

## مدلسازی عددی رفتار جریان نشت از پی‌های نفوذپذیر آبرفتی

الهه آذر\*، محمد صدقی‌اصل، و منصور پرویزی\*\*

\* نگارنده مسئول: دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. تلفن: ۰۷۴)۳۳۲۲۴۸۴، پیام‌نگار: eazar111@gmail.com  
\*\* به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (گرایش خاک و پی)، گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی؛ استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی؛ و استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج  
تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۴

### چکیده

حفظ اراضی کشاورزی در کشورهای دارای سواحل پست که در معرض هجوم آب دریا قرار دارند اهمیت بسزایی دارد. در این تحقیق با کمک نرم‌افزار FLAC که مبتنی بر روش تفاضل محدود است، گسیختگی خاک آبرفتی بر اثر نیروی نشت از یک مدل آزمایشگاهی مطالعه شده است. مدل عددی ارائه شده در محیط FLAC به خوبی قادر به مدلسازی رفتار خاک هست، زیرا این مدل عددی با دقت خوبی پدیده جوشش را پیش‌بینی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل حاضر می‌تواند قبل از اجرای طرح، مکانیزم بالادگی را بر اساس آنالیز تنش به خوبی پیش‌بینی کند. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد که با راهکارهایی مانند افزایش طول پرده آب‌بند و یا استفاده از بلانکت، با طولانی‌تر کردن مسیر می‌توان از وقوع جوشش جلوگیری کرد. تعیین ضریب اطمینان در این مدلسازی در محیط FLAC نیز بررسی شد که طی آن بدون احتیاج به محاسبات دستی ضریب اطمینان تعیین می‌شود. بر اساس معادلات ترزاقی ضریب اطمینان در برابر جوشش تنها به وزن مخصوص و فشار پیژومتریک بافت خاک در محدوده مورد نظر ارتباط دارد در صورتی که تعیین ضریب اطمینان با استفاده از مدلسازی در این تحقیق اثر پارامترهای زیادی مانند زاویه اصطکاک، زاویه اتساع، جنس پرده آب‌بند و حتی زاویه اصطکاک بین خاک موجود و پرده آب‌بند نیز لحاظ می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

پی آبرفتی، تنش موثر، جوشش، ضریب اطمینان، گسیختگی

### مقدمه

هیدرولیکی مقدار تلفات آب از داخل بدنه و پی باید به حداقل ممکن رسانده شود تا سازه، از نظر پایداری، حاشیه ایمنی مورد نظر را داشته باشد. دایک‌های ساحلی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که در مناطق دلتایی و زمین‌های مستعد کشاورزی احداث می‌شوند. این نوع سازه‌ها به دلیل آنکه پی ماسه‌ای دارند بسیار مستعد نشت و پدیده جوشش هستند (Sedghi-Asl et al., 2012).

تا کنون محققان زیادی پدیده نشت را، چه از درون بدنه و چه از پی سدها، بندهای انحرافی و دایک‌های

یکی از عوامل تخریب هیدرولیکی دایک‌های ساحلی، سدهای خاکی، بندهای انحرافی و سایر سازه‌های مربوط به شبکه‌های آبیاری و زهکشی، نشت جریان آب از پی است. اما اغلب به علت ضخیم بودن پی و مشکلات اجرائی نمی‌توان گفت که چه مقدار از نشت کنترل می‌شود. در شبکه‌های آبیاری و زهکشی که در مناطق دلتایی و ساحلی قرار دارند اغلب به دلیل چسبندگی کم خاک، جوشش ماسه‌های روان دیده می‌شود. در سازه‌های

رودخانه‌ای بررسی کرده و به نتایج خوبی نیز دست یافته‌اند. این مطالعات عمدتاً بر اساس تحلیل ریاضی و آنالیز عددی مسائل نشت استوار بوده است. مقایسه بین نتایج مدل‌های عددی با داده‌های صحرایی به دست آمده از سدها، با عدم قطعیت و خطاهای زیادی همراه است، از این رو تکیه کردن صرف بر نتایج مدل‌های عددی و داده‌های پیژومتریک ثبت شده توسط سیستم ابزار دقیق سدها نمی‌تواند چندان رضایت‌بخش باشد. در این تحقیق به کمک نرم‌افزار FLAC مبتنی بر روش تفاضل محدود، پدیده جوشش براساس مدل آزمایشگاهی دایک ساحلی و مقایسه نتایج با یک مدل واقعی مدلسازی شد و همچنین ضریب اطمینان با این نرم‌افزار، بدون استفاده از محاسبات دستی، تعیین گردید.

بر پایه بررسی‌های رحیمی (Rahimi, 2002)، ترازقی برای نخستین بار بهینه‌سازی جریان نشتی از پی سدهای خاکی را بررسی کرد و با آنالیز نشت حاصل از بدنه و پی سدهای خاکی، با توجه به ضریب نفوذپذیری مصالح تشکیل‌دهنده، نتایج خویش را این گونه ارائه داد که هرچه نسبت نفوذپذیری هسته نسبت به نفوذپذیری پی و پوسته کمتر باشد، نشت حاصل کمتر خواهد شد. وی با در نظر گرفتن عمق‌های مختلفی از پرده آب‌بند واقع شده در پی سد، به آنالیز جریان نشت از پوسته و پی پرداخت. آنالیز ایشان بر اساس روش شبکه جریان رسم شده برای هر حالت است. از چندین دهه گذشته محققان زیادی مسائل نشت را به صورت تحلیلی و عددی بررسی کرده‌اند. در اغلب این مطالعات درستی نتایج مدل‌های عددی با داده‌های صحرایی ارزیابی شده است.

بن‌مبارک و همکاران (Benmebarek *et al.*, 2005) با توجه به توسعه شهرنشینی و ضرورت ساخت و سازه‌های با عمق زیاد در ساخت پارکینگ و سیستم حمل و نقل

شهری به بررسی عددی تخریب ناشی از نشت در پایین دست فرازبند نصب شده در پی ماسه‌ای پرداختند. اغلب طراحی حفاری عمیق، با جریان آب حول پرده آب‌بند همراه است. جریان نشت از طریق بروز پدیده‌هایی چون زیرشویی و افزایش فشار جانبی بر پایداری دیوارها اثر می‌گذارد. این محققان در این تحقیق با استفاده از مدل FLAC دو بعدی، که مبتنی بر روش تفاضل محدود صریح است، به آنالیز خرابی ناشی از نشت پرداختند. اساس تحقیق این محققان، مشخص کردن شرایطی برای تخریب ناشی از پدیده‌هایی چون جوشش است. البته در این تحقیق نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نشده است.

صدقی اصل و همکاران (Sedghi-Asl *et al.*, 2012)

عوامل مؤثر بر نشت از پی دایک‌های ساحلی را بررسی کردند و یک مدل آزمایشگاهی به طول ۹ متر، ارتفاع و عرض ۱ متر با اسکلت فولادی و جداره‌های شیشه‌ای و پلکسی‌گلاس ساختند و مصالح پی را ماسه تمیز ساحلی در نظر گرفتند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که نسبت طول بهینه بلانکت و عمق پرده آب‌بند به عمق آب مخزن و ضخامت پی برای به حداقل رساندن دبی نشتی و کنترل فرسایش درونی، به ترتیب ۸ و ۰/۸ است.

