

## یادداشت فنی

### مقایسه کارایی نرم‌افزارهای PLAXIS و MSEE در برآورد نشت از بدنه سدهای خاکی (مطالعه موردی سد کرخه)

امیر حق‌شناس آدرمنابادی<sup>۱\*</sup> و حسین صمدی بروجنی<sup>۲</sup>

#### چکیده

مسئله نشت از نظر اثرات آن بر پایداری سد و هدررفت آب از مخزن یکی از مسائل مهم در طراحی، اجرا و بهره‌برداری سدهای خاکی است. امروزه نرم‌افزارهای بسیاری ارائه شده که سعی در حل معادله نشت با روش‌های عددی دارند. در این مقاله سعی شده تا توانایی دو نرم‌افزار PLAXIS و MSEE که در حل مسئله نشت در سدهای خاکی مورد کاربرد هستند، ارزیابی و مقایسه شود. بدین منظور سد خاکی کرخه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج کاربرد دو نرم‌افزار بالا نشان داد که قابلیت هر دو نرم‌افزار در شبیه‌سازی و برآورد میزان نشت بدنه سدهای همگن، بالا بوده و خطای آن‌ها اختلاف معنی‌دار ندارد ولی در مورد سد کرخه که غیرهمگن بوده و دارای پی چندلایه است، خطای دو نرم‌افزار PLAXIS و MSEE در شبیه‌سازی و برآورد نشت به ترتیب ۳ و ۵۰ درصد بوده است. این نتیجه قابلیت بالاتر مدل PLAXIS را برای حل مسائل پیچیده نشت نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** اجزای محدود، سدهای خاکی، نشت، PLAXIS، MSEE.

**ارجاع:** حق‌شناس آدرمنابادی ا. و صمدی بروجنی ح. ۱۳۹۳. مقایسه کارایی نرم‌افزارهای PLAXIS و MSEE در برآورد نشت از بدنه سدهای خاکی (مطالعه موردی سد کرخه). مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۲۲۳-۲۲۷.

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسوول: [Haghshenasamir@yahoo.com](mailto:Haghshenasamir@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۵/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۲۸

## مقدمه

امروزه بیشتر سدهای احداث شده در جهان از نوع خاکی و یا سنگریزه‌ای هستند. بیش از ۷۰ درصد از ۴۶۰۰۰ سد بزرگ ثبت شده در ICOLD از نوع خاکی هستند (برابان و جلمامبت، ۲۰۰۷). در ایران از ۴۱ سد بزرگ در دست احداث و مطالعه در سال ۱۹۹۴، ۷۵ درصد از نوع خاکی و پاره سنگی بوده است (وفائیان، ۱۳۸۵). یکی از مسائل رایج در سدهای خاکی نشست از بدنه و پی آن‌ها است که در صورت عدم کنترل آن می‌تواند سبب هدررفت آب ذخیره شده در مخزن شده و همچنین از طریق پای‌پینگ یا روانگرایی سبب کاهش پایداری سد شوند. به همین دلیل آگاهی از میزان آب نشستی از محل سد از طریق تحلیل نشست، نقشی اساسی در جنبه‌های اقتصادی و فنی دارد (استرزلسکی و کاتسکی، ۲۰۰۸).

مقدار آب نشستی از بدنه و پی سد و همچنین توزیع فشار آب را می‌توان با استفاده از تئوری جریان در محیط‌های متخلخل تخمین زد. این تئوری ابزاری قدرتمند برای مهندسان طراح است. معادله دیفرانسیلی حرکت آرام آب در محیط‌های نفوذپذیر در حالت دو بعدی، با توجه به زیربنای معادله داری برای حرکت آرام و نوشتن رابطه پیوستگی جریان در عنصر کوچکی از محیط، به صورت رابطه کلی زیر است که به معادله لاپلاس برای نشست معروف است:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

امروزه نرم‌افزارهای مختلفی به بازار عرضه شده‌اند که با روش‌های عددی مانند تفاضل‌های محدود<sup>۱</sup> یا اجزاء محدود<sup>۲</sup> معادله دیفرانسیلی نشست را حل می‌کنند. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به نرم‌افزار PLAXIS V8 که یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در حوزه مسائل ژئوتکنیک است و همچنین نرم‌افزار MSEE برای رسم شبکه جریان و محاسبات نشست در محیط‌های متخلخل اشاره کرد که امروزه کاربرد زیادی در مطالعات سدهای خاکی دارند. عطایی آشتیانی و شریفی (۱۳۸۳) و لشته نشایی و همکاران (۱۳۸۵) در مطالعات خود برای شبیه‌سازی الگوی نشست از نرم‌افزار MSEE استفاده کردند. همچنین ارومیه‌ای و بزرگری (۲۰۰۷) و سینگ (۲۰۰۸) نرم‌افزار

