

پیش‌بینی نشست از پی سد خاکی همراه با دیوار آب بند با استفاده از روش محاسبات نرم

سینا حقیقی نائینی^۱، میثم بیات^۲، سید سعید اسلامیان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

نام نویسنده مسئول:

میثم بیات

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳

چکیده

سد خاکی همواره مناسب‌ترین و در دسترس‌ترین سازه در بحث سازه‌های مربوط به آب بوده است و همچنین مناسب جهت تغذیه سفره آب زیرزمینی می‌باشد. در مقابل مزایای سدهای خاکی، مشکل اساسی در کاربرد این نوع سدها، نشست آب در بدنه سد و پی آن می‌باشد. یکی از راه‌های کنترل نشست از پی، استفاده از دیوار آب‌بند است. در این پژوهش بدون استفاده از روش‌های محاسباتی رایج مانند شبکه جریان و یا طراحی با استفاده از عرض سد و ارتفاع آب پشت سد، محاسبه جریان نشست به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار GeoStudio صورت گرفته است. نمونه‌ای از سد خاکی با سطح آبگیر مشخص مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای مختلف سد مانند ضرایب نفوذپذیری اجزای مختلف و ارتفاع دیوار آب‌بند و محل احداث دیوار آب‌بند نسبت به هسته سد به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است و نتایجی برای میزان نشست از پی سد در حالت‌های مختلف به دست آمده است. همچنین با استفاده از نرم افزار Genexprotolls.5 بر اساس دیتاهای به دست آمده و رگرسیون سازی تحت برنامه‌سازی ژنتیک رابطه‌ای جهت محاسبه میزان نشست از پی سد بر اساس متغیرهای معرفی شده به دست آمده است. نتایج نشان داد که استفاده از دیوار آب‌بند در سد خاکی، میزان ترواش از پی سد را کاهش داده است. به گونه‌ای که با جابجایی محل دیواره آب‌بند به سمت پایین دست و همچنین با افزایش ضریب نفوذپذیری پوسته سد، میزان نشست از پی سد کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ضریب نفوذپذیری هسته سد تاثیر ناچیزی در میزان نشست از پی سد دارد. از طرف دیگر افزایش ضریب نفوذپذیری پی سد میزان دبی نشست از پی را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

واژگان کلیدی: سد خاکی، دیوار آب‌بند، روش المان محدود، الگوریتم ژنتیک، نشست.

مقدمه

در سدهای خاکی به دلیل پیوسته نبودن مصالح معمولاً تنها راه مقابله با نیروهای وارد بر بدنه سد استفاده از وزن است، بنابراین سد خاکی به ناچار باید به صورت وزنی و با مقطع دوزنقه‌ای شکل ساخته شود. اما از آنجایی که بدنه سد از مصالح خاکی یعنی از ذرات جدا از هم و بدون ملات ساخته می‌شود؛ در مقابل آب نفوذپذیر خواهد بود و برای جلوگیری از نشت و تلفات آب، باید تدابیر لازم صورت گیرد. سوابق بروز خسارت ناشی از انهدام سدهای خاکی در ایران و جهان نشان از نتایج ناخوشایند و بروز اثرات مخرب زیست محیطی داشته است. لذا نگاه همه جانبه، بررسی تکمیلی، اصرار بر محکم سازی و هر گونه تدابیری که به نوعی این احتمال را کاهش دهد مهم بوده و باید آن را نوعی سرمایه گذاری در نظر گرفت. تخریب سدهای خاکی می‌تواند علت‌های متفاوتی داشته باشد که این عوامل تخریبی به سه گروه اصلی قابل تقسیم است: (۱) تخریب ناشی از نشت آب، (۲) تخریب ناشی از شکست هیدرولیکی، (۳) تخریب ساختمانی. از آنجاکه سد خاکی یک محیط متخلخل بوده، احتمال وقوع نشت در آن وجود دارد و در این حالت اگر شرایط مناسب برای فرسایش مهیا شود، آنگاه نشت از پی یا بدنه سد می‌تواند آثار مخرب جبران‌ناپذیری داشته باشد. چنانچه زهکش‌های مناسبی برای پایاب سد در نظر گرفته نشده باشد یا به هر دلیلی زهکش‌ها کارایی خود را از دست داده باشند، خاک در پایین دست اشباع شده و فشار آب موجود می‌تواند باعث تخریب پی یا بدنه سد شود. در حالت‌هایی خاص ممکن است دلیل عدم زهکشی مناسب، پدیده پایپینگ^۱ به شکل حفراتی بزرگ در بدنه و پی سد ایجاد شود و وقتی این حفرات نزدیک مخزن باشد احتمال خطر سیل افزایش می‌یابد. عواملی که بر پایپینگ اثر می‌گذارند عبارتند از: وجود کانال‌های آب در پی و بدنه سد، پیشروی زهکش پنجه‌ای، نشست نامساوی در بدنه سد، وجود ریشه درختان و گیاهان، وجود املاح و مصالح ضعیف در بدنه سد، ضعف اتصال بدنه با پی، دانسیته کم مصالح، فعالیت حیوانات و اضافه فشار آب منفذی. عوامل موثر در خرابی ناشی از نشت از پی یا بدنه سد عبارتند از نیروهای فرساینده، اضافه فشار آب منفذی، روانگرایی مصالح و فرسایش داخلی.