### مواد و روش‌ها

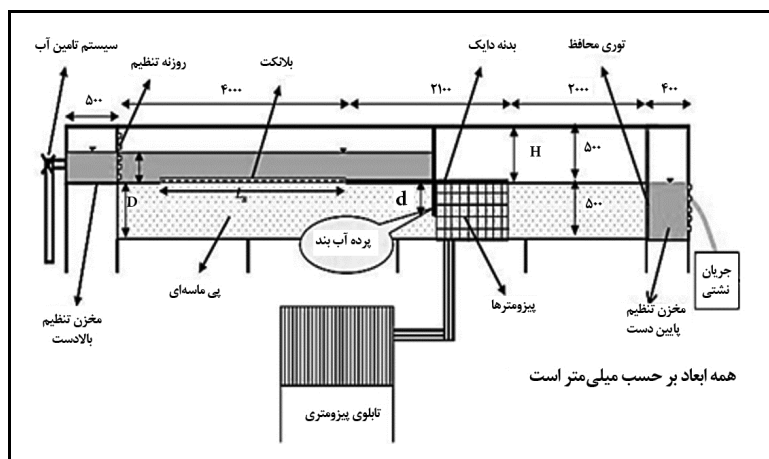
در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLAC به مدلسازی عددی یک نمونه آزمایشگاهی از دایک ساحلی پرداخته شده است که در آن جریان نشتی و پدیده جوشش بررسی و نتایج با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است؛ در انتها با این مدل عددی می‌توان ضریب اطمینان در برابر جوشش را نیز اعلام کرد.

مدلسازی در نرم‌افزار FLAC طبق ابعاد مدل آزمایشگاهی، به طول ۹ متر، ارتفاع و عرض ۱ متر از

مدلسازی عددی رفتار جریان نشت از پی‌های...

جنس اسکلت فولادی و جداره شیشه‌ای و پلکسی‌گلاس<sup>۱</sup> انجام شده است. دایک به ارتفاع ۵۰ و عرض آن ۱۰۰ و طول ۲۱۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۸ میلی‌متر است. این مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه

مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی کرج ساخته شده است. شکل ۱ طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی و شکل ۲ مدل واقعی در آزمایشگاه را نشان می‌دهد (Sedghi-Asl et al., 2012).



شکل ۱- شماتیک مدل آزمایشگاهی



شکل ۲- مدل واقعی در آزمایشگاه (Sedghi-Asl et al., 2012)

بررسی این موضوع متغیرهای زیادی نقش دارند از جمله فرسایش، از ماسه ریز تمیز (ماسه ساحلی) با تراکم یکنواخت در پی استفاده شده است که در عمق ۵۰ سانتی‌متر پایینی فلوم مدل می‌شود. پرده آب‌بند از جنس پلکسی‌گلاس در عمق ۱۰ سانتی‌متر مدل شده است. در

بررسی این موضوع متغیرهای زیادی نقش دارند از جمله عمق پرده آب‌بند، نفوذپذیری خاک پی، انعطاف‌پذیری دیوار آب‌بند، سختی المان‌ها، جابه‌جایی دیوار و غیره. در این مقاله عمق پرده آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع آب بالادست ۲۵ سانتی‌متر مدلسازی و ساده‌سازی‌ها طبق

برای ایجاد بحرانی‌ترین حالت از نظر پتانسیل ایجاد فرسایش، از ماسه ریز تمیز (ماسه ساحلی) با تراکم یکنواخت در پی استفاده شده است که در عمق ۵۰ سانتی‌متر پایینی فلوم مدل می‌شود. پرده آب‌بند از جنس پلکسی‌گلاس در عمق ۱۰ سانتی‌متر مدل شده است. در

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho_s g_j = 0 \quad (1)$$

که در آن،

$\rho_s$  = چگالی زهکشی نشده (کیلوگرم بر مترمکعب)؛  
 $g_j$  = بردار گرانش (متر بر ثانیه)؛ و  $\sigma_{ij}$  = تنش موثر (پاسکال).

پس از جاگذاری و محاسبه، رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \rho_d g_j - (1-n) \frac{\partial p}{\partial x_j} - n \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن،

$\phi$  و  $n$  = به ترتیب ارتفاع پیزومتر (متر) و تخلخل؛  
 $\rho_d g_j$  = وزن خاک (مترمکعب)؛  $(1-n) \frac{\partial p}{\partial x_j}$  = نیروی شناوری (نیوتن)؛ و  $n \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial x_j}$  = نیروی نشت (نیوتن) (Anon, 2000).

در مرحله نخست مدل‌سازی، شبکه‌ای منطبق بر مدل آزمایشگاهی تنظیم شد (شکل ۳). پس از آن مرحله اول مدل‌سازی، رفتار آب در خاک، بررسی شد.

برای درست‌آزمایی این مرحله، ارتفاع آب مطابق شکل ۴ کنترل گردید. همان‌طور که قسمت‌های مختلف شکل ۴ نشان می‌دهد، در بالادست ۷۵ سانتی‌متر و در پایین‌دست ۵۰ سانتی‌متر ارتفاع آب کاملاً صحیح است.

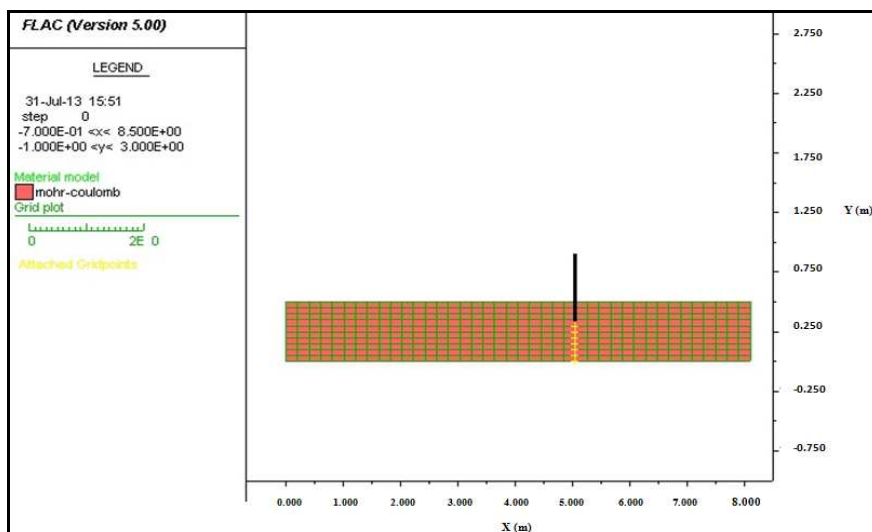
نمونه واقعی انجام شده است. هدف عبارت است از به دست آوردن روش عددی بر اساس روش تفاضل محدود تا بتوان مکانیزم بالازدگی را در پی سازه‌های هیدرولیکی که مستعد پدیده جوشش است پیش‌بینی کرد.

آنالیز توسط کد کامپیوتری برنامه‌ی FLAC دو بعدی انجام گرفت که یک برنامه تفاضل محدود صریح بر پایه تحلیل لاگرانژی است. در این برنامه برای حل معادلات جبری از یک روش صریح وابسته به زمان استفاده شد. باید توجه داشت که برخلاف تصور عموم، روش تفاضل محدود به شبکه مستطیلی شکل محدود نمی‌شود. در FLAC بر پایه مطالعات ویلکینز، از روشی استفاده شده که می‌توان معادلات دیفرانسیل در روش تفاضل محدود را با استفاده از شبکه‌هایی با اشکال مختلف محاسبه کرد (Wilkins, 1946).

