌بند (هم در نتایج مدلسازی و هم در قرائت‌های ابزار دقیق) دچار افت ناگهانی شده که این امر نشان‌دهنده عملکرد صحیح پرده آب‌بند است.

**مقایسه نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی**  
در جدول (۵) مقادیر فشار آب حفره‌ای قرائت‌شده توسط پی‌زومترها و نتایج حاصل از تحلیل عددی با نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis به صورت ارتفاع فشار ارائه شده است. پی‌زومترهای EPF-1 و EPF-3 در سمت بالادست پرده

جدول (۵): مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده فشار آب منفذی هسته و پی سد سیوند

پی‌زومتر	ارتفاع از سطح دریا (m)	مقادیر ابزار دقیق هد آب منفذی (m)	مقادیر پیش‌بینی شده هد آب منفذی Plaxis (m)	مقادیر پیش‌بینی شده هد آب منفذی Geostudio (m)
EPE-1	۱۸۰۶/۳۲	۴۶/۷۵	۵۱/۲	۴۸/۴
EPE-2	۱۸۳۲/۹۸	۲۰/۹	۲۲/۹۸	۱۹/۲۱
EPE-5	۱۸۳۲/۸۴	۶/۵۶	۵/۲۷	۷/۸۵
EPE-6	۱۸۴۴/۹۷	۱۰/۷۱	۱۲/۰۸	۱۳/۲۱
EPE-8	۱۸۴۴/۷۶	۳/۳۹	۴/۵۷	۲/۹۹
EPF-1	۱۸۱۱/۲	۷۰/۲۶	۷۴/۹	۷۳/۵۱
EPF-2	۱۸۱۱/۲	۵۸/۰۹	۶۱/۸	۶۳/۹۴
EPF-3	۱۸۲۱/۱۲	۶۵/۹۲	۶۹/۵	۶۸/۴۶
EPF-4	۱۸۲۱/۱۲	۲۶/۶۴	۲۶/۱	۲۸/۷۰
EPF-5	۱۸۲۱/۱۲	۱۲/۴۲	۱۰/۹	۹/۵۴
EPF-6	۱۸۲۱/۱۲	۱۳/۷	۱۵/۷	۱۲/۲۸

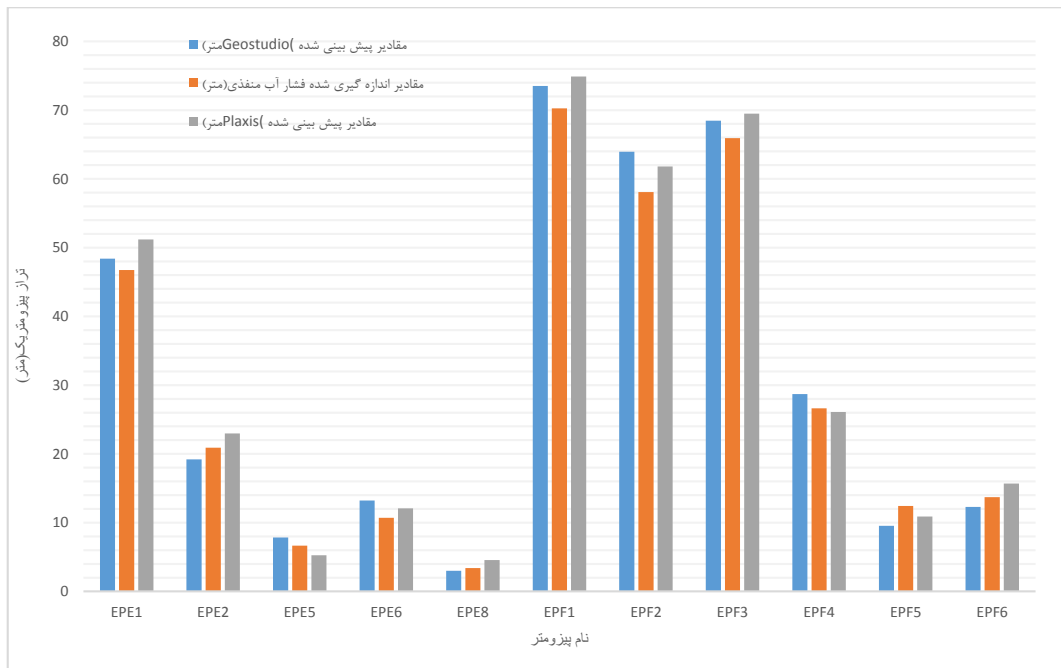
قرائت شده با نتایج فشار حفره‌ای نقاط معادل در مدل‌سازی عددی سد سیوند مقایسه گردیده است. ذکر این نکته لازم است که محل بررسی نقاط نسبت به مرکز تقارن هسته سد رسی مکان‌یابی گردیده است. بررسی نمودار ۱۷ نشان‌دهنده این مسئله است که مقادیر به‌دست‌آمده از نتایج ابزار دقیق و نتایج مدل‌سازی عددی وضعیت رفتاری مشابهی خواهند داشت. مسئله دیگری که باید در نظر گرفته شود این است که تغییرات تدریجی تراز آب در پشت سد نیز بر مقادیر فشار حفره‌ای تأثیر خواهد داشت که این موضوع در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Geostudio لحاظ نمی‌گردد.