یکی از ضروری‌ترین تحلیل‌ها که در طراحی بسیاری از اجزای سد تاثیر گذار می‌باشد، تحلیل تراوش است. با تحلیل تراوش یک سد خاکی، مقدار دبی نشتی، مقدار فشار آب منفذی در هر نقطه از بدنه سد، مقدار گرادیان‌های هیدرولیکی در قسمتهای مختلف سد مانند هسته و نقاط خروج آب از بدنه مشخص خواهد شد. یکی از راهکارهای کاهش نشت در سد خاکی و مقابله با آن به کار بردن دیوار آب‌بند^۲ در پی سد خاکی است. در مطالعه لیو و همکاران، تغییر شکل و تنش دیوار آب‌بند در سد سنگریزه‌ای با هسته رسی بر روی شیب مورد تجزیه و تحلیل عددی قرار گرفت [۱]. تعدادی از عوامل موثر بر رفتار تنش-کرنش دیوار آب‌بند مورد بررسی قرار گرفت. این عوامل شامل مسلحی غیر مسلح بودن لایه سربار، روش مدلسازی برای تماس میان فازی بین دیوار آب‌بند و خاک اطراف، مدول بتن دیوار آب‌بند و الگوی اتصال بین دیوار آب‌بند و هسته رسی است. نتایج نشان داد که مسلح کردن لایه سربار، انتخاب بتن پلاستیک با مدول کم و مقاومت بالا و بهینه سازی اتصال بین دیوار آب‌بند و هسته رسی سد، اقدامات موثری جهت کاهش تغییر شکل‌ها و تنش‌های فشاری دیوار آب‌بند است [۱]. یوان و ژونگ، تجزیه و تحلیل سه بعدی نشت نامحدود در سدها با روش المان چهارگانه را مورد مطالعه قرار دادند که از نتایج برای تحلیل سه بعدی کنترل تراوش نامحدود استفاده شده است [۲]. نتایج نشان می‌دهد وجود لایه‌های آب‌بند در مرکز سد همگن به میزان قابل توجهی نشت از سد را کاهش می‌دهد. حالت خطی الاستیک^۳ و آسیب پلاستیک^۴ دیوار آب‌بند بتنی ساخته شده در بارگذاری عمیق به وسیله یو و همکاران مورد تحلیل قرار گرفت [۳]. در این مطالعه یک روش سه بعدی اجزا محدود (FE) برای ایجاد شبیه سازی ساخت و ساز سد و فرایندهای آبیگری سدهای دارای هسته بتن آسفالتی ایجاد شد. در این تحقیق، مواد شنی/سنگریزه‌ای با استفاده از مدل دانکن-چانگ^۵ و فاز بین دیوار آب‌بند بتنی و مصالح پی با استفاده از عناصر بین فازی که از یک مدل تنش-کرنش هاپرپولیک