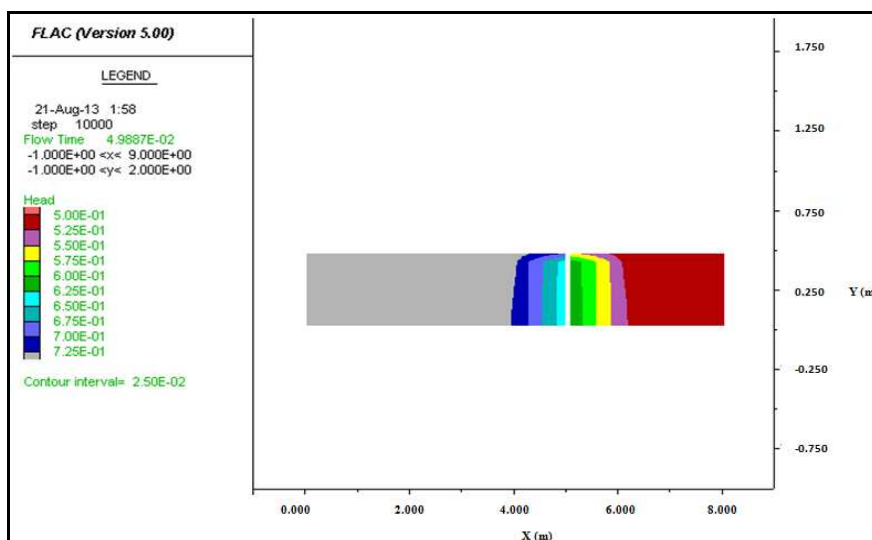
مکانیزم استفاده از FLAC بدین ترتیب است:  
 ۱- ایجاد یک شبکه تفاضل محدود؛ ۲- اعمال مدل رفتاری و خصوصیات مصالح؛ و ۳- اعمال شرایط مرزی.

هنگامی که در FLAC جریان عبور سیال از بین خلل و فرج محیط مدل‌سازی می‌شود، طبق رابطه ترزاقی و تیلور، بر واحد حجم خاک در ماتریس سختی سه نیرو وارد می‌شود که عبارت‌اند از وزن خاک، نیروی شناوری و نیروی حاصل از نشت، بی‌یر (Bear, 1972) نیز به این نتایج دست یافته است. بسته عددی FLAC نیز طبق همین قوانین عمل می‌کند. این نیروها به صورت اتوماتیک در FLAC در نظر گرفته شده است و معادله حاکم در این بسته عددی مطابق رابطه ۱ است.

مدلسازی عددی رفتار جریان نشت از پی‌های...



شکل ۳- شبکه ساخته شده در FLAC



شکل ۴- شبکه جریان توسط مدل برای عمق پرده آب بند ۱۰ سانتی متر

بین پرده آب بند و ماسه تعیین شود. طی آزمایش برش مستقیم در حداکثر این زاویه ۲۶ درجه و بحرانی ترین حالت ۲۲ درجه است. در این تحقیق بحرانی ترین حالت یعنی ۲۲ درجه در نظر گرفته شده است (Barchard, 2002).

$$E_s = \frac{\left(K + \frac{4}{3}G\right)}{\Delta z_{\min}} \quad (۳)$$

$$K_n = 10E_s \quad (۴)$$

برای اعمال خصوصیت مربوط به سطح مشترک دو المان باید سختی قائم  $K_n$  و سختی برشی  $K_s$  زون‌های مجاور محاسبه شود. طبق رابطه ۳ ابتدا پارامتر  $E_s$  محاسبه می شود و پس از آن بر اساس روابط ۴ و ۵ سختی قائم و سختی برشی در حالت سطح مشترک متصل تعیین می گردد. سختی معادل معرف مقدار سختی سخت ترین زون موجود در مرز مورد بررسی است (Anon, 2000). همچنین، برای مدل سازی پرده آب بند باید زاویه اصطکاک محل تماس

$$K_s = 10E_s \quad (5)$$

### نتایج و بحث

پس از مدل‌سازی هندسی دایک، با استفاده از کدنویسی به زبان FISH نتایج مربوط به دبی از مدل استخراج گردید. اگر شاخص‌های جریان دما، فشار، جرم مخصوص و سرعت در هر نقطه از سیال نسبت به زمان ثابت باشند، جریان را ماندگار گویند (Streeter & Wylie, 1981).

در مدل آزمایشگاهی مورد استفاده، جریان ماندگار برقرار بود و در مدل عددی دما و جرم مخصوص در تمام نقاط ثابت است. برای اطمینان از ایجاد جریان ماندگار با استفاده از کدنویسی به زبان FISH دبی ورودی و خروجی کنترل گردید که هر کدام به یک عدد ثابت همگرا گردید. روشی مستقیم در FLAC برای بررسی تاریخچه شاخص سرعت جریان به صورت کلی در نقاط مختلف وجود ندارد و با توجه به ثابت بودن مقطع و همگرا شدن دبی به یک عدد ثابت می‌توان نتیجه گرفت که سرعت نسبت به زمان ثابت است. برای نمونه در حالتی که عمق دیواره آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر است، شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که به ترتیب دبی ورودی و دبی خروجی به یک عدد ثابت همگرا شده و می‌توان نتیجه گرفت که در مدل عددی جریان ماندگار ایجاد شده است.

برای حصول اطمینان از ماندگار بودن جریان، شاخص دیگری نیز به این صورت بررسی شد که چند نقطه به طور دلخواه انتخاب و روند تغییر شاخص فشار پیزومتریک بررسی گردید. همگرا شدن فشار پیزومتریک نقاط به یک عدد ثابت مبنی بر ماندگار بودن جریان است. شکل‌های ۷ و ۸ تاریخچه تغییر فشار پیزومتریک در دو نقطه از مدل را در حالتی که پرده آب‌بند با عمق ۱۰ سانتی‌متر است نشان می‌دهند که به یک عدد همگرا شده‌اند. در تمام حالت‌ها با عمق‌های متفاوت پرده آب‌بند و طول بلانکت مختلف این موضوع کنترل شد.

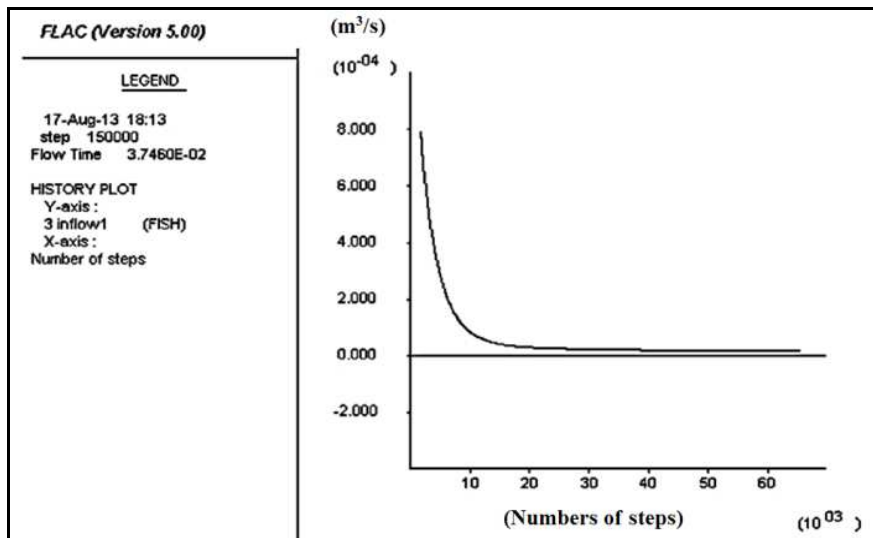
که در آنها،

$E_s$  = سختی معادل (نیوتن بر مترمکعب)؛  $K_s$  = مدول حجمی (پاسکال)؛  $G$  = مدول برشی (پاسکال)؛  $\Delta z_{\min}$  = اندازه حداقل بعد المان (متر)؛  $K_n$  = سختی قائم محدوده‌های مجاور (نیوتن بر مترمکعب) (تنش بر جابجایی)؛ و  $K_s$  = سختی برشی محدوده‌های مجاور (نیوتن بر مترمکعب) (تنش بر جابجایی)).