به‌منظور بررسی دقیق آماری نتایج، از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطاها<sup>۱</sup> RMSE و خطای استاندارد نسبی<sup>۲</sup> RSE که در روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند، استفاده شده است.

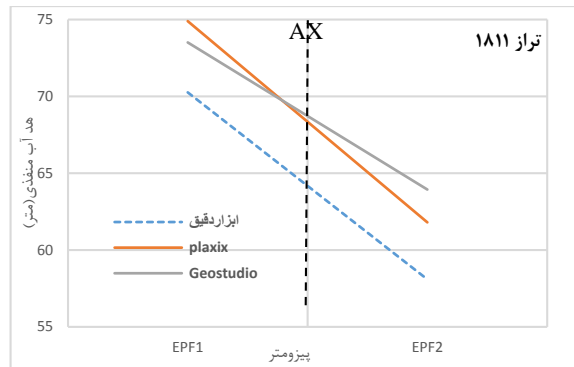
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_o - Z_p)^2} \quad (2)$$

$$RSE = \frac{RMSE}{Z_{ave}} \quad (3)$$

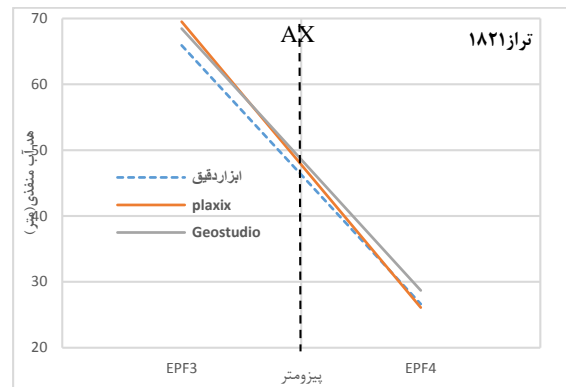
که در آن‌ها  $Z_o$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $Z_p$  مقادیر مشاهداتی،  $Z_{ave}$  متوسط مقادیر مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد. از این روش درصد دقت نتایج مقادیر مشاهداتی با نرم‌افزار Geostudio ۹۰/۷۳ درصد و با نرم‌افزار Plaxis ۸۶/۳۱ درصد حاصل شد که بیانگر انطباق مقادیر اندازه‌گیری شده با نرم‌افزارها است.



شکل (۱۹): مقایسه مقادیر فشار آب حفره‌ای نتایج ابزارگذاری و نتایج مدل‌سازی عددی هسته و پی سد سیوند



شکل (۱۷): افت ارتفاع فشار از بالادست به سمت پایین دست هسته (تراز ۱۸۱۱)



شکل (۱۸): افت ارتفاع فشار از بالادست به سمت پایین دست هسته (تراز ۱۸۲۱)

در شکل (۱۹) مقادیر فشار آب حفره‌ای ارائه شده از نتایج ابزارگذاری و نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی ارائه گردیده است. به همین منظور مقادیر فشار حفره‌ای