¹ Piping² Cut-of-wall³ LINEAR ELASTIC⁴ Plastic-damage⁵ Duncan-Chang

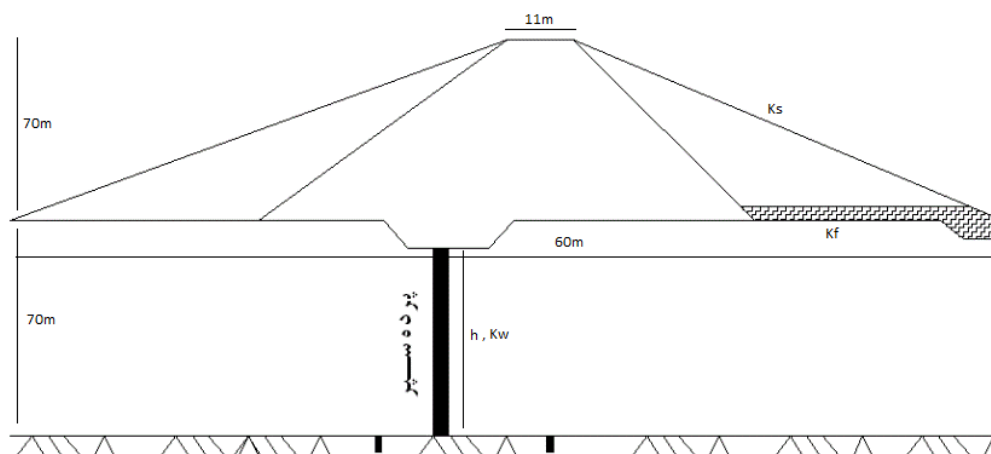
مماسی^۶ پیروی می کنند، مدل سازی شده است. همچنین برای مدل سازی دیوار آب بند بتنی، از مدل های خطی الاستیک و پلاستیک استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که مدل آسیب پلاستیک نسبت به مدل الاستیک در توصیف رفتار مکانیکی دیوار آب بند بتنی بیشتر قابل اعتماد است همچنین مدل آسیب پلاستیک می تواند برای ارزیابی ایمنی دیوارهای آب بند بتنی ساخته شده در بارگذاری های عمیق استفاده شود [۳]. آتانی و همکاران نیز نشت و پایداری سد خاکی با استفاده از روش اجزای محدود را تحلیل نمودند. این مطالعه نشان داد که افزایش مدول یانگ هسته و پوسته منجر به کاهش جابجایی حداکثر تاج شده و تغییر در زاویه اصطکاک داخلی نقش حیاتی در تحقق معیارهای پایداری کلی دارد [۴]. خرابی هایی که در پی سدها بر اثر تراوش و به دلیل شسته شدن دانه های خاک به وقوع پیوسته نیز برای اولین بار توسط ترزاقی بیان شد. همچنین ترزاقی به اهمیت و اثر نیروهای که بر اثر نشت آب در سدهای خاکی و بتنی بوجود می آیند در پایداری سد خاکی توجه نمود. از سالهای ۱۹۳۰ به بعد، پیشرفت های عمده ای درباره حل مسئله تراوش و جریان آب در خاک، با سطح آزاد، جریان آب در مصالح غیرایزوتروپیک و خصوصیات جریان در مرز دو مصالح مختلف، انجام گرفت [۵]. بعنوان مثال داریسی رابطه ساده خود را برای جریان آب در خاک تا آنجا که مربوط به مسئله تراوش در سد خاکی می شود، ارائه نمود [۶]. کوزنی برای جریان در یک قشر نفوذناپذیر افقی منتهی به یک قشر نفوذپذیر افقی دیگر (نظیر زهکش افقی در سد خاکی) راه حلی تئوری برای مسئله تراوش با سطح آزاد ارائه نمود [۷]. در این زمینه می توان به تحقیق مطهری نژاد اشاره نمود که بر روی سد خاکی همگن انجام شده و با مطابقت فرمول های کوزنی با نتایج حاصل از تحلیل المان محدود به نتایجی جهت محاسبه دبی تراوش پرداخته است [۸]. در زمینه کنترل نشت، سیدی و همکاران به کنترل سه بعدی نشت در سد اعلی دولت پرداختند [۹]. آنها نشت آب در حالت سه بعدی از پی و بدنه سد را به کمک نرم افزار SEEP-3D به روش عددی اجزاء محدود مورد تحلیل قرار دادند. نتایج بیانگر تاثیر مثبت سیستم های کنترل و به طور کلی کاهش نشت در حالت استفاده از دیوار آب بند به میزان ۶۴۰۱۸ مترمکعب بود [۹]. اهری آیش احمدلو و همکاران نیز به مطالعه اندرکنش خاک و آب و عوامل موثر در شکست سدهای خاکی پرداختند [۱۰]. نتایج نشان داد اغلب مکانیزم های شکست اشاره شده به تنهایی قادر به ایجاد خرابی و شکست در سدها نشده بلکه عوارض ناشی از مجموعه ای از آنها و برآیند نیروهای مخرب حاصل از مکانیزم های مختلف و همچنین برخی مواقع اضافه شدن یک نیروی خارجی مانند زمین لرزه یا سیلاب هایی با دوره بازگشت بالا موجب شکست در سدهای خاکی می شوند [۱۰]. در زمینه تحلیل های عددی، موهبت زاده و همکاران، نشت در سدهای خاکی با هسته رسی را به وسیله نرم افزار SEEP/W مورد تحلیل قرار دادند [۱۱]. نتایج حاصل از مدل سازی حاکی از اختلاف معناداری میان یافته های شبیه سازی شده و داده های مشاهداتی بوده به طوری که داده های برآوردی در حدود دو برابر مقدار واقعی بودند. همچنین با کاهش ۳۰٪ ضرایب نفوذپذیری، مقادیر نشت برآورد شده به وسیله مدل به میزان ۵۰٪ کاهش یافته است [۱۱]. در ارتباط با تحقیقات دارای مطالعه موردی، هیانگ سو و همکاران پژوهشی در ارتباط با سد سنگریزه ای با هسته رسی روی رودخانه ناک دنگ جهت تعیین مسیرهای تراوش آب انجام دادند [۱۲]. آگیری این سد در آگوست ۱۹۹۴ شروع و در آوریل ۱۹۹۸ خاتمه یافت. زمانی که ارتفاع آب پشت سد به ۱۵۰ متر رسید، سه حفره نشت در پوسته سد مشاهده گردید. به منظور تعیین تراوش مسیرهای آسیب دیده از تست تراسر^۷ استفاده شد. هنگامی که ارتفاع آب پشت سد به ۱۴۲ و ۱۴۵ متر رسید، ۱۵ تست تراسر در طی دو دوره انجام شد. نتایج آزمایشات حاکی از تراوش با میزان بالا در جناح چپ پوسته و با میزان کمتر در جناح راست پوسته بوده است [۱۲]. از آنجایی که سدها عمدتاً در نزدیکی محل تجمع انسان ها احداث می شوند، خرابی یک سد نه تنها از نظر اقتصادی زیان بار می باشد، بلکه تهدید بزرگی برای جان افراد ساکن در پایین دست سد نیز هست. لذا باید در تحلیل محاسبه و طراحی آن، دقت کافی به عمل آورد. در پژوهش حاضر بررسی عوامل موثر در تراوش از پی سد خاکی، آنالیز حساسیت در مورد فاکتورهای تاثیرگذار تراوش و همچنین ارایه رابطه ای جدید به منظور کنترل مسئله تراوش سد خاکی به وسیله الگوریتم ژنتیک انجام شده است.

^۶ Tangential hyperbolic^۷ Tracer

مواد و روش‌ها

مشخصات سد خاکی

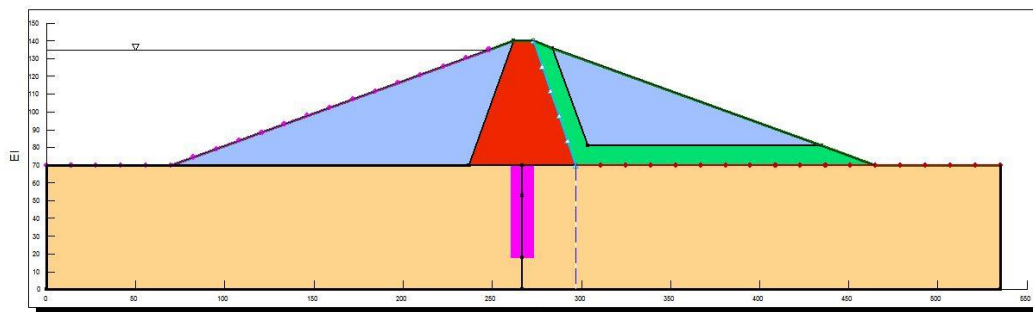
در این پژوهش یک نمونه سد با ابعاد واقعی در نرم افزار Geostudio ماژول seep/w مدل‌سازی شده است. ابعاد و اندازه های سد خاکی مدل‌سازی شده بر مبنای توصیه‌ها و معیارهای طراحی سدهای خاکی انجام گرفته است [۱۳ و ۱۴]. ارتفاع کل سد برابر ۷۰ متر در نظر گرفته شده است. طول قاعده پایین هسته رسی ۶۰ متر و طول قاعده بالای آن ۱۱ متر می‌باشد. عمق لایه خاکی که سد روی آن احداث شده تا بستر نفوذناپذیر ۷۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین بررسی‌ها در رابطه با دیوار آب بند در چند حالت انجام شده است که عبارتند از: بدون وجود دیوار آب‌بند، ارتفاع دیوار آب بند پارامتر h در نظر گرفته شده است با ارتفاع ۵ متر تا ۶۵ متر به این صورت که در هر پنج متر، افزایش ارتفاع به دیوار اعمال شده است. در این سد جهت هدایت آب های خروجی از بدنه سد و حفظ پوسته، از زهکش دودکشی استفاده شده است. تمامی مدل‌سازی‌ها نیز برای ارتفاع آب پشت سد برابر ۶۵ متر انجام شده است. در شکل ۱ شماتیک دیوار آب بند موجود در یک سد به همراه مقادیر مذکور و پارامترهای ضرایب نفوذپذیری پوسته (K_s)، پی (K_f) و دیوار آب بند (K_w) قابل مشاهده است.



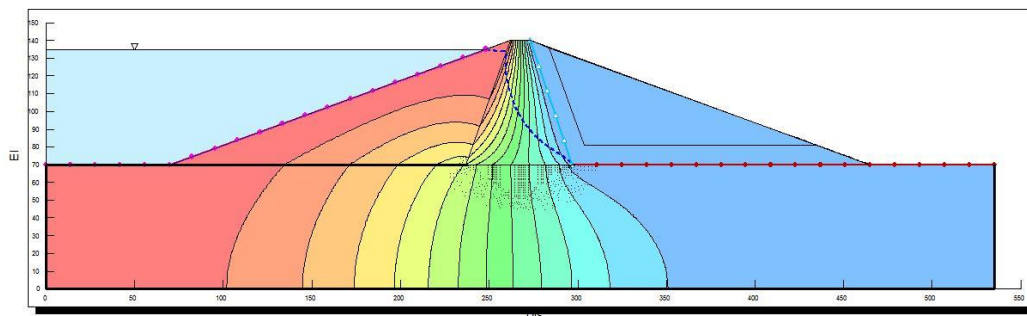
شکل ۱. شماتیک استفاده از دیوار آب بند در یک سد

مدلسازی، تحلیل نشت و صحت سنجی

پس از مدل‌سازی و مش بندی سد خاکی، دیوار آب بند در ارتفاع‌های مختلف به سد اعمال شد. به طور مختصر یکی از حالت‌های دیوار آب بند یعنی دیوار با ارتفاع ۵۰ متر در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین نحوه جریان و خطوط هم پتانسیل سد خاکی بدون وجود دیوار آب‌بند، پس از تحلیل نشت در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

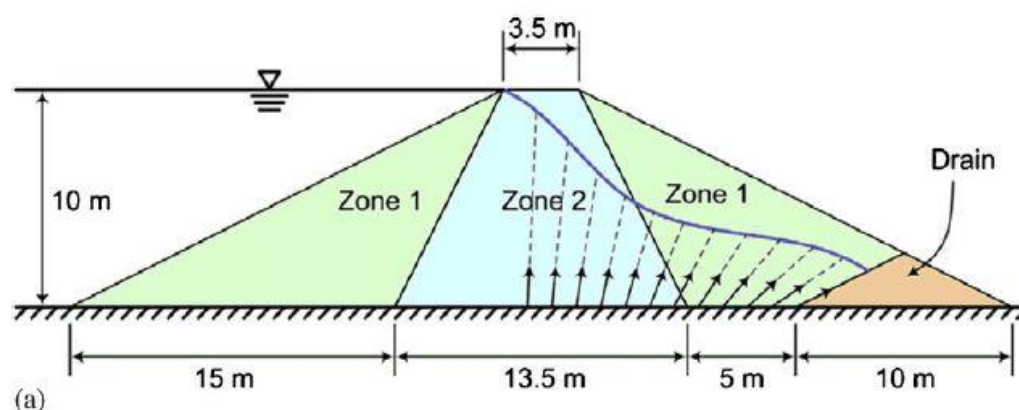


شکل ۲. هندسه سد خاکی در حالت وجود دیوار آب‌بند به ارتفاع ۵۰ متر



شکل ۳. نحوه جریان و خطوط هم پتانسیل پس از تحلیل نشت در حالت بدون وجود دیوار آب بند

در این تحقیق، صحت نتایج نشت از سد خاکی در نرم افزار seep/w با نتایج کاظم زاده و دانشمند [۱۵] مقایسه شده است. در مقاله‌ی مذکور یک سد خاکی غیر همگن با روش SFGFEM که یکی از زیرمجموعه‌های روش المان محدود می‌باشد، تحلیل شده است [۱۵]. در شکل ۴ مشخصات هندسی سد خاکی مدلسازی شده در مقاله کاظم زاده و دانشمند نشان داده شده است.



شکل ۴. مشخصات هندسی سد خاکی مدلسازی شده [۱۵]

در جدول ۱ نتایج دبی خروجی در تحلیل انجام شده در مقاله ی کاظم زاده و دانشمند و تحلیل تراوش انجام شده در نرم افزار seep/w آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود درصد اختلاف بین نتایج مقاله و نرم افزار seep/w در حدود ۱۷ درصد می‌باشد. این مقدار در مسائل ژئوتکنیکی مورد قبول است و می‌توان به نتایج نرم افزار seep/w در مدلسازی سد خاکی و تحلیل تراوش، اعتماد و سایر ارزیابی‌ها را انجام داد.

جدول ۱. مقایسه نتایج صحت سنجی

دبی خروجی (m^3 / day)	کار تحقیقی مورد نظر
۰/۵۲	کاظم زاده و دانشمند (۲۰۱۲)
۰/۶۱	نرم افزار seep/w (مطالعه حاضر)

معرفی کمی و کیفی متغیرها جهت تحلیل نشت از پی سد

متغیرهای مورد استفاده جهت تحلیل مقادیر نشت از پی سد و یافتن تابع مناسب جهت محاسبه نشت در حضور دیوار آب بند، به همراه مقادیر مورد استفاده در تحلیل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول K_f ، K_s و K_w به ترتیب ضرایب نفوذپذیری پوسته سد، پی سد و دیوار آب بند استفاده شده است. همچنین h معرف ارتفاع دیوار آب بند و x محل دیوار آب بند (ضریبی از طول هسته نسبت به ابتدای هسته در سمت بالا دست) است.

جدول ۲. معرفی مقادیر کمی متغیرهای مورد استفاده در تحلیل نشت از سد

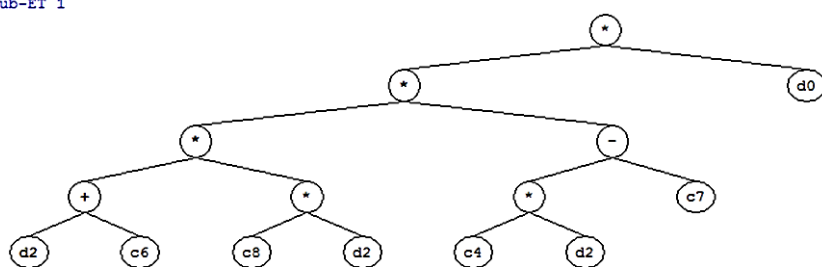
$K_c(m/s)$ ضریب نفوذپذیری هسته	$K_s(m/s)$ ضریب نفوذپذیری پوسته	$K_f(m/s)$ ضریب نفوذپذیری پی	$K_w(m/s)$ ضریب نفوذپذیری دیوار آب بند	$h(m)$ ارتفاع دیوار آب بند	$x(m)$ محل دیوار آب بند
۶-۱۰	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۰۱	۰	۰
		۰/۰۵۵		۵	
		۰/۰۷۷۵		۱۰	
		۰/۰۳۲۵	۵-۱۰	۱۵	۰/۲۵
		۰/۰۱		۲۰	
		۰/۰۰۵۵		۲۵	۰/۵
		۰/۰۰۷۷۵		۳۰	
	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳۲۵	۷-۱۰	۳۵	۰/۷۵
		۰/۰۰۱		۴۰	
		۰/۰۰۰۵۵		۴۵	
		۰/۰۰۰۷۷۵		۵۰	
		۰/۰۰۰۳۲۵	۰	۵۵	۱
		۰/۰۰۰۱		۶۰	
				۶۵	

استفاده از نرم افزار GeneXproTools جهت ساخت تابع

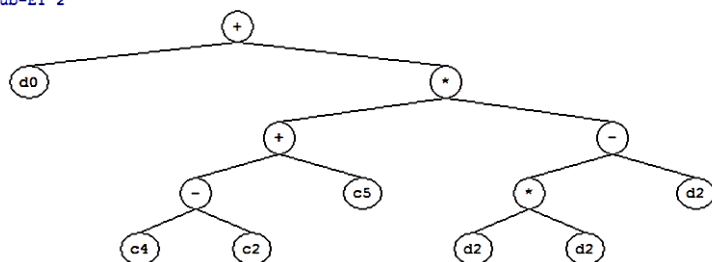
جهت به دست آوردن تعداد دیتاهای مناسب، متغیرها را به صورت جایگزشت فاکتوریلی در کنار هم قرار داده به گونه‌ای که ۳۲۳۵ حالت مختلف و تعداد ۳۲۳۵ حالت q از نرم افزار seep برداشت شد و به صورت فایل اکسل ارایه شد و جهت رگرسیون سازی این حالت‌ها از نرم افزار Genexprotools.5 استفاده شد. در نرم افزار Genexprotools ۲۰ درصد داده‌ها به عنوان صحت سنجی و ۸۰ درصد به عنوان آموزش^۸ انتخاب شده است. تابع انتخابی در این نرم افزار، تابع $RMSE^9$ بود که خطای جذر میانگین مربعات یا انحراف جذر میانگین مربعات است. این تابع تفاوت میان مقدار پیش بینی شده مدل یا یک برآوردگر آماری و مقدار واقعی را نشان می‌دهد و ابزار مناسبی جهت برآورد و مقایسه خطاهای یک مجموعه داده است. اما جهت استفاده چند مجموعه داده کاربرد ندارد. پس از تحلیل نتایج نرم افزار در ادامه رابطه دارای $RMSE$ کمتر یعنی $RMSE = 0.065$ (در صورت نزدیک‌تر بودن به صفر، قابل استنادتر می‌باشند) و دارای $R-Square$ بیشتر یعنی $R-square = 0.985$ (در صورت نزدیک‌تر بودن به ۱، قابل استنادتر می‌باشند) انتخاب شد. در نهایت در قسمت مدول، مدول مربوطه و یا مدول زبان C++ یا مدول درختی برداشت شد. در نهایت نمودار درختی‌ای که تابع مورد نظر از آن استخراج شده است مطابق شکل ۵ است.

^۸ Training^۹ Root Mean Square Error

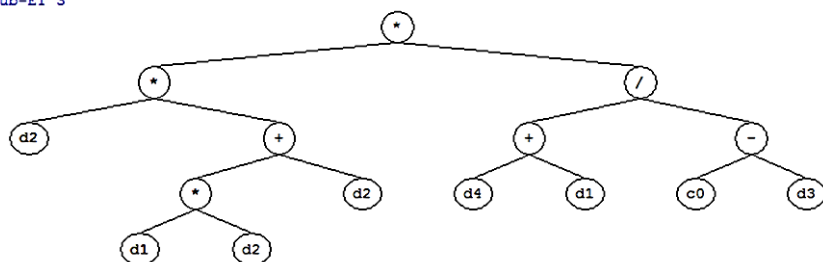
Sub-ET 1



Sub-ET 2



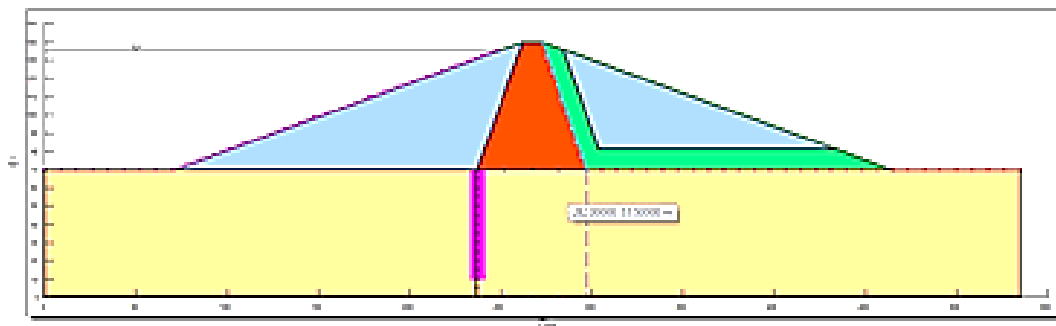
Sub-ET 3



شکل ۵. نمودار درختی جهت استخراج تابع تعیین نشت از نرم افزار GeneXprotocols

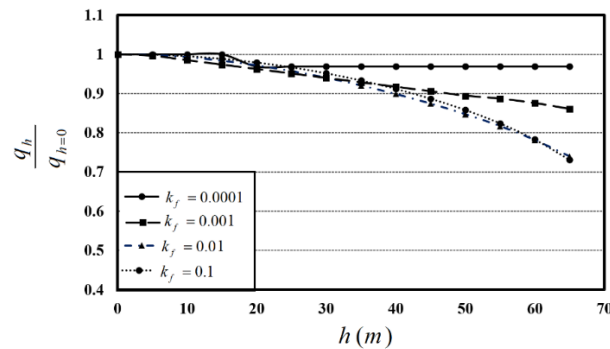
نتایج و بحث

در این قسمت با توجه به حالت‌های ارزیابی شده در جدول ۲، نمودارهایی جهت تعیین تراوش از پی سد از نرم افزار Geostudio، ماژول seep برای سد مربوطه با شرایط مذکور ارزیابی شده است. همچنین جهت توضیح بیشتر، محل استقرار پرده آب‌بند در شکل ۶ در حالت $x=0$ نمایش داده شده است.

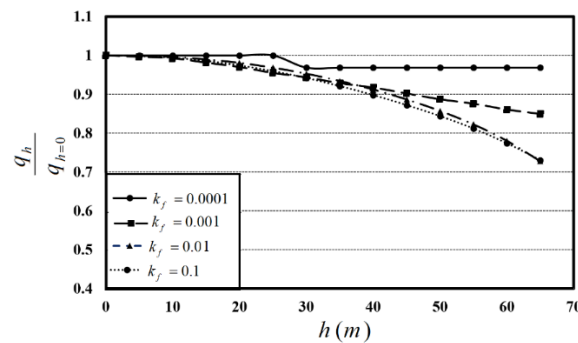


شکل ۶. محل استقرار پرده آب بند در $x=0$ در نرم افزار seep

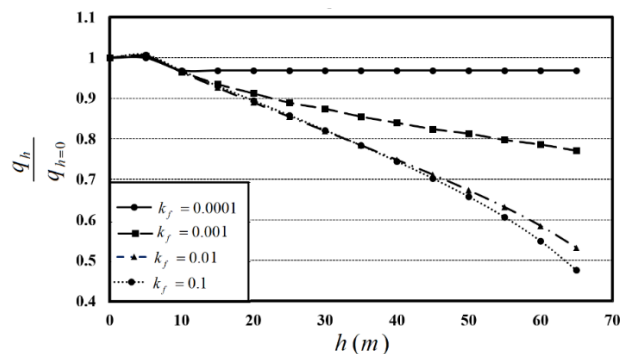
در ادامه نمودارهای استخراجی از تحلیل نشت برای سدخاکی برای سه نمونه از حالت‌های موجود جهت بررسی اثر موقعیت دیوار آب‌بند در شکل‌های ۷ تا ۹ برای سه موقعیت مختلف دیوار آب‌بند ارائه شده است. در مورد برای اثر مابقی پارامترها بدلیل زیاد بودن نمودارها نیز تنها به توضیح نتایج حاصل از آنها بسنده شده است. قابل ذکر است که در تمامی این نمودارها مقدار دبی خروجی با دیوار آب‌بند با ارتفاع h نسبت به دبی خروجی در حالت بدون دیوار آب‌بند (یعنی $h=0$) نرمال‌سازی شده است.



شکل ۷. نمودار تراوش از پی سد برای $K_s=0.001$ و $K_w=10^{-5}$ (حالت $x=0$)



شکل ۸. نمودار تراوش از پی سد برای $K_s=0.001$ و $K_w=10^{-5}$ (حالت $x=0.5$)



شکل ۹. نمودار تراوش از پی سد برای $K_s=0.001$ و $K_w=10^{-5}$ (حالت $x=1$)

بنابراین با توجه به شکل‌های ۷ تا ۹ و مابقی نتایج حاصل از تحلیل برای حالت‌های مختلف ضرایب نفوذ پذیری دیوار و پی، می‌توان این گونه اظهار کرد که با افزایش ارتفاع دیوار آب‌بند، میزان تراوش از پی سد کاهش یافته است. به طور مثال، میزان نشت از پی سد در حالت ارتفاع دیوار آب‌بند برابر ۶۰ متر، نسبت به حالت بدون دیوار آب‌بند در این مورد در حدود ۳۶/۸ کاهش یافته است. در سه حالت موقعیت در نظر گرفته شده برای پرده آب‌بند، همانطور که در شکل‌های ۷ تا ۹ قابل مشاهده است، افزایش طول پرده آب‌بند باعث کاهش غیر خطی دبی خروجی از پی سد شده است. همچنین همانطور که نتایج نشان می‌دهد اثر طول دیوار آب‌بند در حالتی که K_f به اندازه کافی کوچک نباشد خیلی محسوس‌تر است. در واقع در این موارد افزایش طول دیوار آب‌بند می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش دبی خروجی از پی سد داشته باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد شیب منحنی

وابسته به K_f است. با افزایش مقدار شیب منحنی نیز در مقادیر h های بالا، افزایش چشمگیری دارد. مقایسه اشکال ۷، ۸ و ۹ نشان می‌دهد که حرکت دیوار آب‌بند به سمت پایین دست، میزان تراوش را کاهش می‌دهد.

قابل ذکر است برای هسته سد دو مقدار ضریب نفوذپذیری برابر 10^{-6} و 10^{-8} m/s در نظر گرفته شد که در نهایت نتایج نشان داد این تغییر اثری بر تراوش از پی سد ندارد. در نتیجه در تمام عملیات مدلسازی نفوذپذیری هسته سد ثابت و برابر مقدار m/s 10^{-6} در نظر گرفته شد. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که K_s و K_w نیز تاثیر کمی بر روی میزان نشست از پی سد داشته است. با در نظر گرفتن پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر روی میزان نشست، با استفاده از نرم افزار GENEXPROTOOLS داده‌های خروجی از نرم افزار seep رابطه زیر برای نشست بدست آمده است.

[۱]

$$q = 7.37 \times K_f \times K_s \times (K_f + 4.53) \times ((4.45 \times K_f) + 7.84) + K_s - 16.44 \times (K_f^2 - K_f) + (X \times K_f^2 + K_f^2) \times ((h + X) / (-2.47 - K_w))$$

که در اینجا:

K_s ضریب نفوذپذیری پوسته سد با واحد متر بر ثانیه

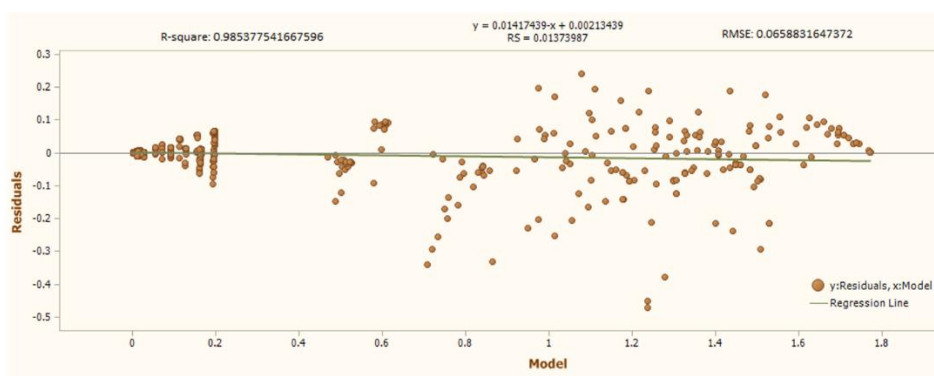
K_f ضریب نفوذپذیری پی سد با واحد متر بر ثانیه

K_w ضریب نفوذپذیری دیوار آب بند با واحد متر بر ثانیه

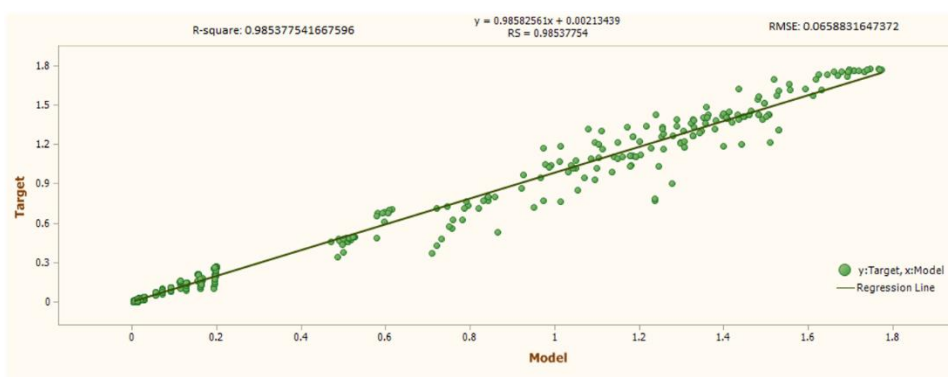
h ارتفاع دیوار آب بند با واحد متر

X محل دیوار آب بند (ضریبی از طول هسته نسبت به ابتدای هسته در سمت بالا دست)

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ روند انتخاب نتایج قابل استناد مربوط به RSME و R-Square در نرم افزار GeneXproTools را جهت انتخاب رابطه مناسب نمایش می‌دهند. مقدار $R^2=0.98$ و $\text{RMSE}=0.0658$ بدست آمده است که نشان می‌دهد رابطه ارائه شده پیش‌بینی مناسبی داشته است.



شکل ۱۰. مقدار خطا در مقادیر پیش‌بینی شده



شکل ۱۱. دقت رابطه ارائه شده در پیش‌بینی مقدار نشست از پی سد

نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در پژوهش، استفاده از دیوار آب بند در سد خاکی، میزان ترواش از پی سد را کاهش می‌دهد. مهمترین عوامل تاثیر گذار در مقدار نشست از پی سد عبارتند از: طول دیوار آب‌بند، موقعیت پرده آب‌بند، ضریب نفوذپذیری پی سد که بعد از این عوامل، عوامل ثانویه دیگر همچون، ضریب نفوذپذیری دیوار آب‌بند و پوسته سد نیز اثرگذار هستند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که تغییر ضریب نفوذپذیری هسته در محدوده‌های متداول کاربردی تقریباً بی اثر بر روی مقدار دبی نشست از پی سد است. مقدار اثر طول دیوار آب‌بند وابسته به موقعیت آن و ضریب نفوذپذیری پی سد دارد. بعنوان مثال نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضریب نفوذپذیری پی سد اثر افزایش طول دیوار آب‌بند محسوس‌تر است و باعث کاهش بیشتری در دبی نشست می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با جابجایی دیوار آب‌بند به سمت پایین دست، مقدار نشست نیز برای یک طول دیوار و ضریب نفوذپذیری پی سد ثابت، کاهش می‌یابد. با استفاده از نتایج تحلیل‌ها یک رابطه با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت تخمین نشست از پی سد بر اساس پارامترهای موثر ارائه شده است که اعتبار سنجی این رابطه، پیش‌بینی قابل قبول آن را نشان می‌دهد.

منابع و مراجع

- [1] Liu, S. H., Wang, L. J., Wang, Z. J., & Bauer, E. 2016. Numerical stress-deformation analysis of cut-off wall in clay-core rockfill dam on thick overburden. *Water Science and Engineering*, 9(3), 219-226.
- [2] Yuan, S., & Zhong, H. 2016. Three dimensional analysis of unconfined seepage in earth dams by the weak form quadrature element method. *Journal of Hydrology*, 533, 403-411.
- [3] Yu, X., Kong, X., Zou, D., Zhou, Y., & Hu, Z. 2015. Linear elastic and plastic-damage analyses of a concrete cut-off wall constructed in deep overburden. *Computers and Geotechnics*, 69, 462-473.
- [4] Athani, S. S., Solanki, C. H., & Dodagoudar, G. R. 2015. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method. *Aquatic Procedia*, 4, 876-883.
- [۵] رحیمی، ح. ۱۳۹۳. سد های خاکی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۶] خرقانی، س.، فخاری، ن. ۱۳۸۳. مهندسی سدهای خاکی، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.
- [۷] حائری، س.م. ۱۳۶۳. سد های خاکی، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۸] مطهری نژاد، م. ۱۳۸۹. ارائه فرمولهای کاربردی به روش اجزاء محدود جهت تراوش، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب.
- [۹] سیدی، ح.، م. کرمی مقدم و م. آذری دهکردی. ۱۳۸۷. کنترل سه بعدی نشت در سد اعلی دولت (استان فارس) با استفاده از روش عددی اجزاء محدود، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تهران.
- [۱۰] اهری آتش احمدلو، ع. ا.، ا. مرادی و ی. پریش. ۱۳۸۹. مطالعه اندرکنش خاک و آب و عوامل موثر در شکست سد های خاکی، اولین همایش ملی سازه، زلزله، ژئوتکنیک، بابلسر، موسسه آموزش عالی پردیسان.
- [۱۱] موهبت زاده، ا.، م. مشعل و ن. هدایت. ۱۳۹۰. تحلیل نشت در سدهای خاکی با هسته رسی با استفاده از نرم افزار seep/w مطالعه موردی سد کرخه در استان خوزستان، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.
- [12] Jin-Yong Lee, Hyoung-Soo Kim, Yea-Kwon Choi, Jeong-Woo Kim, Jeong-Yong Cheon, Myeong-Jea Yi. 2007. Sequential tracer tests for determining water seepage path in a large rockfill dam, Nakdong River basin, Korea–*Engineering Geology*, 89, 300-315.
- [۱۳] قنبری، ع. ۱۳۹۳. اصول مهندسی سدهای خاکی، دانشگاه خوارزمی، تهران.
- [۱۴] معاونت نظارت راهبردی. ۱۳۹۲. طراحی لرزه ای سدهای خاکی و سنگریزه ای، نشریه ۶۲۴.
- [15] Kazemzadeh-Parsi, M. J., & Daneshmand, F. 2012. Unconfined seepage analysis in earth dams using smoothed fixed grid finite element method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(6), 780-797.