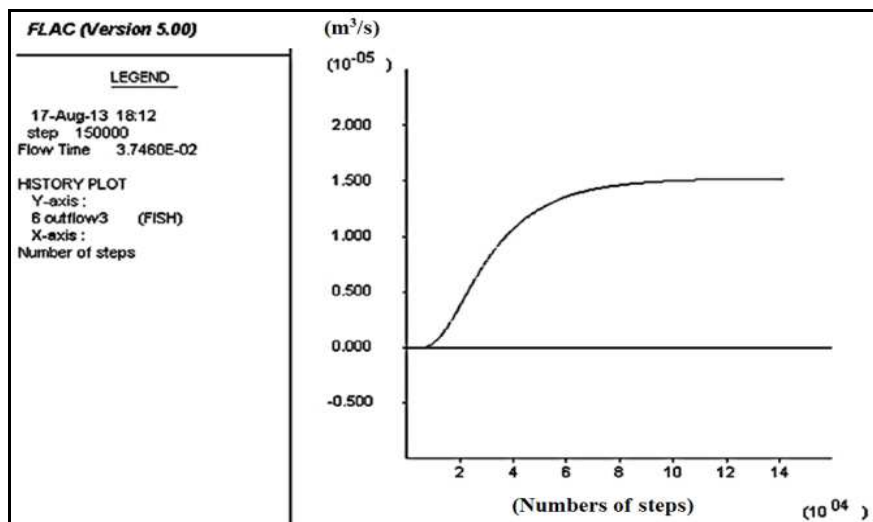
در این مدل‌سازی، FLAC از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده می‌کند. موهر کولمب یک معیار گسیختگی است که در آن گسیختگی نه به علت تنش قائم و نه به علت تنش برشی حداکثر بلکه به علت ترکیب بحرانی از آنها پیش‌بینی می‌شود و یکی از رایج‌ترین مدل‌های رفتاری خاک است. وزن مخصوص خشک ماسه به کار رفته در پی برابر ۱۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای ماسه ریز، مدول الاستیسیته بین ۱۰ تا ۲۵ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲۵ است (Subramanian, 2008). با توجه به اینکه هدف بررسی وضعیت پی در بحرانی‌ترین شرایط است و ماسه نیز بسیار سست است، مدول الاستیسیته ۱۰ مگاپاسکال لحاظ گردید.

مرحله بعد، جریان آب و تغییرات مکانیکی محیط همزمان لحاظ می‌شود. شرایط مرزی، طبق مدل آزمایشگاهی بدین‌گونه اعمال شده که ارتفاع آب در بالادست در تراز ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، در پایین دست صفر، پایین و سمت چپ پی کاملاً صلب و نفوذناپذیر و در سمت راست پی به دلیل وجود توری در مدل آزمایشگاهی امکان عبور آب وجود دارد. نوع جریان ماندگار یکنواخت و فشار آب بالادست و پایین دست در حین جریان ثابت است که در ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر بالادست بیشترین پتانسیل برای ایجاد جوشش در نمونه وجود دارد.

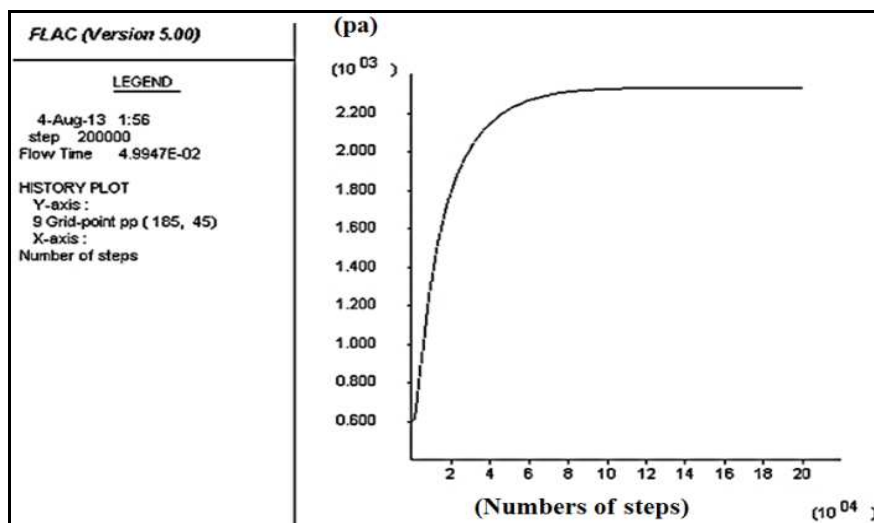
مدلسازی عددی رفتار جریان نشت از پی‌های...



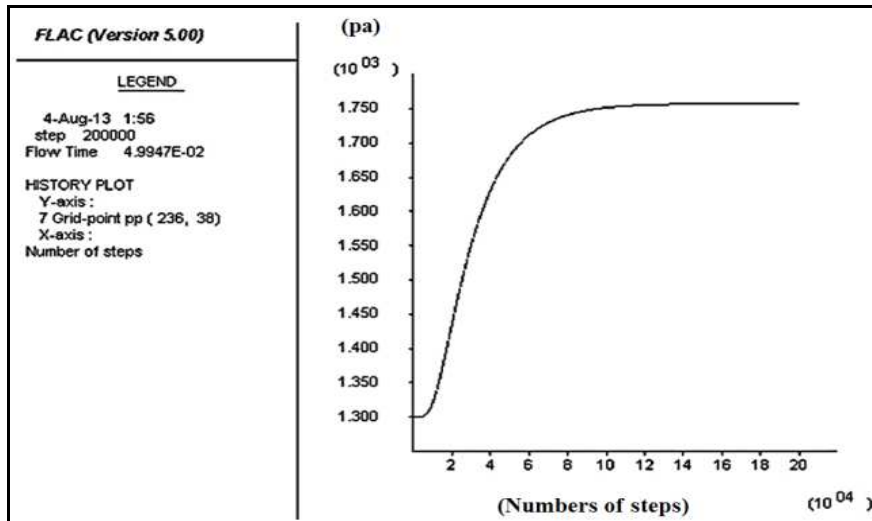
شکل ۵- همگرا شدن دبی ورودی به یک عدد ثابت در عمق دیواره آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۶- همگرا شدن دبی خروجی به یک عدد ثابت در عمق دیواره آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر



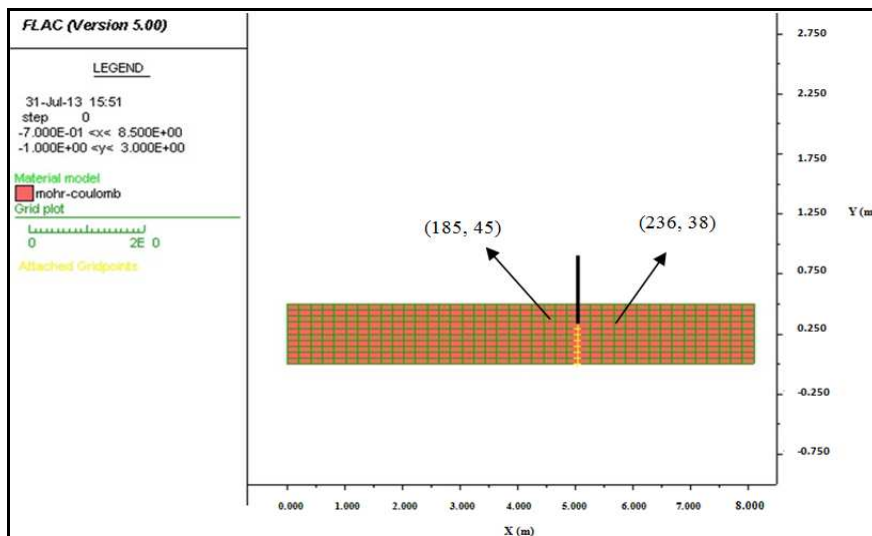
شکل ۷- تاریخچه فشار پیزومتریک در نقطه (۴۵ و ۱۸۵) در عمق پرده آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۸- تاریخچه فشار بیژومتریک در نقطه (۳۸ و ۲۳۶) در در عمق پرده آب بند ۱۰ سانتی متر

نقطه (۳۸ و ۲۳۶) در فاصله ۵/۸۵ متر از شروع مدل و ارتفاع ۰/۳۸ متر از مدل در بالادست قرار می‌گیرد و در شکل ۹ محل آن روی مدل نشان داده شده است.

نقطه (۴۵ و ۱۸۵) در فاصله ۴/۶ متر از شروع مدل و ارتفاع ۰/۴۵ متر از مدل در پایین دست قرار می‌گیرد و در شکل ۹ محل آن روی مدل نشان داده شده است.

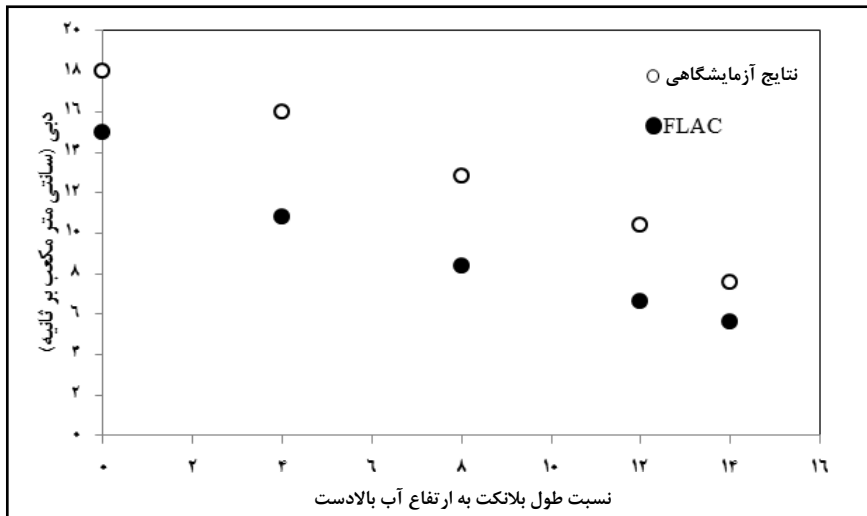


شکل ۹- محل نقاط (۴۵ و ۱۸۵) و (۳۸ و ۲۳۶) روی مدل

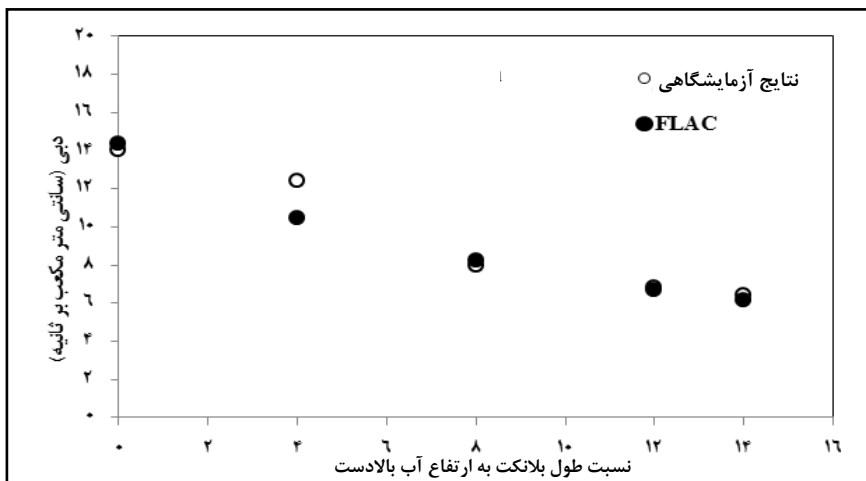
و آزمایشگاه را نشان می‌دهد ( $d$  = عمق پرده آب بند؛  $D$  = عمق پی؛  $L_B$  = طول بلانکت؛ و  $H$  = ارتفاع آب بالادست (تمام پارامترها بر حسب متر)).

پس از تعیین نفوذپذیری و حصول اطمینان از ماندگار بودن جریان، نتایج حاصل از نرم افزار و آزمایشگاه مقایسه می‌شود. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مقایسه دبی حاصل از FLAC