PLAXIS را در محاسبات نشست و تعیین عملکرد روش‌های کاهش و کنترل نشست به کار بردند. اساس کار هر دو نرم‌افزار یاد شده روش اجزاء محدود در حالت دوبعدی است. در این روش ابتدا میدان حل توسط یک مدل هندسی برای نرم‌افزار به همراه شرایط مرزی و اولیه مسئله تعریف شده و سپس با شبکه‌بندی مدل هندسی محاسبات نشست با روش سعی و خطا تا رسیدن به یک خطای قابل قبول انجام می‌شود. هرچند MSEE نرم‌افزاری قدیمی‌تر بوده و فاقد رابط گرافیکی برای کاربر است و نحوه تعریف مسئله در آن مشکل‌تر از نرم‌افزارهای جدیدتری مانند PLAXIS است ولی همچنان یک نرم‌افزار پرکاربرد به خصوص در مسائل ساده است. در مقابل برنامه PLAXIS محیطی گرافیکی برای کاربر فراهم کرده و تعریف مسئله را بسیار آسان کرده است.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو نرم‌افزار PLAXIS V8 و MSEE استفاده شد. برای سنجش و مقایسه قابلیت دو نرم‌افزار در انجام محاسبات نشست دو مسئله در نظر گرفته شد. مسئله اول شبیه‌سازی نشست از بدنه سد خاکی کرخه بود. سد کرخه بزرگترین سد خاکی ایران از نظر حجم بدنه و ظرفیت مخزن با ارتفاع ۱۲۷ متر و طول تاج ۳۰۳۰ متر بوده در جنوب‌غربی ایران قرار گرفته است. پی سد از لایه‌های متناوب کنگلومرای با نفوذپذیری بالا و گل‌سنگ‌های نفوذناپذیر تشکیل شده است (وزارت نیرو، ۱۳۸۱). برای شبیه‌سازی از مقطع شماره ۵ سد استفاده شد. مشخصات مصالح مورد استفاده در سد کرخه و بدنه آن در جدول ۱ آورده شده است.

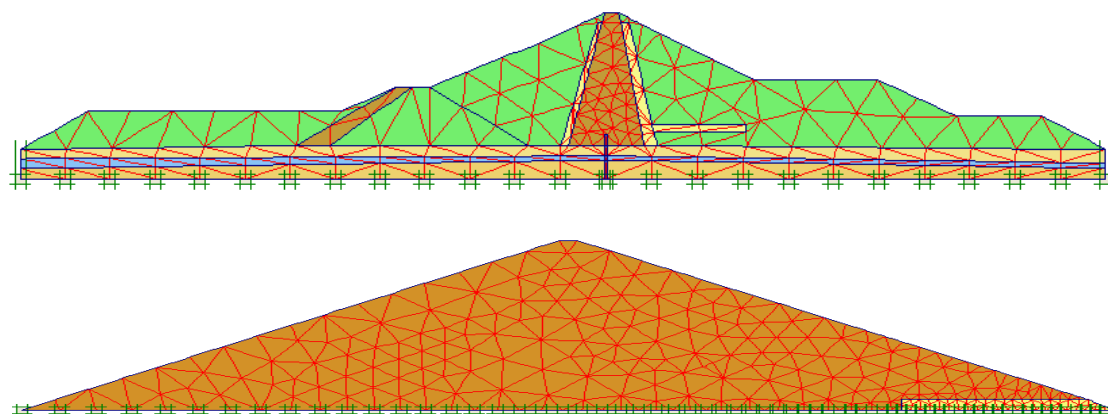
مسئله دوم شبیه‌سازی نشست و نفوذ از بدنه یک سد خاکی همگن فرضی است که دارای یک فیلتر افقی در ناحیه پنجه است و بر روی پی غیرقابل نفوذ قرار گرفته است. ارتفاع این سد نیز مانند سد کرخه ۱۲۷ متر، شیب بالادست و پایین دست ۱۷:۲H، ضخامت فیلتر ۸ متر و نفوذپذیری بدنه و فیلتر به ترتیب برابر  $10^{-6}$  متر بر ثانیه (۰/۰۸۵ متر بر روز) و  $10^{-4}$  متر بر ثانیه (۸/۶ متر بر روز) در نظر گرفته شد. برای مش‌بندی هر دو مدل از اندازه ریز (Fine) استفاده شده که در مورد هسته و فیلتر مش‌ها ریزتر در نظر گرفته شدند که در نهایت مدلی با بیش از ۳۰۰۰ گره در نرم‌افزار PLAXIS و ۱۶۰۰ گره در نرم‌افزار

در پایین دست برابر سطح ایستایی ثبت شده در پیزومتر موجود در فیلتر پایین دست در نظر گرفته شد.

