

مطالعه‌ی عددی پدیده‌ی جوشش ماسه‌های روان در مجاورت دیواره‌ی آب‌بند

الهه آذر (دانشجوی کارشناسی ارشد)

منصور پرویزی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه باسوج

محمد صدقی اصل (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی کشاورزی، دانشگاه باسوج

مهندسی عمران شریف، (پیاورد ۱۳۹۵)
دربی ۲ - ۳۲، شماره ۱/۱، ص. ۱۱۳-۱۲۰، (پادداشت نوی)

حفاری‌های عمیق جهت ساخت‌وساز، جزء لاینفک شهرسازی محسوب می‌شوند. حفاری عمیق، لازمه‌ی احداث تونل‌ها و پارکینگ‌های زیرزمینی و سازه‌هایی از این قبیل است. معمولاً نیروها در محل حفاری توسط انواع دیواره‌های آب‌بند در جهت قائم و افقی مهار می‌شوند. سپر فولادی، نوعی دیواره‌ی آب‌بند است که سطح آب در اطراف آن در تعیین عمق حفاری نقش اساسی دارد. نشست آب در خاک باعث کاهش پایداری خاک اطراف سپری می‌شود و در نهایت، سبب ایجاد بالازدگی یا جوشش در کف محل حفاری می‌شود. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار ۲D-FLAC مبتنی بر روش تفاضل محدود صریح، اثر عوامل مختلف در مکانیزم وقوع گسیختگی و ضریب اطمینان در برابر جوشش در مجاورت سپری فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که FLAC می‌تواند براساس آنالیز تنش، پدیده‌ی جوشش را به‌طور مناسبی مدل‌سازی کند.

eazar111@gmail.com
parvizi@yu.ac.ir
msedghi@yu.ac.ir

واژگان کلیدی: جوشش، دیواره‌ی آب‌بند، ماسه، نشست، ضریب اطمینان.

۱. مقدمه

ارتفاع D ($0 \leq D \leq D_0$) در پایین ایجاد می‌کند.^[۲] فرض بر این است که در هنگام رخ دادن گسیختگی، تنش در راستای عمودی و زاویه‌ی اصطکاک برابر صفر است. از این رو منشور بالازده زمانی کاملاً ناپایدار می‌شود که نیروی آب (U_e) بر نیروی وزن گوه (W') غلبه کند. ضریب اطمینان در برابر بالازدگی طبق رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$F_S = W'/U_e = i_c/i_m \quad (1)$$

که در آن، i_m میانگین گرادیان هیدرولیکی بین IJ و EF، i_c گرادیان هیدرولیکی بحرانی است.

با توجه به اینکه سازه‌هایی که بر روی پی‌های آبرفتی و دلتائی ساخته می‌شوند، در اثر نیروی حاصل از نشست، مستعد تخریب موضعی مثل جوشش در امتداد کوتاه‌ترین مسیر نشست و یا تخریب عمومی توده‌ی بزرگ‌تری از خاک هستند، بررسی دقیق میزان آب نشستی از این نوع پی‌ها بسیار مهم است. روش ترقاقی که در حال حاضر برای کنترل پدیده‌ی جوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد، براساس روش تعادل است. این در حالی است که فقط تکیه بر این روش و نرم‌افزاری مانند Seep-w، که اساس آن تعادل نیرو است، نمی‌تواند به‌صورت صحیح این پدیده‌ی مخرب را پیش‌بینی کند.

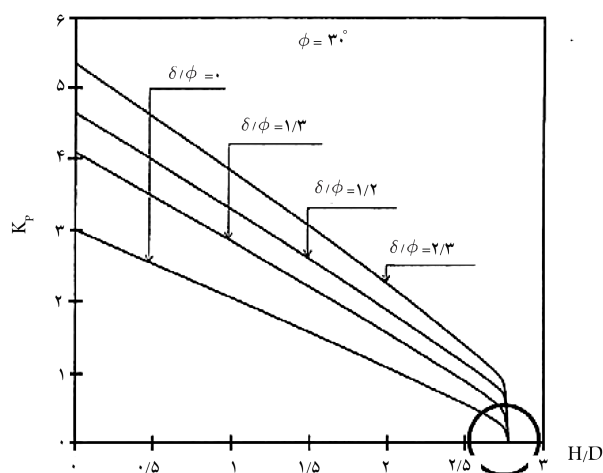
مثلاً سد قیصرق سراپ، که سد خاکی با هسته‌ی رسی مرکزی در استان آذربایجان

حفاری‌های عمیق در توسعه‌ی جوامع شهری کاربرد فراوان دارد، که دیواره‌های نگهدارنده لازمه‌ی این نوع حفاری‌های هستند. طراحی دیواره‌های نگهدارنده سازه‌هایی مانند: پی‌های عمیق، پارکینگ‌های زیرزمینی، و تونل‌ها اهمیت زیادی دارد.^[۱] علاوه بر این، سپری‌های فولادی در سواحل ماسه‌بی به اهداف مختلفی از جمله: حفظ اراضی کشاورزی ساحلی و عدم اختلاط آب شور دریا و آب شیرین اراضی احداث می‌شوند. نشست آب و بالآمدن سطح آب زیرزمینی می‌تواند سبب ایجاد جوشش و بالازدگی در کف محل حفاری شود. ایجاد جوشش و ناپایداری در محل حفاری بسیار خطرناک و فاجعه‌آمیز است.

روش‌های متعددی جهت تعیین احتمال شکست تحت اثر نیروی نشست وجود دارد، اما با وجود تمام آن‌ها، هنوز وقوع این پدیده‌ی مخرب در پروژه‌های عظیم مشاهده می‌شود. پس بررسی دقیق تر احتمال ایجاد گسیختگی در اثر نشست ضروری است. ترقاقی برای اولین بار (۱۹۴۳)، اثر نیروی نشست در پایداری در برابر حفاری را بررسی کرده و مدل آزمایش وی نشان داده است که در نزدیکی سپری، احتمال بالازدگی منشوری از خاک وجود دارد، که مطابق شکل ۱ نیروی ناشی از نشست آب، گوه‌ی مستطیلی با عرضی به اندازه‌ی نصف عمق پرده‌ی آب‌بند برابر $1/2 D$ و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۷/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۳/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۳۱.



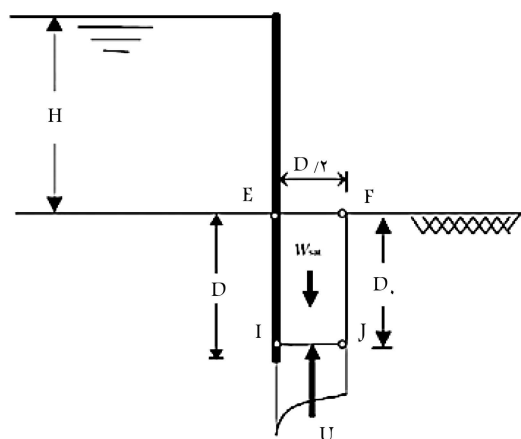
شکل ۳. K_p تغییر H/D برای $\phi = 30^\circ$ ، $\delta/\phi = 0, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4$ برای محیط همگن نیمه بی نهایت [۷]