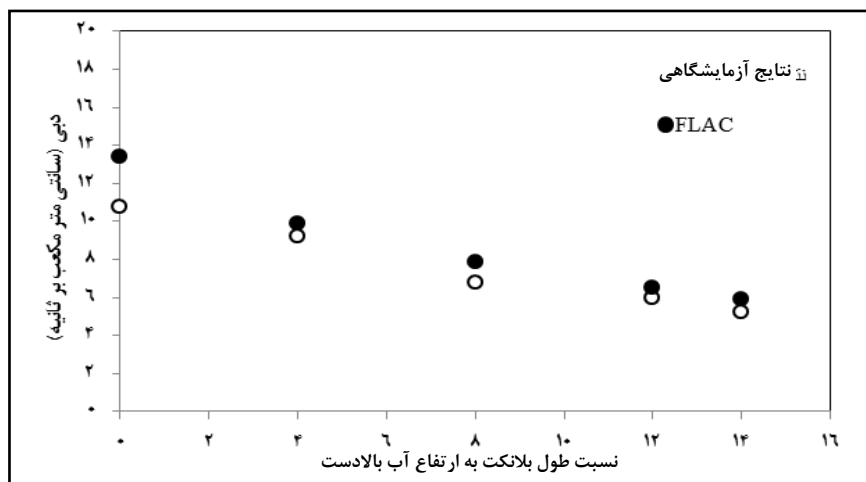




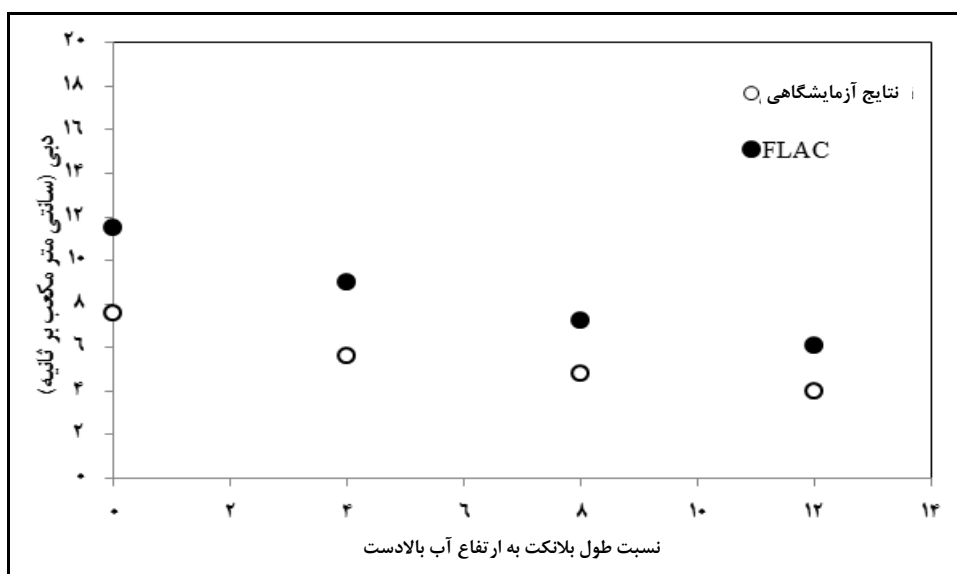
شکل ۱۰- مقایسه دبی حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی عمق پرده آب بند = ۱۰ سانتی متر و طول بلانکت = ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ متر



شکل ۱۱- مقایسه دبی حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی عمق پرده آب بند = ۲۰ سانتی متر و طول بلانکت = ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ متر



شکل ۱۲- مقایسه دبی حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی عمق پرده آب بند = ۲۰ سانتی متر و طول بلانکت = ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ متر



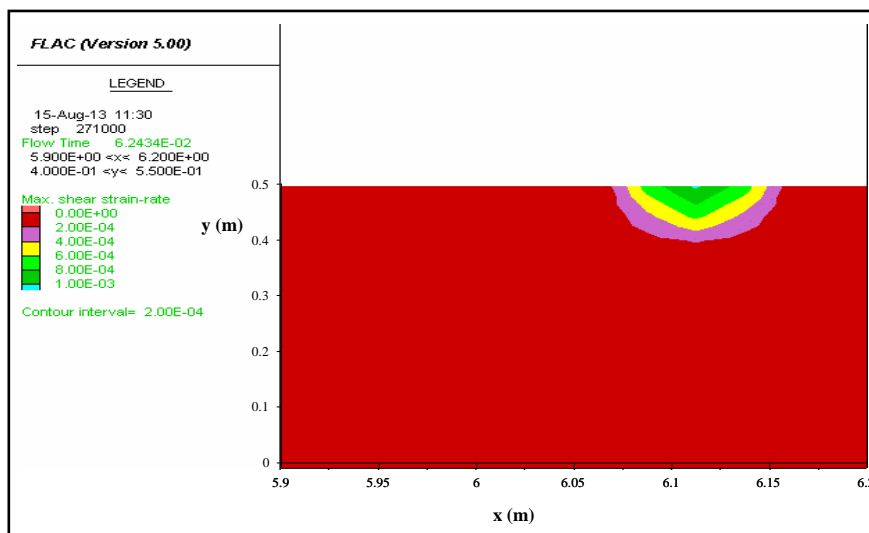
شکل ۱۳- مقایسه دبی حاصل از مدل عددی و مدل آزمایشگاهی  
عمق پرده آب‌بند = ۴۰ سانتی‌متر و طول بلانکت = ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ متر

شده است. بنابراین، حداقل نتیجه این مرحله از تحقیق این است که کاربرد یک مقدار واحد برای هدایت هیدرولیکی اشباع در شرایط تغییرات تراز آب مخزن چندان دقیق نیست و پیشنهاد می‌شود دیگر محققان تمرکز بیشتری روی این موضوع مهم داشته باشند.

حداکثر کرنش برشی در پایین دست زمانی بررسی شد که عمق پرده آب‌بند ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر و عمق پرده آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر با طول بلانکت ۱ متر است. در زمان وقوع جوشش، حداکثر کرنش برشی ناشی از جابه‌جایی، در پایین دست دایک مقدار قابل توجهی است. شکل ۱۴ حداکثر کرنش برشی را در پایین دست دایک در زمان وقوع جوشش عمق پرده آب‌بند ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.

در شرایطی که عمق پرده آب‌بند کم، یعنی ۱۰ سانتی‌متر است، احتمال وقوع جوشش به شدت بالاست و تخلخل محیط با زمان قطعاً متغیر است، ضمن اینکه در این عمق جوشش نیز رخ داده است. در این حالت وقتی تخلخل محیط تغییر کند دبی قطعاً تغییر می‌کند و کاربرد یک هدایت هیدرولیکی واحد خالی از اشکال نیست. پس طبعاً باید تفاوتی بین دبی آزمایشگاهی و عددی باشد که دبی آزمایشگاهی بیشتر از مدل عددی است و این تاثیری بر تخلخل و متعاقب آن تغییر دبی دارد.

در حالت عمق پرده ۴۰ سانتی‌متر نیز رفتاری جالب توجه رخ داده است. مدل عددی در اینجا نه تنها کم‌برآوردی نکرده بلکه بیش‌برآوردی کرده است به این دلیل که هدایت هیدرولیکی به تراز آب بالادست وابسته است و این مورد در کارهای دیگر محققان نیز مشاهده



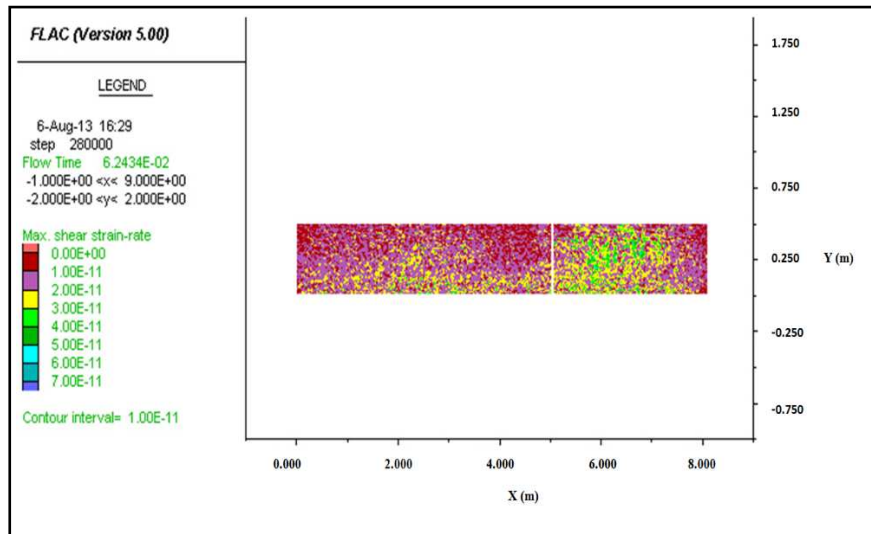
شکل ۱۴- حداکثر کرنش برشی در پایین دست دایک در زمان وقوع جوشش عمق پرده آببند= ۱۰ سانتی‌متر

شرایط بحرانی مد نظر بود زاویه اصطکاک ۱۹ درجه و زاویه اتساع صفر درجه منظور گردید. نکته جالب توجه این است که اگر زاویه اتساع بالای ۱۰ درجه در نظر گرفته شود و بقیه شرایط ثابت باشد به طور کلی در محیط جوششی رخ نمی‌دهد.

با مدل عددی ارائه شده در محیط FLAC امکان یافتن عمق بهینه پرده آببند وجود دارد. با آنالیزهای متعدد در مدل دایک در حالتی که ارتفاع آب بالادست ۲۵ سانتی‌متر است، عمق بهینه پرده آببند ۴۵ سانتی‌متر خواهد بود. در این حالت گرادیان هیدرولیکی در پایین‌دست دایک ۱/۰۳۹ است. در مدل عددی ارائه شده اگر در محل مستعد وقوع جوشش در این مدل پایین‌دست دایک، تنش برشی خاک به تسلیم برسد و نرخ کرنش به صورت واضح در آن محل حداکثر باشد، قطعاً جوشش رخ می‌دهد. در این مدل کانتور تنش مؤثر، محدوده تنش مؤثر در محل‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای بررسی دقیق در نقطه حساس مستعد وقوع جوشش باید تغییرات تنش مؤثر بررسی شود.

در صورتی که در عمق پرده آببند ۱۰ سانتی‌متر و طول بلانکت ۱ متر حداکثر مقدار کرنش برشی نیز در پایین‌دست حداکثر نیست و در کل محیط مطابق شکل ۱۵ کانتورهای حداکثر مقدار کرنش برشی مقادیر بسیار کمی را نشان می‌دهد.

با بررسی‌ها و حساسیت‌سنجی‌ها روی پارامترهای مختلف مانند زاویه اصطکاک بین پرده آببند و خاک، مدول الاستیسیته خاک، ضریب پواسون خاک، وزن مخصوص خاک، زاویه اتساع خاک، زاویه اصطکاک خاک و جنس پرده آببند در مدل عددی این نتیجه به دست آمد که زاویه اتساع خاک و زاویه اصطکاک خاک مؤثرترین عامل روی پدیده جوشش هستند. محدوده زاویه اتساع برای ماسه صفر تا ۱۵ درجه می‌باشد (Anon, 2000) و محدوده زاویه اصطکاک برای ماسه ریزدانه تمیز بین ۱۹ تا ۲۴ درجه تعیین شده است (Subramanian, 2008). زاویه اتساع به اندازه ۲۰ درجه کمتر از زاویه اصطکاک داخلی است (Vermeer & De Borst, 1984). در این تحقیق چون



شکل ۱۵- حداکثر کرنش برشی در کل محیط دایک در زمان عدم وقوع جوشش

عمق پرده آببند = ۱۰ سانتی‌متر و طول بلانکت = ۲ متر

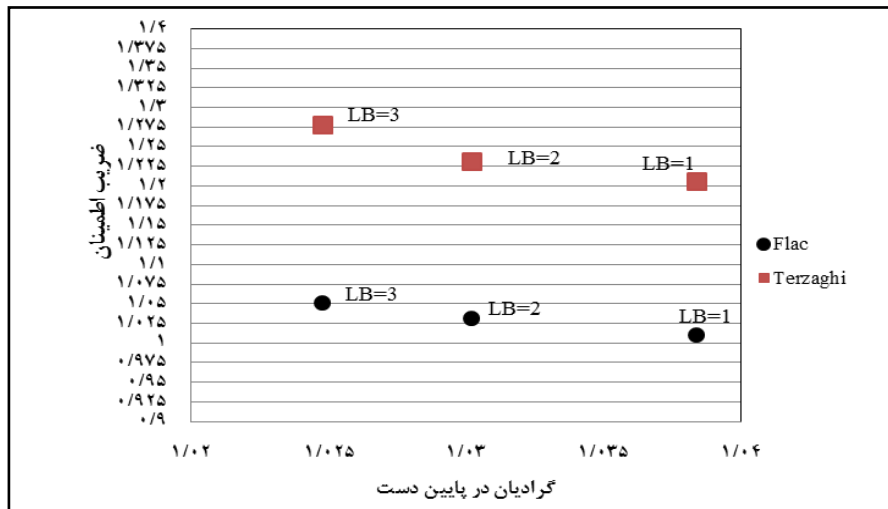
$FOS = \text{ضریب اطمینان}$ ؛  $\gamma' = \text{وزن مخصوص خاک در غوطه‌وری (نیوتن بر مترمکعب)}$ ؛  $i_{av} = \text{گرادیان هیدرولیکی}$ ؛ و  $\gamma_w = \text{وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب)}$ .

ضرایب اطمینان به دست آمده از FLAC و نتایج حاصل از محاسبات دستی به روش ترزاقی در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ در نمودارهایی مقایسه شد که نشان می‌دهد و نتایج حاصل از FLAC محافظه‌کارانه‌تر است (در نمودارهای ترسیم شده ترزاقی مربوط به محاسبات دستی می‌باشد). اساس تعیین FOS در محیط FLAC همان نسبت نیروی مقاوم به محرک است (Anon, 2000)، با این تفاوت که فقط عامل وزن و فشار پیژومتریک را لحاظ نمی‌کند اما عواملی مانند زاویه اصطکاک خاک، زاویه اتساع خاک و زاویه اصطکاک بین خاک و پرده آببند را نیز لحاظ می‌کند. با زیاد شدن اثر پارامترها روی ضریب اطمینان در محیط FLAC، قطعاً اعداد کمتری حاصل خواهد شد و طبیعی است که اعداد محافظه‌کارانه و با اختلاف نسبت به روش ترزاقی به دست آید.

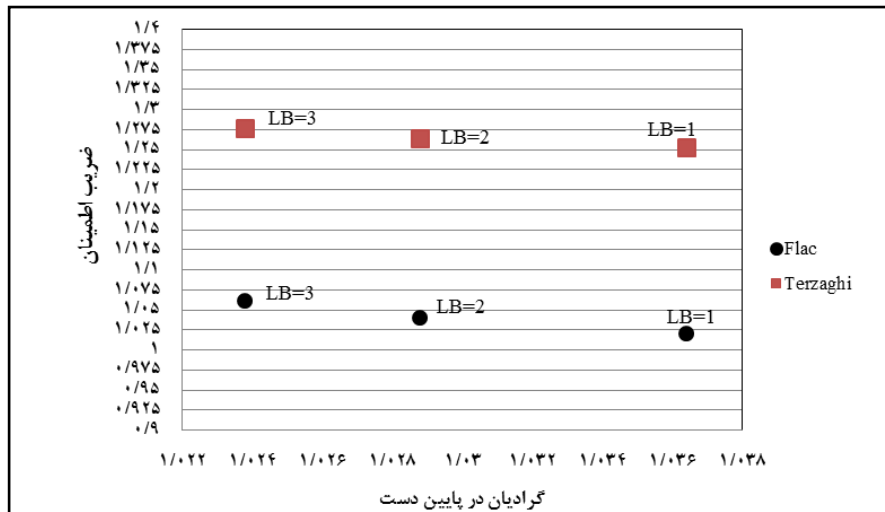
در مدل ارائه شده برای مدل آزمایشگاهی دایک ساحلی برای تعیین ضریب اطمینان در برابر جوشش پس از اتمام بررسی رفتار مکانیکی خاک، برای حالات مختلف ضریب اطمینان تعیین گردید. طبق شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ با افزایش عمق پرده آببند و افزایش طول بلانکت ضریب اطمینان افزایش پیدا می‌کند که روند کاملاً منطقی دارد. با خواندن فشار پیژومتریک از روی نتایج حاصل از آنالیز و رابطه مرسوم ترزاقی، ضریب اطمینان نیز محاسبه شد. ترزاقی روش دقیقی برای تعیین ضریب اطمینان در پایین‌دست پرده آببند همراه بلانکت ارائه نکرده است، برای محاسبه ۱۰ سانتی‌متری پایین‌دست به عمق ۲۰ سانتی‌متر بحرانی‌ترین قسمت در برابر جوشش طبق رابطه ۶ به صورت دستی محاسبه گردید (Rahimi, 2002).

$$FOS = \gamma' / i_{av} \gamma_w \quad (6)$$

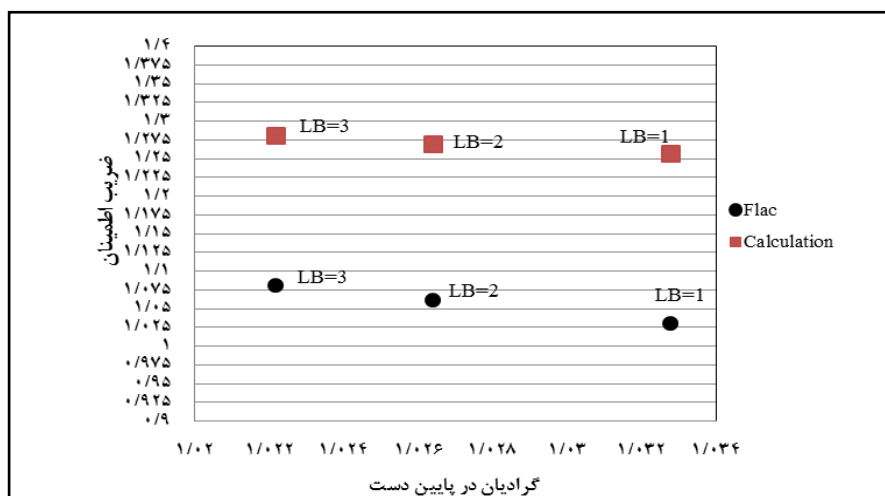
که در آن،



شکل ۱۶- نمودار FOS بر اساس گرادین در پایین دست دایک عمق پرده آب‌بند = ۲۰ سانتی‌متر و طول بلانکت = ۱، ۲ و ۳ متر



شکل ۱۷- نمودار FOS بر اساس گرادین در پایین دست دایک عمق پرده آب‌بند = ۳۰ سانتی‌متر و طول بلانکت = ۱، ۲ و ۳ متر



شکل ۱۸- نمودار FOS بر اساس گرادین در پایین دست دایک عمق پرده آب‌بند = ۴۰ سانتی‌متر و طول بلانکت = ۱، ۲ و ۳ متر

## نتیجه‌گیری

با تعیین مکانیزم جوشش در پایین دست دیواره

آب‌بند می‌توان نوع حفاری و دستگاه‌های مورد نیاز برای حفاری را طوری انتخاب کرد که کمترین خرابی و خسارت ایجاد شود. با بالا بردن زاویهٔ اتساع تا ۱۵ درجه احتمال وقوع جوشش کم می‌شود. زاویهٔ اتساع و وزن مخصوص خاک روی مکانیزم و شکل بالازدگی در خاک‌های ماسه‌ای تاثیر دارد.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ضریب اطمینان حاصل از FLAC محافظه‌کارانه‌تر از نتایج حاصل از روش ترزاقی است.

بر اساس نتایج ارائه شده، مدلسازی صحیح این سازه‌ها در محیطی مانند FLAC می‌تواند قبل از اجرای طرح، مکانیزم بالازدگی را بر اساس آنالیز تنش به خوبی پیش‌بینی کند و با راهکارهای مانند افزایش طول پردهٔ آب‌بند و یا استفاده از بلانکت، با طولانی‌تر کردن مسیر جریان از رخ دادن آن جلوگیری شود.

افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی سبب افزایش قابل توجه ضریب اطمینان در برابر جوشش برای خاک‌های ماسه‌ای می‌شود.

## قدردانی

نویسندگان از دانشگاه یاسوج برای حمایت مالی و فنی از این پروژه قدردانی و از پیشنهادهای شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب و جناب آقای مهندس خلیلیان تشکر می‌کنند.

## مراجع

- Anon. 2000. Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC-2D). ITASCA Consulting Group, Inc. Minneapolis.
- Barchard, J. 2002. Centrifuge modeling of piled embankments on soft soil. M. Sc. Thesis. Graduate Academic Unit of Civil Engineerin. University of Brunswick. USA.
- Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, Inc. New York.
- Benmebarek, N., Benmebarek, S. and Kastner, R. 2005. Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam. Comput. Geotech. 32, 264-273.
- Rahimi, H. 2002. Earth Dams. Tehran University Pub. Tehran, Iran. (in Persian)
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. and Khaleghi, H. 2010. Experimental analysis of seepage flow under coastal dikes. Exp. Tech. 34(4):49-54.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. and Khaleghi, H. 2012. Laboratory investigation of the seepage control measures under coastal dikes. Exp. Tech. 36(1): 61-71.
- Streeter, V. L. and Wylie, E. B. 1981. Fluid Mechanics. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Subramanian, N. 2008. Design of Steel Structures. Oxford University Press. USA.

مدلسازی عددی رفتار جریان نشت از پی‌های...

Vermeer, P. A. and De Borst, R. 1984. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, 29(3): 3-64.

Wilkins, M. L. 1964. Fundamental Methods in Hydrodynamics. In: Alder, B., Fernbech, S. and Rotenberg, M. (Eds.) *Methods in Computational Physics*. Vol. 3. Academic Press. New York.

## **Numerical Modeling of Seepage Flow Behavior from Permeable Alluvial Foundations**

**E. Azar<sup>\*</sup>, M. Sedghi-Asl and M. Parvizi**

<sup>\*</sup> Corresponding Author: M. Sc. Student of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: eazar111@gmail.com

Received: 27 September 2015, Accepted: 5 December 2015

The protection of agricultural lands from sea water intrusion in countries with low coasts is of great importance. The present study investigated a soil failure mechanism to measure seepage force by numerical simulation of a laboratory coastal dike in FLAC software using the finite difference method. The results indicate that the FLAC model properly simulated soil behavior. The model predicted boiling with high accuracy and it was possible to predict the heaving mechanism after use of blanket and sheet piles seepage control measures using the stress analysis before implementing the final design. The results show that it is possible to decrease the hydraulic gradient and, thus, risk of boiling by lengthening the flow path. The safety factor was determined using FLAC without the need for manual calculation. Terzaghi equations indicate that the safety factor against boiling depends on several geotechnical parameters. The safety factor was determined in FLAC by considering the geotechnical parameters of friction angle, angle of dilation, type of material, and angle of friction between the soil and sheet pile.

**Keywords:** Alluvial Foundation, Boiling, Effective Stress, Failure, Stability Coefficient Effervescence