MSEEP به دست آمد (شکل ۱). مرز زیرین پی غیرقابل نفوذ فرض شده و سطح آب در بالادست مدل برابر سطح‌های آب ثبت شده در مخزن (برای ۵ تراز مختلف) و

جدول ۱- مشخصات مصالح سد خاکی کرخه

کنگلومرای ۱	کنگلومرای ۲	گل‌سنگ	هسته	پوسته	فیلتر	دیوار آب‌بند	
۳۸/۹	۰/۹۵	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۸۵	۰/۸۵	۰/۰۰۰۰۸۵	نفوذپذیری افقی (متر بر روز)
۳۸/۹	۰/۹۵	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۰۰۰۴۵	۰/۰۸۵	۰/۸۵	۰/۰۰۰۰۸۵	نفوذپذیری عمودی (متر بر روز)



شکل ۱- مدل اجزای محدود تعریف شده سد خاکی کرخه (بالا) و سد خاکی همگن با فیلتر افقی پاشنه‌ای (پایین)

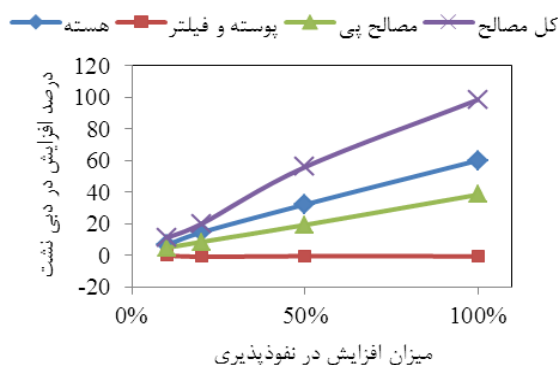
## نتایج و بحث

برای سنجش میزان تأثیر نفوذپذیری مصالح مختلف بر روی مقدار نشت محاسباتی از مقطع سد کرخه یک تحلیل حساسیت انجام شد. نتایج حاصل از این تحلیل بر روی مقطع ۵ سد نشان داد که مقادیر نشت محاسباتی به تغییر در نفوذپذیری هسته حساسیت بالایی داشتند به طوری که با افزایش ۱۰۰ درصدی در نفوذپذیری هسته مقدار نشت بیش از ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. تأثیر نفوذپذیری مصالح پی نیز بر روی مقادیر نشت محاسباتی بالاست ولی از تأثیر نفوذپذیری هسته کمتر است و کمترین اثر در مقادیر محاسبه شده نشت را نیز مصالح پوسته و فیلتر داشتند (شکل ۲).

در مرحله بعد دو مدل مقطع سد خاکی همگن فرضی و مقطع ۵ سد کرخه در هر یک از دو نرم‌افزار PLAXIS و MSEEP شبیه‌سازی شد. در شکل ۳ خطوط هم‌پتانسیل محاسبه شده با مدل PLAXIS برای دو سد کرخه و سد فرضی نشان داده شده است.

در شکل ۴ نتایج حاصل از تحلیل نشت بر روی مقطع سد خاکی کرخه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از دو نرم‌افزار با یکدیگر تفاوت زیادی داشتند. بیشترین خطای نتایج به دست آمده در مقایسه با میزان نشت اندازه‌گیری شده از بدنه و پی سد با نرم‌افزار PLAXIS زیر ۷ درصد بوده و متوسط خطای محاسبات زیر ۳ درصد است در حالی که نتایج حاصل از نرم‌افزار MSEEP دارای بیشینه خطای ۵۵ درصد و متوسط خطایی حدود ۵۰ درصد هستند. این در حالی است که روند تغییرات نشت محاسباتی با افزایش سطح آب در مخزن در نتایج هر دو نرم‌افزار شبیه به یکدیگر است. همچنین این روند در نتایج اندازه‌گیری شده نیز قابل مشاهده است. بنابراین دیده می‌شود که در مسائل پیچیده نشت از بدنه و پی سدهای خاکی غیرهمگن نتایج به دست آمده از نرم‌افزار PLAXIS دقت بالاتری نسبت به نرم‌افزار MSEEP دارد و برای طراحی و سنجش کارایی عملکرد سیستم‌های آب‌بندی و زهکشی سدهای خاکی به‌خصوص سدهای غیرهمگن با پی نفوذپذیر استفاده از