شود و نیز عرض منشور ایجاد شده کمتر از مقداری است که ترازقی به آن اشاره کرده است. همچنین این نتیجه به دست آمده است که در خاک همگن، گرادیان هیدرولیکی به دست آمده در صورتی که برابر گرادیان بحرانی باشد، سبب شروع ناپایداری از پایین دیواره می‌شود. [۶]

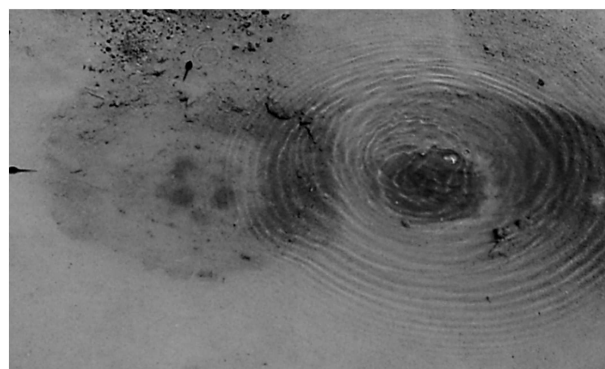
برخی پژوهشگران (۱۹۹۹) نیز به روش تعادل حدى، اثر حضور گرادیان هیدرولیکی در ضریب مقاومت فشاری را بررسی کرده‌اند. مطابق نتایج پژوهش مذکور (شکل ۳)، در یک محیط همگن و همسان با کاهش نسبت ارتفاع آب بالادست به عمق سپری (H/D)، ضریب مقاومت فشاری تقریباً به صورت خطی سبب افزایش K_p می‌شود. همچنین K_p به زاویه اصطکاک بین خاک و دیواره بستگی دارد؛ اما زمانی که $H/D = 2/28$ است، اثر آن از بین می‌رود. در ضمن زاویه اصطکاک در نسبت H/D جهت گسیختگی یا بالازدگی اثر ندارد و به روش ترازقی نشان دادند در حالت $H/D = 2/82$ ، گسیختگی یا بالازدگی رخ می‌دهد، در حالی که جوشش در شرایط بحرانی دقیقاً در نقطه‌ی E (شکل ۱) رخ می‌دهد. [۷]

همچنین در سال ۲۰۰۷ نیز محققان به بررسی جامع پیشینه‌ی پژوهش راجع به پدیده‌ی نشست آب در خاک و چگونگی وقوع پدیده‌ی پایداری در خاک‌های مختلف پرداخته‌اند. [۸] اولین ابزارها جهت طراحی سدهای خاکی جهت مقاومت در برابر پدیده‌ی نشست در سال‌های ۱۹۱۰ الی ۱۹۳۵ توسعه پیدا کرده است. پدیده‌ی جوشش به صورت: ۱. بالازدگی، ۲. فرسایش درونی، ۳. فرسایش به سمت عقب نمایان می‌شود؛ البته حالات دیگر نیز امکان پذیر است. کارهای اخیر بر روی نشست به وضوح نشان می‌دهد که طراحی و ساخت در وقوع پدیده‌ی نشست نقش اساسی دارد. براساس آزمایش‌های استاندارد می‌توان پتانسیل پدیده‌ی نشست را برای خاک‌های چسبیده ارزیابی کرد. اما تاکنون روشی برای خاک‌های غیرچسبیده ارائه نشده است. با این حال، روش‌هایی جهت ارزیابی پتانسیل خود فیلتراسیون وجود دارد. طی پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی رایانه، ارزیابی نشست و تغییر شکل در سدها صورت می‌گیرد، اما جهت مدل‌سازی پتانسیل نشست آب، تعداد برنامه‌های رایانه‌ی محدود است. [۸]

پژوهشگران دیگری نیز در سال ۲۰۱۲ به بررسی عوامل مؤثر در نشست از پی دایک‌های ساحلی پرداخته‌اند. یکی از عوامل تخریب هیدرولیکی دایک‌های ساحلی، سدهای خاکی، سدهای بتنی، و سایر سازه‌های هیدرولیکی نشست جریان آب از پی است. در سازه‌های هیدرولیکی مقدار تلفات آب از داخل بدنه و پی باید به کمینه‌ی



شکل ۱. گسیختگی به دلیل بالازدگی. [۲]



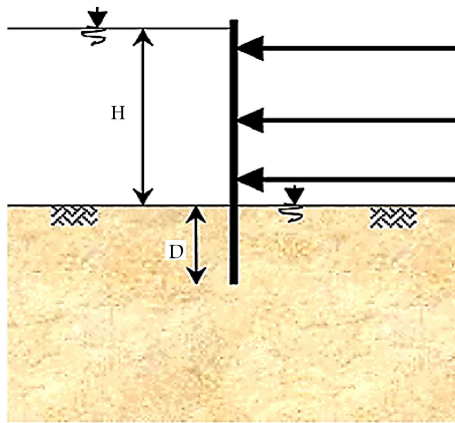
شکل ۲. گودال به وجود آمده در اثر پدیده‌ی جوشش. [۳]

شرقی است، در پایین دست آن پس از آبیگری، گودال‌هایی پر از آب مشاهده شده است که ناشی از بروز پدیده‌ی جوشش بوده است. همچنین جوشش آب از گودال‌ها با شسته شدن مصالح پی سد همراه بوده است (شکل ۲). [۳]

همچنین در پژوهش دیگری (۱۹۴۹) برای کنترل جوشش و فرسایش درونی، یک ضریب اطمینان طبق رابطه‌ی ۲ به صورت نسبت گرادیان هیدرولیکی بحرانی به گرادیان هیدرولیکی خروجی تعیین و دو نوع عمده‌ی تخریب ناشی از نشست تعریف شده است، که عبارت‌اند از: ۱. تخریب موضعی مثل زیرشویی یا جوشش، که به احتمال زیاد از یک نقطه در مجاورت پرده‌ی آب‌بند و در امتداد کوتاه‌ترین مسیر نشست شروع می‌شود؛ ۲. اغتشاش و تخریب عمومی که توده‌ی بزرگ‌تری از خاک را شامل می‌شود. [۴] همچنین در پژوهش مذکور، جدول‌هایی جهت تعیین ضریب اطمینان در زمان حفاری تنظیم شده است.

$$F = i_c / i_e \quad (2)$$

در پژوهش دیگری نیز در سال ۱۹۵۳، طی آزمایش‌های زیاد بر روی ماسه‌های سست و متراکم در محل حفاری با حضور آب این نتیجه به دست آمده است که در خاک‌های ماسه‌ی سست، زمانی ناپایداری رخ می‌دهد که فشار در پای سپر فولادی به اندازه‌ی باشد که بتواند منشوری از خاک را در پایین دست به مرحله‌ی غوطه‌وری برساند و در حالتی که ماسه به صورت متراکم باشد گرادیان هیدرولیکی در زمان حفاری به حد بحرانی برسد، ناپایداری رخ می‌دهد. [۵] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۵۴ با بررسی معادلات تعادل با وجود فشار منفذی نشان داده شده است که بالازدگی فقط در زمانی رخ می‌دهد که نیروی عمودی برشی صفر



شکل ۴. دیواره‌ی آب‌بند.

فرض شده است. در این حالت فقط رفتار هیدرواستاتیکی خاک مدل شده است. آنالیز انجام شده توسط کد کامپیوتری ^۳FLAC-۲D، که بر مبنای تفاضل محدود است، انجام شده است. رفتار خاک به صورت کاملاً کشسان با مدل موهر-کلمب مدل سازی شده است. اثر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، زاویه‌ی اتساع، زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و دیواره، و وزن مخصوص خاک ماسه‌یی در مکانیزم جوشش ماسه در پایین دست مورد بررسی قرار گرفته است. بازه‌ی وزن مخصوص خاک اشباع مورد بررسی $2/1 \leq \gamma_{sat}/\gamma_w \leq 1/6$ و زاویه‌ی اصطکاک مورد بررسی در بازه‌ی $30^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$ بوده است و همچنین نسبت زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و دیوار و زاویه‌ی اصطکاک داخلی $1, 2/3, 1/3, 0$ و $\delta/\phi = 0$ و نسبت زاویه‌ی اتساع ماسه و زاویه‌ی اصطکاک داخلی $1, 2/2, 0$ در نظر گرفته شده است.

در آنالیز انجام شده توسط کد رایانه‌یی برنامه‌ی ^۳FLAC-۲D، برای حل معادلات جبری از یک روش صریح وابسته به زمان استفاده می‌شود. باید توجه داشت برخلاف تصور عموم، روش تفاضل محدود به زون‌های مستطیلی شکل محدود نمی‌شود. در FLAC بر پایه‌ی مطالعات ویلکینز (۱۹۶۴)،^[۱۱] از روشی استفاده شده است که می‌توان معادلات دیفرانسیل در روش تفاضل محدود از زون‌های با شکل‌های مختلف محاسبه کرد. روش تفاضل محدود بهترین روش تحلیل برای سیستم‌های رفتاری مشکل آفرین مانند: مدل‌های غیرخطی، کرنش بزرگ، و ناپایدار فیزیکی محسوب می‌شود. مکانیزم استفاده از FLAC بدین ترتیب است: ۱. ایجاد یک شبکه‌ی تفاضل محدود، ۲. اعمال مدل رفتاری و خصوصیات مصالح، ۳. اعمال شرایط مرزی.^[۱۲]

هنگامی که در FLAC جریان عبور سیال از بین خلل و فرج محیط مدل سازی می‌شود، طبق رابطه‌ی ترزاقی و تیلور، سه نیرو بر واحد حجم خاک در ماتریس سختی وارد می‌شود، که عبارت‌اند از: وزن خاک، نیروی شناوری و نیروی حاصل از نشت، که بی‌ی (۱۹۷۲)،^[۱۳] نیز به این نتایج دست یافته است. بسته‌ی عددی FLAC نیز طبق همین قوانین عمل می‌کند. این نیروها به صورت اتوماتیک در FLAC نظر گرفته شده و معادله‌ی حاکم در این بسته‌ی عددی، مطابق رابطه‌ی ۳ است:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho_s g_j = 0 \quad (3)$$

که در آن، ρ_s چگالی زهکشی نشده، σ_{ij} بردارگرانشی، g_j تنش مؤثر است. می‌توان چگالی زهکشی نشده را نیز مطابق رابطه‌ی ۴ تعیین کرد:

$$\rho_s = \rho_d + n \rho_w \quad (4)$$

که در آن، ρ_d چگالی زهکشی شده، ρ_w چگالی سیال، n تخلخل و s درجه‌ی

ممکن رسانده شود، تا سازه از نظر پایداری، حاشیه‌ی ایمنی مورد نظر را داشته باشد. دایک‌های ساحلی از جمله سازه‌های هیدرولیکی هستند که در مناطق دلتایی و سواحل احداث می‌شوند. این نوع سازه‌ها به دلیل پی ماسه‌یی، بسیار مستعد نشت و پدیده‌ی جوشش هستند. در پژوهش ذکر شده، بررسی‌ها با استفاده از یک مدل ساخته شده‌ی آزمایشگاهی به طول ۹ متر، ارتفاع و عرض ۱ متر با اسکلت فولادی و جداره‌های شیشه‌یی و پلاکسی گلاس انجام شده و مصالح پی مدل، ماسه‌ی تمیز ساحلی بوده است. نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که نسبت طول بهینه‌ی بلانکت و عمق پرده‌ی آب‌بند به عمق آب مخزن و ضخامت پی به منظور کمینه‌سازی دبی نشتی و کنترل فرسایش درونی به ترتیب ۸ و ۰/۸ بوده است.^[۹]

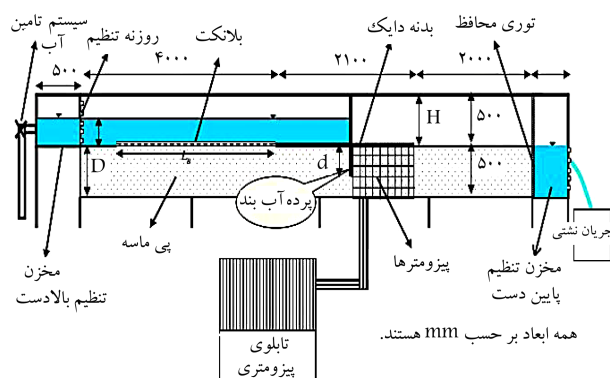
همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۱، به بررسی پدیده‌ی نشت در زمان حفاری و در محیط همسان‌گرد (همگن و غیرهمگن) پرداخته شده و نیز خاک چند لایه با خاک ماسه‌یی همگن تحت جریان متقارن موقعیت جریان به روش تفاضل محدود طی کدنویسی در محیط ^۳FLAC-۲D مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای مختلفی در پایداری سد موقت تأثیر دارد. لذا در پژوهش ذکر شده تأثیر شکل حفاری، همسان و غیر همسان بودن خاک در کاهش ارتفاع آب بالا با رانش مؤثر مقاوم خاک صفر مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۰]

در این پژوهش به بررسی انواع مکانیزم شکست ناشی از نشت در پایین دست یک نوع دیواره‌ی آب‌بند از جنس سپر فولادی پرداخته شده و در نهایت، روش عددی جهت ارزیابی شکست ناشی از نشت و بررسی مکانیزم ناپایداری در محل حفاری ارائه شده است. برای درک بهتر از پدیده‌ی شکست ناشی از نشت آنالیز عددی، جریان نشت بر روی پایداری در پایین دست سپرهای فولادی توسط نرم افزار ^۳FLAC-۲D انجام شده است، که مبنای کار این نرم افزار تفاضل محدود صریح بوده است.

تاکنون هیچ‌گونه مقایسه‌یی بین مدل سازی رفتاری خاک در محیط‌های ماسه‌یی روان با نتایج آزمایشگاهی انجام نشده است. لذا این پژوهش برای اولین بار به دنبال صحت‌سنجی مدل سازی رفتاری پدیده‌ی جوشش در پی‌های آبرفتی است. در این پژوهش به منظور پیش‌بینی صحیح و مطمئن عدم وقوع این پدیده تأثیر پارامترهای جدید مانند: زاویه‌ی اتساع، زاویه‌ی اصطکاک خاک، زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و دیوار آب‌بند و عوامل دیگر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در صورتی که در روش ترزاقی این عوامل دخیل نیستند و نتایج دقیقی حاصل نمی‌شود.

۲. اصول و گام‌های مدل سازی

در پژوهش حاضر با روش عددی به بررسی پایداری پایین دست دیواره‌ی آب‌بند از نوع سپرهای فولادی مهار شده^۱ در برابر نیروی ناشی از نشت پرداخته شده است. دیواره‌ی آب‌بند مورد نظر به عمق D در یک محیط نیمه بی‌نهایت از خاک نصب شده است، که در بالادست آن به ارتفاع H آب وجود دارد (شکل ۴). در این مدل سازی پارامترهای زیادی از جمله: عمق فرو رفتگی در خاک، جنس و ابعاد پرده‌ی آب، مشخصات خاک، و ارتفاع آب بالادست مؤثر است، که در این پژوهش به تمامی آن‌ها پرداخته نشده است؛ اما این موضوع بررسی شده است که آیا روش تفاضل محدود قادر به مدل سازی صحیح مکانیزم‌های مختلف ناپایداری ناشی از نشت در پایین دست دیواره‌ی آب‌بند خواهد بود. بنابراین ساده سازی در مدل صورت گرفته و دیواره به صورت کاملاً ثابت در بافت خاک استقرار و مدل شده است. در عمل این دیواره توسط دستک‌ها^۲ کاملاً در خاک تثبیت و همچنین جنس خود سپری بی‌نهایت صلب



شکل ۷. شماتیک مدل آزمایشگاهی.^[۱۰]

سخت‌ترین زون موجود در مرز مورد بررسی است.^[۱۲] علاوه بر آن، برای مدل‌سازی محل بین پرده‌ی آب‌بند و ماسه احتیاج به تعیین زاویه‌ی اصطکاک بین صفحه‌ی سپری و ماسه است. اگر نوع سپری فولادی باشد، این زاویه در حدود ۲۲ درجه و اگر نوع سپری بتنی باشد، این زاویه در محدوده‌ی ۱۹-۲۴ درجه است. البته در این پژوهش حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است:^[۱۴]

$$ES = \frac{(K + \frac{1}{3}G)}{\Delta Z_{min}} \quad (7)$$

که در آن، Δz_{min} اندازه‌ی کمینه‌ی بُعد المان است.

$$K_n = 10 \cdot ES \quad (8)$$

$$K_s = 10 \cdot ES \quad (9)$$

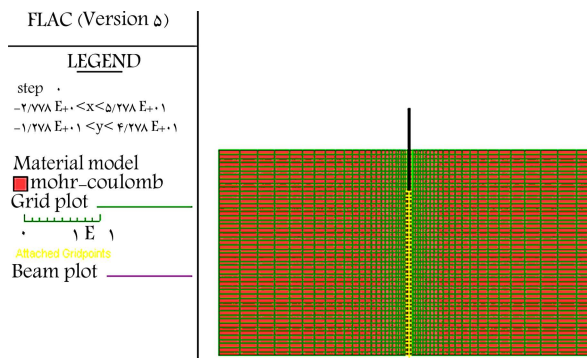
برای ماسه‌ی ریز، مدول کشسانی $E = 10^{-14}$ (Mpa) و ضریب پواسون $\nu = 0.25$ است.^[۱۴] با توجه به اینکه هدف از این پژوهش، بررسی وضعیت پی در بحرانی‌ترین شرایط است؛ لذا ماسه‌ی بسیار سست با مدول کشسانی (Mpa) $E = 10^{-14}$ در نظر گرفته شده است.

برای بررسی صحت نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC، ابتدا مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده‌ی کشاورزی کرج مدل‌سازی شده است. مدل آزمایشگاهی مذکور، یک دایک ساحلی است که جهت بررسی دبی نشت و مسائل مربوط به آن ساخته شده است، که علاوه بر آن حین آزمایش، پدیده‌ی جوشش نیز مشاهده شده است. طول آن ۹ متر، ارتفاع و عرض ۱ متر از جنس اسکلت فولادی و جداری شیشه‌یی و پلاکسی‌گلاس^۵ است. ارتفاع دایک ۵۰ سانتی‌متر، عرض آن ۱۰۰ سانتی‌متر و طول آن ۲۱۰ سانتی‌متر از جنس پلاکسی‌گلاس با ضخامت ۸ میلی‌متر است. شکل ۷، طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.^[۹]

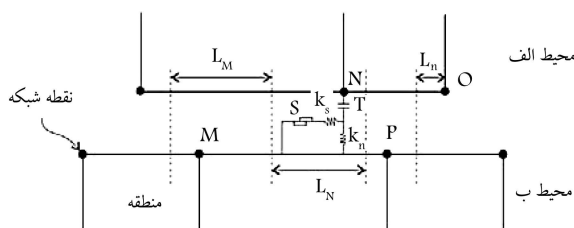
در این مدل آزمایشگاهی با استفاده از ۱۱ پیزومتر، که در پایین‌دست در عمق ۳۰ cm با فواصل ۱۰ cm از یکدیگر نصب شده‌اند، فشار آب منفذی قرائت و ثبت شده است. با مدل‌سازی پرده‌ی آب‌بند ۳۰ cm در FLAC، دقیقاً فشار منفذی در محل پیزومترهای مدل آزمایشگاهی بررسی شده است.

۳. نتایج

طبق شکل ۸ مشاهده می‌شود که نتایج مربوط به تعیین فشار آب منفذی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی دارند.



شکل ۵. شبکه‌بندی مدل عددی در محیط ۲D-FLAC.



شکل ۶. مدل‌سازی اتصال دو المان متفاوت در FLAC.^[۱۲]

اشباع است. همچنین تنش مؤثر طبق رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - p\delta_{ij} \quad (5)$$

که در آن، δ_{ij} دلتا کرنبرو p فشار است. پس از جای‌گذاری روابط ۴ و ۵ در رابطه‌ی ۳ و محاسبات انجام‌شده، رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

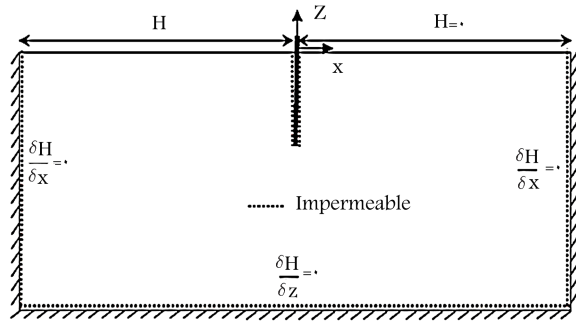
$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \rho a g_i - (1-n) \frac{\partial p}{\partial x_i} - n \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

که در آن، به ترتیب ارتفاع پیزومتر و تخلخل هستند. همچنین $\rho a g_i$ وزن خاک، $(1-n) \frac{\partial p}{\partial x_i}$ نیروی شناوری و $n \gamma_w \frac{\partial \phi}{\partial x_i}$ نیروی نشت را نشان می‌دهد.^[۱۲] در مرحله‌ی نخست مدل‌سازی نمونه، شبکه‌بندی جهت ایجاد شبکه‌ی تفاضل محدود انجام شده است (شکل ۵).

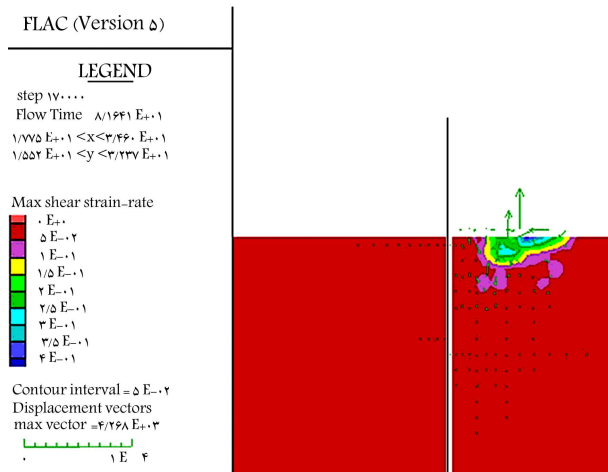
در گام بعدی با توجه به اینکه جنس پرده‌ی آب‌بند و پی مدل متفاوت است، مدل‌سازی محل بین دیوار و خاک، جزء لاینفک آنالیز است. به عبارتی دیگر، نیروی اصطکاک ماسه و پرده‌ی آب‌بند در روند محاسبات نقش دارد. در این پژوهش، ویژگی‌های مصالح و سختی هر قسمت به‌صورت مجزا اختصاص داده شده است. در شکل ۶، اتصال بین دیوار و خاک که توسط کلمب^۴ ساده‌سازی شده است، نشان داده شده است. اتصال دو طرف المان با خاک و تمایز دو المان به‌صورت منطقی نمایش داده شده است. فتر به‌صورت مماسی بر روی مرز المان، معیار مقاومت برشی کلمب را نشان می‌دهد.

که در آن، S لغزنده، T مقاومت کششی، k_n سختی نرمال، k_s سختی برشی، $L_m = M$ و $L_n = N$ که هر دو طول سهم مربوط به گره در دو جهت x و y می‌باشند.

به منظور اعمال خصوصیت مربوط به سطح مشترک دو المان، باید سختی قائم (k_n) و سختی برشی (k_s) منطقه‌های مجاور محاسبه شود. طبق روابط ۷، ابتدا پارامتر ES و سپس براساس روابط ۸ و ۹، سختی قائم و سختی برشی در حالت سطح مشترک متصل محاسبه می‌شود. سختی معادل مقدار سختی



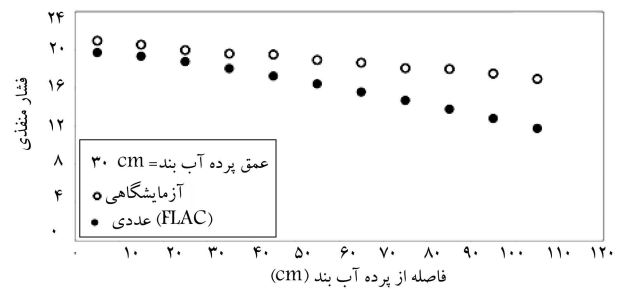
شکل ۱۱. شرایط مرزی هیدرولیکی.



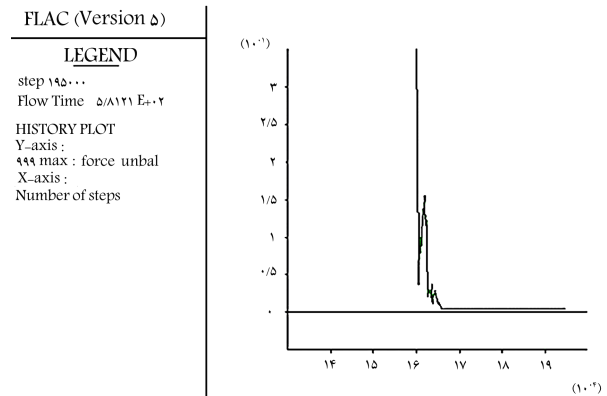
شکل ۱۲. نرخ کرنش در زمان وقوع جوشش.

عددی انجام شده بر روی دیوار آببند بر روی خاک‌های متفاوت و از نظر زاویه‌ی اصطکاک و وزن مخصوص صورت گرفته است. عوامل مؤثر در نسبت H/D ، یعنی ارتفاع آب بالادست به عمق پرده‌ی آببند، برای خاک ماسه‌یی سست بررسی شده است. خاک‌های ماسه‌یی با زوایای اصطکاک در بازه‌ی 30° - 40° درجه و وزن مخصوص در بازه‌ی 1600 - 2100 (kg/m^3) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین تأثیر تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و دیواره‌ی آببند و زاویه‌ی اتساع در پدیده‌ی جوشش مورد بررسی قرار گرفته است. طی محاسبات و آنالیزهای انجام شده، مکانیزم ناپایداری خاک در پایین دست به صورت بالازدگی مستطیلی با مثلی و یا جوشش کامل و گسیختگی کامل خاک صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، زاویه‌ی اصطکاک بین دیوار آببند و زاویه‌ی اتساع، وزن مخصوص خاک نیز در پدیده‌ی جوشش و مکانیزم آن تأثیر دارد.

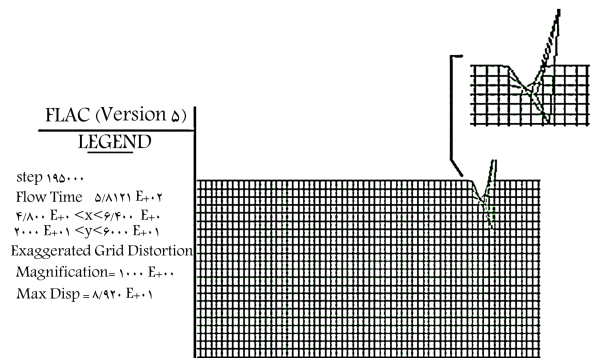
در صورتی که خاک سست باشد، در وزن مخصوص کمتر از 1700 (kg/m^3)، خاک در پایین دست کاملاً ناپایدار خواهد بود و جوشش ماسه اتفاق می‌افتد. افزایش نرخ کرنش در شکل ۱۲ و عدم هم‌گرایی نیروی نامتعادل به صفر در شکل ۱۳، نشان‌دهنده‌ی وقوع جوشش در پایین دست دیواره است. علاوه بر آن شکل ۱۴، تغییر شکل در پایین دست؛ شکل ۱۵، به تسلیم رسیدن بافت خاک؛ و شکل ۱۶، تنش مؤثر در پایین دست را نشان می‌دهند، که عملاً ذرات را به سمت بالا هدایت می‌کنند، و تمام نتایج مبنی بر وقوع جوشش است. با قوی‌تر شدن خاک و زیاد شدن وزن مخصوص و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، بالازدگی مستطیلی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در این حالت منشور



شکل ۸. چگونگی کاهش فشار بالاتر در عمق پرده‌ی آببند 30 سانتی‌متر.



شکل ۹. نمودار پیشینه‌ی نیروی نامتعادل در زمان وقوع جوشش به ازاء عمق پرده‌ی آببند 30 سانتی‌متر.



شکل ۱۰. تغییر شکل گریدها در پایین دست در زمان وقوع جوشش در محل گسیختگی.

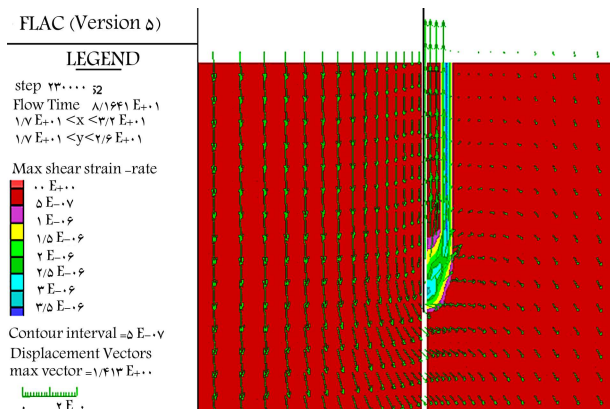
علاوه بر این در نمونه‌ی آزمایشگاهی در عمق 30 cm پرده‌ی آببند در پایین دست، ناپایداری و جوشش مشاهده شده است. مطابق شکل ۹، نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC نیز نشان می‌دهد که نیروی نامتعادل به صفر همگرا نشده و مطابق شکل ۱۰، محیط در پایین دست کاملاً ناپایدار شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده، مدل‌سازی صحیح این سازه‌ها در محیط FLAC می‌تواند قبل از اجرای طرح، مکانیزم بالازدگی را براساس آنالیز تنش به خوبی پیش‌بینی کند. در ادامه، در ابعاد واقعی دیواره‌ی آببند مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط مرزی در این مدل مطابق شکل ۱۱ است.

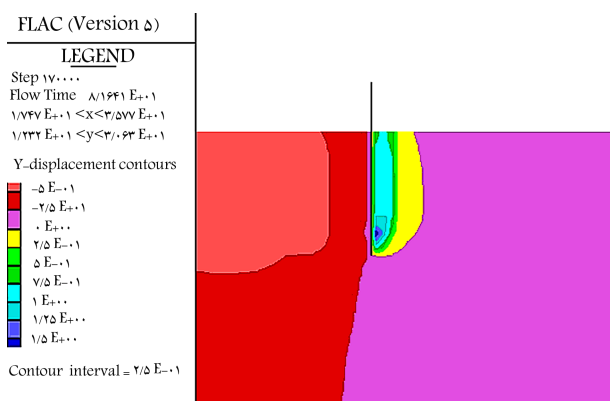
روان‌گرایی، یک نوع جریان جوشش ماسه است و زمانی رخ می‌دهد که مقاومت برشی خاک، کمتر از تنش برشی لازم برای تعادل استاتیکی توده‌ی خاک (تنش برشی استاتیکی) باشد.^[۱۵] بر این اساس در این پژوهش مدل عددی موهر - کولمب مورد استفاده قرار گرفته و ناپایداری خاک با استفاده از آن بررسی شده است. بررسی‌های

استوانه‌یی در فاصله‌یی کمتر از محلی که روش تیرزاقی پیش بینی می‌کند، رخ می‌دهد. شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ وقوع بالازدگی مستطیلی را نشان می‌دهند. در صورتی که ماسه، زاویه‌ی اتساع داشته باشد و وزن مخصوص از (kg/m^3) ۱۸۰۰ بیشتر باشد، بالازدگی به صورت گوه‌ی مثلثی خواهد بود. شکل‌های ۲۱ الی ۲۴ وقوع بالازدگی مثلثی را نشان می‌دهند.

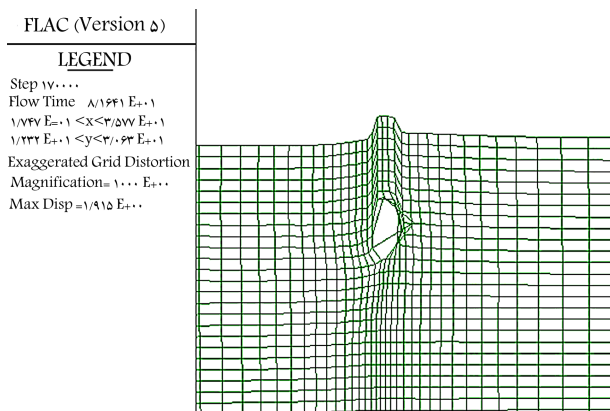
بررسی عددی انجام‌شده بر روی دیوار آب‌بند بر روی خاک‌های متفاوت از نظر زاویه‌ی اصطکاک و وزن مخصوص مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت H/D برای خاک ماسه‌یی نسبت بستگی به زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اصطکاک



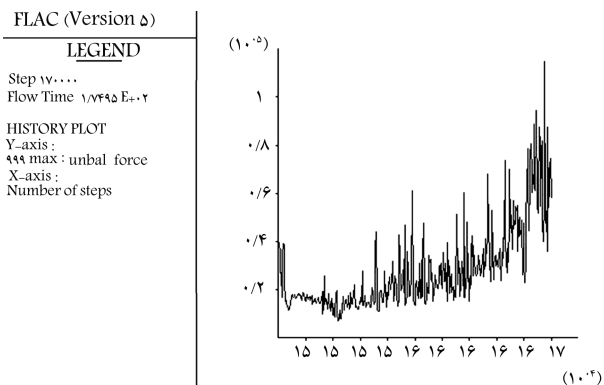
شکل ۱۷. نرخ کرنش در زمان وقوع بالازدگی منشور مستطیلی.



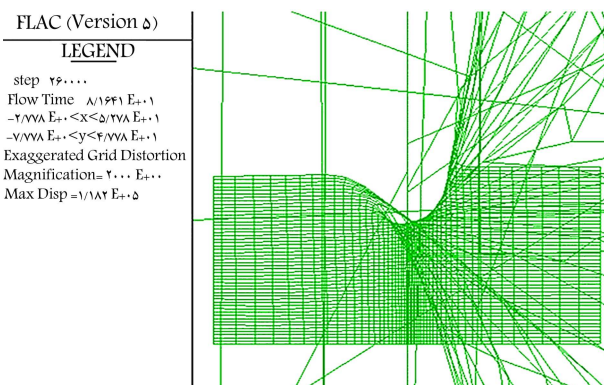
شکل ۱۸. جابه‌جایی در جهت y زمان وقوع بالازدگی منشور مستطیلی.



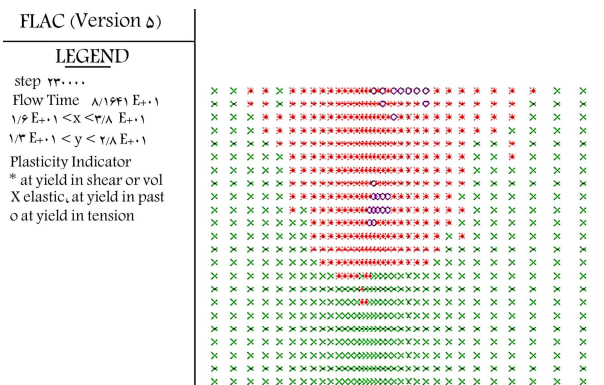
شکل ۱۹. تغییر شکل در زمان وقوع بالازدگی منشور مستطیلی.



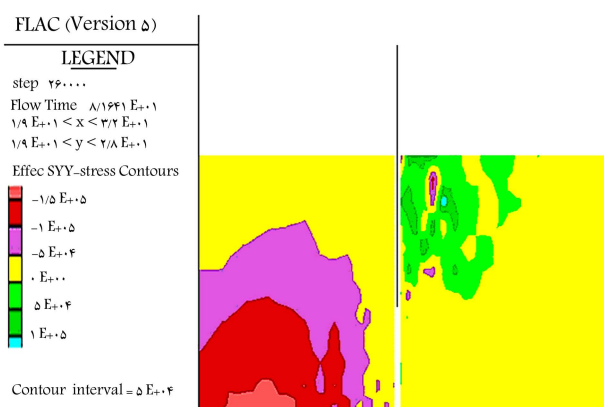
شکل ۱۳. نیروی نامتعادل در زمان وقوع جوشش.



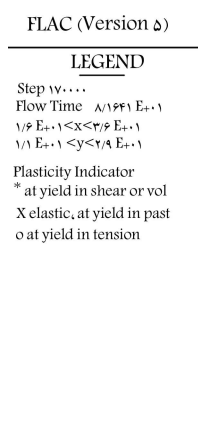
شکل ۱۴. تغییر شکل در زمان وقوع جوشش.



شکل ۱۵. به تسلیم رسیدن در زمان وقوع جوشش.



شکل ۱۶. تنش مؤثر زمان وقوع جوشش به ازاء عمق پردی آب‌بند ۳۰ cm.

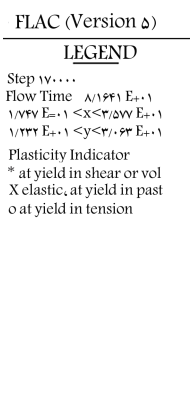


شکل ۲۴. به تسلیم رسیدن در زمان وقوع بالازدگی منشور مثلی.

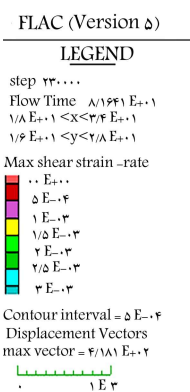
جدول ۱. بررسی مکانیزم جوش در خاک ماسه‌یی.

مکانیزم جوش							
$\theta = (30^\circ - 40^\circ)$		$H/D = 4$		γ_{sat}/γ_w			
δ/θ	φ/θ	۱/۶	۱/۷	۱/۸	۱/۹	۲/۱۰	۲/۱۱
۰	۰	***	***	*	*	*	+
	۰/۵	***	***	***	***	+	+
	۱	***	***	***	***	+	+
۱/۳	۰	***	***	***	*	+	+
	۰/۵	***	***	***	***	+	+
	۱	***	***	***	***	+	+
۲/۳	۰	***	***	***	*	*	+
	۰/۵	***	***	***	***	+	+
	۱	***	***	***	***	+	+
۱	۰	***	***	*	*	*	+
	۰/۵	***	***	***	***	+	+
	۱	***	***	***	***	+	+

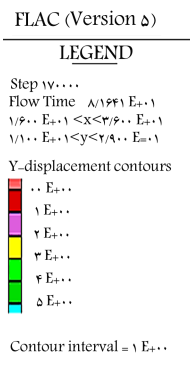
بین دیوار و خاک، و زاویه‌ی اتساع خاک دارد. طی بررسی‌های انجام‌شده در حالتی که $H/D < 4$ و وزن مخصوص خاک کمتر از $1900 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ باشد، قطعاً ناپایداری در پایین‌دست رخ می‌دهد. تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بین خاک و دیوار آب‌بند و زاویه‌ی اتساع بر روی پدیده‌ی جوشش مورد بررسی قرار گرفته است. طی محاسبات و آنالیزهای انجام‌شده، مکانیزم ناپایداری خاک در پایین‌دست به صورت بالازدگی مستطیلی یا مثلی و یا جوشش کامل و گسیختگی کامل خاک صورت گرفته است. در پایان با دیدگاه محافظه‌کارانه می‌توان گفت برای زاویه‌ی اصطکاک در محدوده‌ی $30^\circ - 40^\circ$ و $H/D > 4$ ، مکانیزم جوشش مطابق جدول ۱ است. در جدول مذکور، *** جوشش، ** بالازدگی مثلی، * بالازدگی مستطیلی، و + پایداری در برابر جوشش را نشان می‌دهند. همچنین در آن: θ زاویه‌ی اصطکاک داخلی، δ زاویه‌ی بین دیوار آب‌بند و خاک، φ زاویه‌ی اتساع، γ_{sat} وزن مخصوص خاک در حالت اشباع، γ_w وزن مخصوص آب، H ارتفاع آب بالادست و D عمق پرده‌ی آب‌بند هستند.



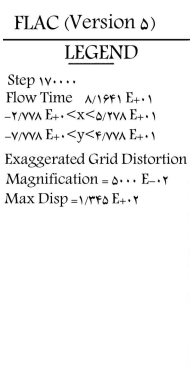
شکل ۲۵. به تسلیم رسیدن در زمان وقوع بالازدگی منشور مستطیلی.



شکل ۲۶. نرخ کرنش و بردارهای جابه‌جایی در زمان وقوع بالازدگی.



شکل ۲۷. جابه‌جایی در جهت Y در زمان وقوع بالازدگی منشور مثلی.



شکل ۲۸. تغییر شکل در زمان وقوع بالازدگی منشور مثلی.

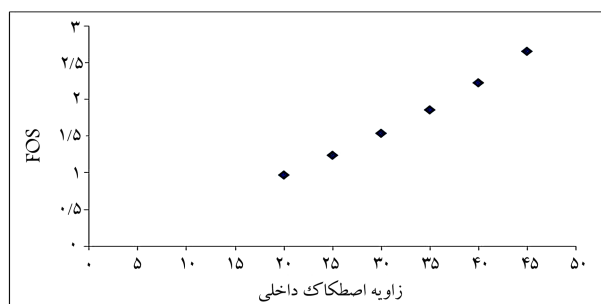
نمونه برای خاک ماسه‌یی با وزن مخصوص (kg/m^3) ۲۱۰۰، اثر زاویه‌ی اتساع در ضریب اطمینان را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

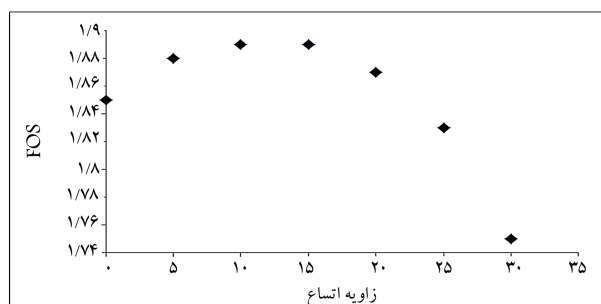
با وجود پژوهش‌های فراوان در زمینه‌ی نشست و جوشش هنوز این پدیده به صورت دقیق، صحیح، و در عین حال مطمئن قبل از احداث سازه‌های هیدرولیکی پیش‌بینی نمی‌شود. بیشتر مدل‌های عددی مورد استفاده به صورت کلی و براساس فشار آب منفذی این پدیده را ارزیابی می‌کنند و مدل‌های آزمایشگاهی موجود، اغلب زمان‌بر و غیراقتصادی هستند. در این پژوهش مدل عددی در محیط نرم‌افزار FLAC تنظیم شده است، که علاوه بر محاسبه‌ی فشار آب منفذی قابلیت بررسی رفتار خاک در اثر وجود جریان آب را دارد. همچنین قادر به تعیین ضریب اطمینان در برابر جوشش با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتری نسبت به روش ترزاقی و بدون نیاز به محاسبات دستی است. در نرم‌افزار رایج Seep-w جهت تعیین ضریب اطمینان روشی مستقیم و مطمئن وجود ندارد و احتیاج به محاسبات دستی است.

با توجه به اینکه پدیده‌ی جوشش و زیرسویی در سازه‌های هیدرولیکی با پی‌های آبرفتی بسیار مخرب و نامطلوب است، براساس نتایج ارائه‌شده در این نوشتار، مدل‌سازی صحیح این سازه‌ها در محیط FLAC می‌تواند قبل از اجرای طرح، مکانیزم بالازدگی را براساس آنالیز تنش به خوبی پیش‌بینی کند. انطباق مناسب نتایج این نرم‌افزار با طرح‌های آزمایشگاهی دلیل بر دقیق بودن این روش جهت بررسی جوشش در خاک‌های ماسه‌یی است. آنالیزهای عددی انجام‌شده نشان می‌دهد که مکانیزم شکل‌گسیختگی و ارتفاع آب بالادست به خصوصیات خاک بستگی دارد.

- تعیین نسبت H/D که سبب ایجاد ناپایداری در خاک‌های ماسه‌یی می‌شود، به عواملی چون زاویه‌ی اصطکاک داخلی، زاویه‌ی اتساع، زاویه‌ی بین خاک و دیواره‌ی آب‌بند و وزن مخصوص خاک بستگی دارد.
- افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی سبب افزایش قابل توجه ضریب اطمینان در برابر جوشش برای خاک‌های ماسه‌یی می‌شود.
- برای خاک‌های ماسه‌یی متراکم، افزایش زاویه‌ی اتساع تا ۱۵ درجه سبب افزایش ضریب اطمینان و برای زاویه‌ی اتساع بیشتر از ۱۵ درجه سبب کاهش ضریب اطمینان می‌شود.
- زاویه‌ی اتساع و وزن مخصوص خاک بر روی مکانیزم و شکل بالازدگی در خاک‌های ماسه‌یی تأثیر دارد. در صورتی که خاک زاویه‌ی اتساع داشته باشد، مکانیزم جوشش به صورت منشور مثلثی خواهد بود. با اطلاع از این موضوع نوع حفاری و خاک‌برداری در پایین‌دست دیواره‌ی آب‌بند تعیین می‌شود.
- در خاک‌های ماسه‌یی با وزن مخصوص کمتر از (kg/m^3) ۱۹۰۰ و $H/D < 4$ ، قطعاً ناپایداری در پایین‌دست رخ می‌دهد.
- در خاک‌های ماسه‌یی با وزن مخصوص کمتر از (kg/m^3) ۱۷۰۰ و $H/D < 4$ ، قطعاً جوشش رخ می‌دهد.
- در حالتی که بالازدگی به صورت منشور مستطیلی صورت گیرد، عرض آن کمتر از عرضی است که از روش ترزاقی به دست می‌آید.
- با تعیین مکانیزم جوشش در پایین‌دست دیواره‌ی آب‌بند می‌توان نوع حفاری و دستگاه‌های مورد نیاز برای حفاری را طوری انتخاب کرد که کمترین خرابی و خسارت ایجاد شود.



شکل ۲۵. افزایش ضریب پایداری در برابر جوشش با افزایش زاویه‌ی اصطکاک.



شکل ۲۶. تغییرات ضریب پایداری در برابر جوشش با تغییر زاویه‌ی اتساع.

با اطلاع از مکانیزم جوشش می‌توان به گونه‌یی حفاری را انجام داد که احتمال وقوع این پدیده به کمینه‌ی خود برسد. بنابر معادلات ترزاقی طبق روابط ۱۰ و ۱۱، ضریب پایداری در برابر جوشش فقط با پارامترهای مربوط به ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک ارتباط دارد. در مدل سازی انجام‌شده نشان داده شده است که زاویه‌های اتساع و اصطکاک داخلی نیز در ضریب پایداری تأثیر دارند.

$$FS = \frac{W'}{U} = \frac{\gamma'}{i_{av}\gamma_w} = \frac{i_{cr}}{i_{ex}} \quad (10)$$

$$i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (11)$$

ضریب اطمینان در FLAC از روش «کاهش مقاومت»^۶ تعیین می‌شود. در این روش طبق روابط ۱۲ و ۱۳، مقاومت برشی کاهش می‌یابد، تا جایی که به تعادل حدی خود برسد.

$$C^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} C \quad (12)$$

$$\phi^{trial} = \arctan \frac{1}{F^{trial}} \tan \phi \quad (13)$$

که در آن، F^{trial} به عنوان عامل احتمالی کاهش پارامترهای چسبندگی C و زاویه اصطکاک داخلی ϕ استفاده می‌شود. تا جایی این پارامترها کاهش می‌یابد که خاک گسیخته شود. این محاسبات به روش براکت انجام می‌شود. با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی، ضریب پایداری در برابر جوشش (FOS) افزایش می‌یابد (شکل ۲۵). زاویه‌ی اتساع نیز در FOS تأثیر دارد. این زاویه برای خاک‌های ماسه‌یی سست کمتر از ۱۰ درجه است و برای خاک‌های ماسه‌یی متراکم، ۱۵ درجه است. برای خاک ماسه‌یی با افزایش زاویه‌ی اتساع تا ۱۵ درجه، FOS افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه‌ی اتساع بیشتر از ۱۵ درجه، FOS کاهش می‌یابد. شکل ۲۶، به عنوان

1. braced sheet pile
2. struts
3. fast lagrangian analysis of continua
4. Coulomb
5. Plexiglas
6. strength reduction technique

منابع (References)

1. Benmebarek, N., Benmebarek, S. and Kastner, R. "Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam", *Computers and Geotechnics*, **32**(4), pp. 264-273 (2005).
2. Terzaghi, K., *Theoretical soil Mechanics*, New York, Wiley (1943).
3. Morady, Gh., Abaszadeh, A. "Substrates of gypsum and case study of qeysary sarab", fifth material congress of Civil engineering, Mashhad, (in Persain) (2010).
4. McNamee, J. "Seepage into a sheeted excavation", *Geotechnique*, **4**(1), pp. 229-234 (1949).
5. Marsland, A. "Model experiments to study the influence of seepage on the stability of a sheeted excavation in sand", *Geotechnique*, **4**(7), pp. 223-241 (1953).
6. Davidenkoff, R.N. "Zur berechnung des hydraulischen grundbruches", *Wasserwirtschaft*, **46**, pp. 298-307 (1954).
7. Soubra, A.-H., Kastner, R. and Benmansour, A. "Passive earth pressures in the presence of hydraulic gradients", *Geotechnique*, **49**(3), pp. 319-330 (1999).
8. Richards, K. and Krishna, R. "Critical appraisal of piping phenomena in earth dams", *Bull Eng Geol Environ*, **66**(4), pp. 381-402 (2007).
9. Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. and Khaleghi, H. "Laboratory investigation of the seepage control measures under coastal dikes", *Experimental Techniques*, **36**(1), pp. 61-71 (2012).
10. Bouchelghoum, F. and Benmebarak, N. "Critical hydraulic head loss assessment for a circular sheet pile wall under axisymmetric seepage conditions", *Studia Geotechnica et Mechanica*, **33**(4), p. 3 (2011).
11. Wilkins, M.L. "Fundamental methods in hydrodynamics", in: AdlerB. Et al (Eds.), *Methods in Computational Physics*, **3**, Academic Press, New York, pp. 211-263 (1964).
12. *FLAC-2D. Fast Lagrangian Analysis of Continua*, ITASCA Consulting Group, Inc., Minneapolis (2000).
13. Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, New York, Dover (1972).
14. Subramanian, N., *Design of Steel Structures*, Oxford University Press, USA (2008).
15. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Upper Saddle. River, NJ, pp. 349-350 (1996).