<sup>۱</sup> Root Mean Square Error

<sup>۲</sup> Relative Standard Error

## نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

بر اساس داده‌های ارائه‌شده توسط پیژومترهای نصب‌شده در داخل پی و طرفین پرده آب‌بند، افت زیادی در تراز پیژومترهای پائین‌دست پرده آب‌بند مشاهده می‌شود که عملکرد مناسب این پرده را نشان می‌دهد. این افت در داخل هسته رسی به‌عنوان یک هسته نفوذناپذیر نشانگر عملکرد مناسب هسته است. در این پژوهش، مقایسه نمودارهای به‌دست‌آمده از نتایج ابزار دقیق و نیز تحلیل‌های عددی صورت گرفته نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده توسط پیژومترهای الکتریکی و نتایج نرم‌افزارها در هسته رسی سد وجود دارد و می‌توان به عملکرد سد از لحاظ تراوش اطمینان نمود. به‌طور کلی نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis برنامه‌های قوی و مناسبی برای مدلسازی و تحلیل سدهای خاکی می‌باشند. بررسی تغییرات گرادیان هیدرولیکی در راستای افق در سد خاکی سیوند نشان‌دهنده این مسئله است که تا قبل از رسیدن به هسته سد خاکی میزان تغییرات هد بسیار کم است و پس از رسیدن به هسته سد خاکی میزان هد با شیب زیادی کاهش می‌یابد و پس از عبور از هسته سد خاکی نیز میزان تغییرات دوباره به مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر به‌کارگیری مصالح با نفوذپذیری مناسب در طراحی و اجرای هسته سد خاکی و همچنین تأثیر آن در پایداری سد خواهد بود. بررسی تغییرات گرادیان هیدرولیکی در راستای عمق در سد خاکی سیوند نشان داد میزان تغییرات گرادیان در جهت افقی بزرگ‌تر از میزان گرادیان هیدرولیکی در جهت قائم است که این مسئله با توجه به خطوط جریان منطقی است. با افزایش عمق در هسته سد خاکی از میزان گرادیان هیدرولیکی کاسته می‌شود که این مسئله با توجه به نفوذپذیری کم هسته سد خاکی منطقی است؛ اما در ناحیه پی آبرفتی و در محل اتصال دیوار آب‌بند به هسته سد خاکی میزان گرادیان هیدرولیکی افزایش خواهد داشت که این مسئله ناشی از افزایش نفوذپذیری مصالح در پی آبرفتی نسبت به هسته سد خاکی است. میزان تغییرات گرادیان هیدرولیکی در جهت قائم و در راستای عمق در سد خاکی سیوند تقریباً یکنواخت است و تنها در محل اتصال دیوار آب‌بند به هسته سد خاکی حالت بحرانی خواهد داشت و همچنین ملاحظه می‌گردد که در تمام طول دیوار آب‌بند نیز مقدار تقریباً ثابتی خواهد داشت. بررسی کلی عملکرد پیژومترهای سد سیوند نشان می‌دهد که از بالادست به سمت پایین‌دست فشار حفره‌ای کاهش یافته که

این مسئله در بحرانی‌ترین مقطع سد سیوند بیانگر حضور شبکه جریان مناسب و عادی می‌باشد و بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت دیوار آب‌بند عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است. بررسی مقادیر فشار آب منفذی به‌دست‌آمده از نتایج ابزار دقیق و نتایج حاصل از مدلسازی عددی سد سیوند بیانگر این مسئله است که نتایج مشاهده‌ای و نتایج مدل‌سازی عددی، وضعیت رفتاری مشابهی خواهند داشت. اختلاف مقادیر فشار آب منفذی به‌دست‌آمده از نتایج ابزار دقیق در مقایسه با نتایج تحلیل‌های عددی می‌تواند از مسائل اجرایی، نوع مصالح و درصد تراکم به‌کاررفته و زهکشی در بالادست و پایین‌دست هسته سد ناشی شود که ممکن است به کاستی‌های نرم‌افزار هم برگردد. همچنین تغییرات تدریجی تراز آب در پشت سد نیز بر مقادیر فشار حفره‌ای تأثیر خواهد داشت که این موضوع در مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار Geostudio لحاظ نمی‌گردد ولی به‌طور کلی تطابق مقادیر ارائه‌شده با نرم‌افزار قابل قبول بوده و بیش از ۹۰ درصد انطباق را نشان می‌دهد. همچنین میزان انطباق داده‌های مشاهداتی با نرم‌افزار Plaxis معادل ۸۶ درصد است.