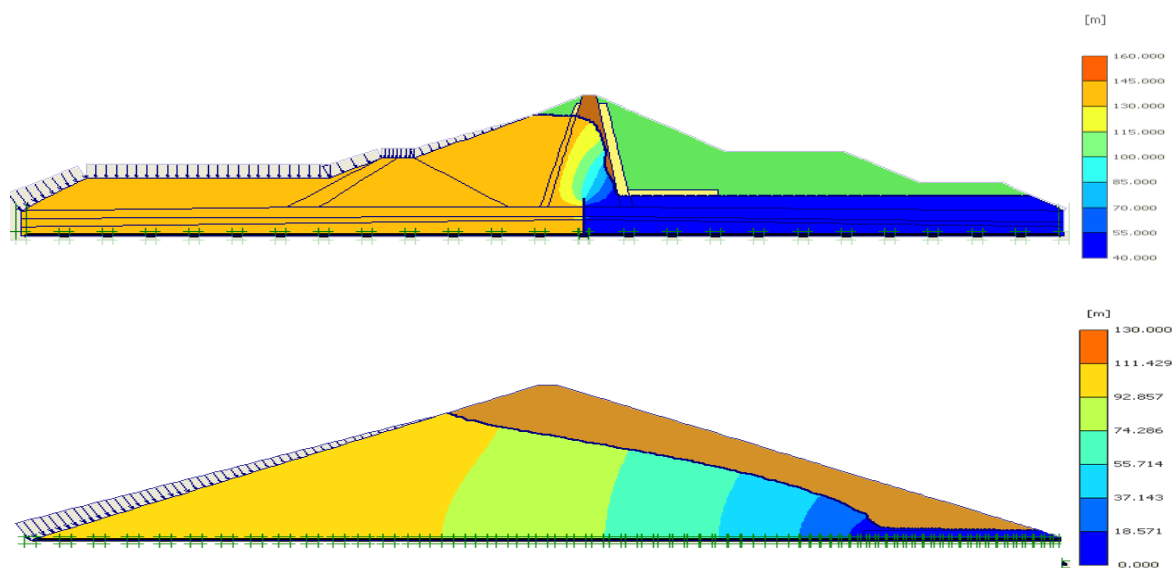
نرم‌افزار در حل مسائل به نسبت ساده بالا بوده و قابلیت بالایی را در حل این گونه مسائل دارند.



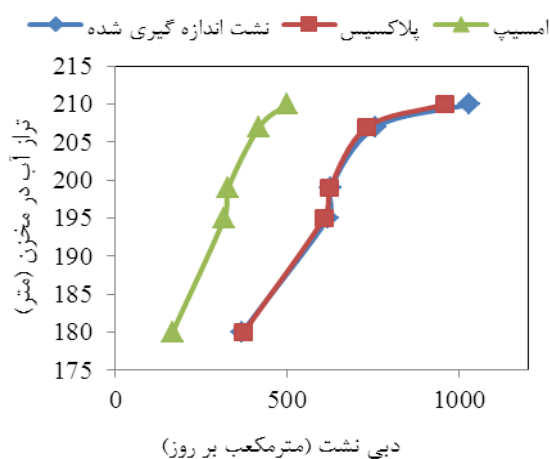
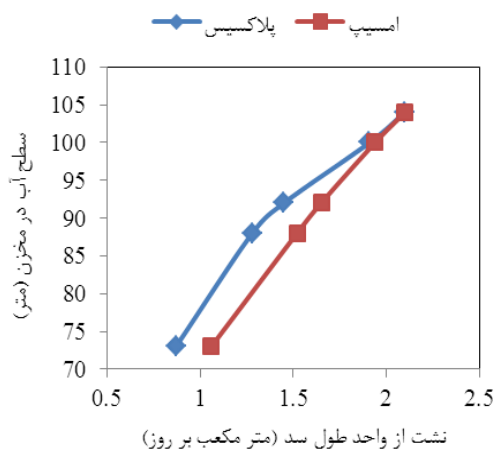
شکل ۲- نتایج تحلیل حساسیت انجام شده بر روی مقدار نشت از سد خاکی کرخه

این نرم‌افزار توصیه می‌شود. این تفاوت ناشی از به کارگیری روش‌های مختلف برای حل معادله دیفرانسیلی نشت در دو مدل است.

نتایج حاصل از تحلیل نشت انجام شده بر روی مقطع سد خاکی فرضی نیز با دو نرم‌افزار PLAXIS و MSEEP در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده برای سد همگن از هر دو نرم‌افزار بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و درستی محاسبات را تأیید می‌کند. میزان بازه تغییرات دبی در واحد عرض برای نرم‌افزار MSEEP بین ۱۰۶۰ تا ۲۱۰۰ لیتر بر روز و برای نرم‌افزار PLAXIS بین ۸۷۰ تا ۲۱۰۰ لیتر بر روز برای کم‌ترین و بیشترین سطح آب در نظر گرفته شده در مخزن است. بنابراین مشاهده می‌شود که دقت هر دو



شکل ۳- خطوط هم‌پتانسیل محاسبه شده برای مدل سد خاکی کرخه (بالا) و سد فرضی همگن (پایین)



شکل ۴- نتایج دبی‌های نشت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای سد همگن فرضی (چپ) و مقطع سد خاکی کرخه (راست)

## نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه توانایی دو نرم‌افزار اجزای محدود رایج PLAXIS و MSEE در محاسبات نشست در سدهای خاکی بود. بدین منظور از مقطع سد خاکی کرخه استفاده شد. نتایج نشست محاسبه شده برای مقطع سد کرخه با استفاده از دو نرم‌افزار بالا تفاوت زیادی با هم داشتند که با مقایسه نتایج با داده‌های اندازه‌گیری شده در محل سد، مشاهده شد که خطای نتایج حاصل از نرم‌افزار PLAXIS حدود ۳ درصد و خطای نتایج نرم‌افزار MSEE حدود ۵۰ درصد است که این تفاوت ناشی از به کارگیری روش‌های مختلف برای حل معادله دیفرانسیلی نشست در دو مدل بود. برای مقایسه کارایی دو نرم‌افزار در مسائل ساده‌تر و همچنین مشاهده تأثیر وجود هسته رسی، از یک مقطع سد خاکی همگن فرضی با ویژگی‌های شبیه مقطع سد کرخه استفاده شد. نتایج به دست آمده از هر دو نرم‌افزار در مورد این سد همگن بسیار به یکدیگر نزدیک بود و روند نتایج نیز شباهت بسیاری به یکدیگر داشت.

## سپاس‌گزاری

مؤلفین این مقاله در پایان لازم می‌دانند که از سازمان آب و برق خوزستان به‌خصوص از زحمات‌های آقای مهندس محمدباقر دیناشی‌نیا که در ارائه داده‌های اندازه‌گیری شده از محل سد کرخه نهایت همکاری را مبذول داشتند، تشکر کنند.

## منابع

- عطایی آشتیانی ب. و شریفی ا. ۱۳۸۳. مدل عددی المان مرزی در تحلیل تراوش در بدنه سد خاکی به همراه پی لایه‌ای و سپری. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، ۲۲ تا ۲۳ اردیبهشت ماه، دانشگاه صنعتی شریف. ۸-۱.
- لشته نشایی م. خدابخشی م. صابردل ساده م. و نیک قلب‌پور م. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر ابعاد دیواره-های آب‌بند و زهکش‌ها بر میزان زیر فشار و گرادیان هیدرولیکی خروجی در سدهای انحرافی. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، بهمن ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۸-۱.
- وزارت نیرو. ۱۳۸۱. مشخصات سد مخزنی و نیروگاه آبی کرخه. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. تهران. ۱۲۰ ص.
- وفائیان م. ۱۳۸۵. اطلاعات اجرایی در مورد سدهای خاکی (چاپ دوم). انتشارات ارکان دانش. اصفهان. ۴۸۴ ص.
- Breaban V. and Gelmambet S. 2007. The influence of the water level variation in reservoirs upon the earth dams strain states. Ovidius University Annals Series, Civil Engineering. 1(9):7-14.
- Singh A. K. 2008. Analysis of flow in a horizontal toe filter. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 1-6 October, Goa, India. pp. 2449-2455.
- Strzelecki T. and Kotecki S. 2008. Seepage through dam and deformable soil medium with concolidation. Studia Geotechnica et Mechanica. 4:71-84.
- Uromeihy A. and Barzegari G. 2007. Evaluation and treatment of seepage problem at Chapar-Abad dam, Iran. Engineering Geology. 91:219-228.