## مراجع

- ۱- جنتی، پ. محمدی، م. (۱۳۸۹). "بررسی اضافه فشار آب منفذی ایجادشده به‌وسیله زلزله در هسته رسی سدهای خاکی تحت تأثیر شکل هسته". نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران.
- ۲- رحیمی، ج. (۱۳۸۹). "سدهای خاکی". چاپ سوم. انتشارات دانشگاه تهران.
- ۳- عبادی، ح. امین فر، م. ح؛ و فرهمند آذر، ب. (۱۳۸۴). "بررسی روند تغییرات فشار آب منفذی در بدنه و پی سد خاکی با استفاده از ابزار دقیق و مقایسه آن با نتایج تحلیلی". پنجمین اجلاس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهید باهنر تهران.
- ۴- گزارش شرکت مهندسی مشاور سکو. (۱۳۹۰). "سیمای طرح سد خاکی سیوند شیراز".
- ۵- نایب زاده، ر. محمدی، م. (۱۳۷۹). "تحلیل استاتیکی سدهای خاکی تحت تأثیر شکل هسته رسی". مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- 6-Abhilasha, P.S. Antony Balan, T.G. (2014), "Numerical Analysis of Seepage in Embankment Dams", Journal of Mechanical and Civil Engineering, 4, pp13-23.
- 7-Clough, R.W. Woodward, R.J. (1967), "analyses of Embankment Stresses and Deformations", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.93, pp: 529-549.
- 8-Clough, G.W. Duncan, J.M. (1971), "Finite element analyses of retaining wall behavior", ASCE 97(12), PP: 1657-1674.
- 9-Duncan J. M. Chang C.Y. (1970), " Nonlinear Analysis of Stress & Strain in Soil", Journal of the Soil

- 13-Nayebzadeh, R. Mohammadi, M. (2011), "The Effect of Impervious Clay Core Shape on the Stability of Embankment Dams", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, Springer-link, Vol. 29, No. 4, pp: 627-635
- 14-Nobari, E.S. Duncan, J.M. (1972), "Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rock fill dams", contract report S-72-2 U.S. University of California, Department of Civil Engineering, pp:1-198
- 15-Zienkiewicz O.C. (1977), "The finite element method in engineering science". Third Edition, McGraw-Hill, London.
- Mechanics and Foundations Division, Vol. 96, pp:1629-1653.
- 10-Geostudio. (2012), "Seepage Modeling with SEEP/W", Geostudio Manuals, Version, 8.15.1.
- 11-Karoui.H.Bouassida, M. (2016), "Assessment of observed of behavior of Sidi El Barrak Dam (Tunisia)", technical paper, PP: 34-44
- 12-Rashidi.M, Haeri. M. (2017), "Evaluation of behaviors of earth and rock fill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, PP: 709-725

## **Evaluation of pore water pressure foundation and core of Sivand dam after the first dewatering period in comparison with the actual instrument results**

Mehdi Komasi <sup>\*1</sup>  
Behrang Beiranvand<sup>2</sup>

### **Abstract**

Increasing the pore water pressure in the body of dams will reduce the effective stress and thus reduce the shear strength of the body materials of the dam, which can lead to dangerous results and cause instability of earth dams. In this study, using Plaxis and Geostudio finite element software, the results of instrumentation of the pore water pressure of the foundation and the core of the Sivand earth dam were calculated after the first dewatering period and compared with the results of the observational data. According to nonlinear behavior of earth dam, behavioral models of Mohr–Coulomb and hardening soil model are used to model the dam and body materials. The study of hydraulic gradient variations and pore water pressure in Sivand dam showed that suitable permeability material was used in the construction of the dam. Also, the results of evaluation of Plaxis and Geostudio models with instrumentation data based on relative standard error calculation showed 86.31% and 90.73% compliance, respectively, indicating proper clay core and cut off wall performance is due to changes in reservoir water level.

### **Keywords**

Pore water pressure, Sivand Earth dam, cutoff wall, Geostudio, Plaxis.

---

<sup>1\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran, [komasi@abru.ac.ir](mailto:komasi@abru.ac.ir).

<sup>2</sup> Ms. Graduated, Water Engineering and Hydraulic Structures, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran.