



بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر نوسانات سطح ایستابی در پایداری شیب های خاکی

سید حسین حسینی^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، علی حسین زاده دلیر^۲، پیام خسروی نیا^۱، پیمان ورجاوند^۱

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

چکیده

شیب های خاکی همواره با خطر ناپایداری و گسیختگی دیواره مواجه می باشند. یکی از عوامل مهم در ناپایداری شیب ها، تغییرات سطح ایستابی در شرایط مختلف نظیر نوسانات بارندگی در فصول مختلف است. این تحقیق به تاثیر نوسانات سطح ایستابی در پایداری شیب های خاکی به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداخته است. نتایج مدل فیزیکی نشان می دهد که افزایش فشار پیژومتریکی، افزایش سطح نشت و افزایش گرادیان خروجی عوامل گسیختگی در حضور سطح ایستابی می باشند. با افزایش سطح ایستابی، فشار پیژومتریکی و سطح نشت در داخل خاک افزایش می یابد و با توجه به افزایش درجه ی اشباع خاک، احتمال ناپایداری شیب و نهایتاً وقوع پدیده ی گسیختگی زیاد خواهد شد. با کاهش شیب، از یک طرف پایداری ذرات خاک و از طرف دیگر سطح نشت روی شیب بیشتر می شود که نتیجه ی این امر عدم پایداری خاک است و از آن پس کاهش شیب نیز تاثیر زیادی در افزایش پایداری ندارد. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی فشار، خط نشت و دبی جریان، مطابقت خوبی با مدل فیزیکی داشتند به طوری که متوسط خطای شبیه سازی فشار و دبی به ترتیب ۲٪ و ۵/۷٪ به دست آمده است. مقایسه ی این نتایج نشان می دهد که بهترین روش برای کنترل گسیختگی در حضور آب زیرزمینی، کنترل فشار پیژومتریکی و کاهش سطح نشت است و کاهش شیب تاثیر چندانی بر این مسئله ندارد.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، سطح نشت، شیب خاکی، فشار پیژومتریکی، گسیختگی.

۱- مقدمه

یکی از عوامل موثر در ناپایداری خاکریزهای شیبدار نیروی برشی است که توسط تنش موثر کنترل می شود. تنش موثر به صورت تفاضل تنش کل و فشار آب منفذی تعریف می شود. بالا آمدن سطح آب، افزایش فشار آب منفذی را به همراه دارد که موجب کاهش تنش موثر و به دنبال آن سبب کاهش پایداری شیب خاکریزها می گردد؛ بنابراین فشار

با توجه به تفاوت میزان و شدت بارش در فصول مختلف و وقوع پدیده ی خشکسالی، تراز سطح ایستابی در طول سال نوسان دارد. این نوسان علاوه بر وارد نمودن خسارات به محصولات کشاورزی، سبب ناپایداری خاکریزهای خاکی و شیب جانبی کانال ها می شود.

انتهای بالادست نفوذناپذیر می باشد و در مرز پایین دست روی سطح شیبدار نشت، پایین افتادگی سطح جریان ایجاد می شود. زمانی که زاویه سطح نشت در افق بین ۴۵ تا ۹۰ است، شیب خط فریاتیک یا گرادیان هیدرولیکی در نقطه نشت به عنوان شرط مرزی پایین دست بین $1/2$ و $1/2$ تعیین شد که از شیب سطح نشت مستقل می باشد. زمانی که زاویه سطح نشت در افق کمتر از ۴۵ باشد، گرادیان هیدرولیکی معادل $\frac{\tan(\beta + \theta)}{[1 + \tan(\beta + \theta)]}$ در نقطه نشت می شود که β شیب سطح نشت نسبت به کف کانال و θ شیب کف کانال است.

شلمان و همکاران [۹] برای مطالعه اثرات تغییرات آب و هوایی در خاک های شیبدار غیر اشباع، اثر بالا آوردن سطح آب در این خاک ها را به صورت آزمایشگاهی در مدل فیزیکی شیب دار مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر آن، با استفاده از روش المان محدود به شبیه سازی نفوذ در نواحی شیب دار در شرایط جریان پایدار و ناپایدار پرداختند. مقایسه بین نتایج حاصل از اندازه گیری های مدل آزمایشگاهی و عددی تطابق قابل قبولی در شرایط غیر اشباع خاک از خود نشان داد. داده های آزمایشگاهی و تحلیل های عددی یک واکنش تاخیری در فشار آب منفذی در ناحیه غیر اشباع را نشان می دادند که ناشی از بالا آمدن سطح آب بود. به این ترتیب یک چارچوب مفهومی به منظور توصیف حدود بالا و پایین امکان پذیر، برای فشار آب منفذی در اثر بالا آمدن سطح آب در خاک های شیبدار ارائه گردید.

معادله نشت آب در خاک در حالت دو بعدی عبارتست از

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

ϕ پتانسیل، K_x ضریب هدایت هیدرولیکی در جهت x و K_y ضریب هدایت هیدرولیکی در جهت y است. شرایط مرزی عبارتند از شرایط مرزی دیریکله $(\phi = \phi_p)$ و نیومن $(k \frac{\partial \phi}{\partial n} = -q)$. در شرط مرزی نیومن n بردار خارجی عمود بر مرز و q دبی می باشد، معادله ی نشت با روش های عددی مانند روش المان های محدود حل می شود.

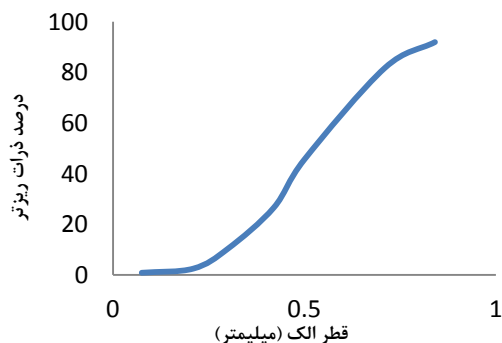
روش المان های محدود یک ابزار قدرتمند برای حل مسائل پیچیده مهندسی می باشد. این روش در زمینه های

آب منفذی نقش حیاتی در پایداری سازه های خاکی دارد. بررسی واکنش فشار آب منفذی نسبت به تغییرات سطح ایستابی به منظور جلوگیری از تخریب شیب خاکریزها بسیار مهم است. طبق نظر چوآگور و همکاران نشت از طریق افزایش فشار آب منفذی خاک، نیروهای گرادیان نشت و جا به جایی و جدایی ذرات، موجب ناپایداری شیب می گردد [۵]. افزایش فشار آب منفذی خاک ممکن است مقاومت برشی خاک را کاهش دهد و نیروهای گرادیان نشت موجب جا به جایی و جدایی ذرات بشوند.

مطالعات زیادی در مورد نشت آب از خاکریزها توسط محققین صورت گرفته است. اولین تحقیقات در رابطه با تحلیل نشت از سدهای خاکی با استفاده از شبکه جریان توسط کاساگرانده در سال ۱۹۳۷ انجام شد. فریز در سال ۱۹۷۱ و پایاگاناکیز و فردلاند در سال ۱۹۸۴ وجود جریان آب بین نواحی اشباع و غیر اشباع در خاک را نشان دادند [۶،۹]. روش محاسبه سطح آزاد نشت را با استفاده از معادله لاپلاس دوبعدی و با فرض اینکه تراز پیزومتریک در امتداد قائم روند غیرخطی دارد، اصلاح نمود. نتیجه محاسبات نشان داد که شیب سطح فریاتیک در نقطه نشت ثابت است و مقدار آن تقریباً ۱- می باشد. چاهر [۳] نشت از کانال های شکاف دار و نواری را به عنوان یک مورد خاص از کانال های چند ضلعی تحلیل کرد و نتایج را برای کانال های مستطیلی، مثلثی و دوزنقه ای ارائه داد. چاهر [۴] راه حل تحلیلی دقیق برای نشت از کانال دوزنقه ای با یک لایه زهکش و آب کم عمق به دست آورد که در آن از هیدروگراف معکوس و تبدیلات شوارتز و کریستوفل برای نصف محدوده نشت استفاده می شود. از این راه حل، موارد خاص دیگری نظیر کانال مستطیلی، دوزنقه ای و مثلثی بدون لایه زهکش، کانال مستطیلی و مثلثی با یک لایه زهکش قابل استخراج است. لی و همکاران [۷] تاثیر سطح نشت در دبی آب زیرزمینی و آلودگی ناشی از آن را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که با کاهش سطح نشت، دبی نشت و آلودگی آن کاهش می یابد. میزومورا و کاندا [۸] به بررسی آزمایشگاهی و تئوری شرایط مرزی پایین دست جریان آزاد آب زیرزمینی در لایه ی آبدار دوزنقه ای که انتهای بالادست آن عمودی و سطح نشت پایین دست آن شیب دار است، پرداختند. جریان در لایه های آبدار دوزنقه ای به صورت آزمایشگاهی با مدل Hele-Shaw شبیه سازی شده است.

۲-۲- مشخصات خاک

به منظور تعیین پارامترهایی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی (k)، ضریب چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی، دانه بندی و تراکم، یک سری آزمایشهای مقدماتی در آزمایشگاه مکانیک خاک گروه مهندسی خاک و پی انجام شد. جدول ۱ مشخصات و شکل ۲ منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده را نشان می دهند.



شکل ۲- منحنی دانه بندی خاک

۲-۳- آماده کردن مدل

شکل ۳ تصویر شماتیک از مدل خاک با محل قرارگیری پیژومترها را نشان می دهد. بخش سمت راست شکل نشان دهنده تراز سطح ایستابی در حین آزمایشها و بخش سمت چپ نشان دهنده تراز آب در کانال می باشد و دایره های سیاه رنگ درون شکل نمایانگر محل قرارگیری پیژومترها هستند. در تحقیق حاضر با توجه به تقارن مدل نسبت به محور مرکزی، نصف مقطع عرضی کانال مدل شده است.

در ابتدا یک لایه از خاک به ضخامت ۴ سانتیمتر با درصد رس حدود ۴۰ درصد به عنوان لایه غیرقابل نفوذ برای شبیه سازی بستر غیرقابل نفوذ در مرز بین خاک و کف مدل قرار داده شد. لایه های خاک با رطوبت بهینه و انرژی تراکم استاندارد BS متراکم می گردد. مقطع خاک با صفحه فلزی به حالتی برش زده شد که شیب دیواره، شیب دلخواه در آزمایشها و کف کانال افقی باشد. نظر به اینکه بدنه ی کانال ها در حین اجرا به حد بهینه متراکم گردید تا پایداری خاک در مقابل گسیختگی بیشتر شود، تراکم در همه آزمایشها همان تراکم بهینه در نظر گرفته شد.

مختلف مهندسی نظیر مکانیک جامدات، انتقال حرارت و هیدرودینامیک به کار گرفته شده است. همچنین این روش در زمینه های ژئوتکنیک، برای تحلیل تنش و حل معادله ی نشت نیز به کار می رود [۱۱]. عطایی آشتیانی و همکاران [۲] نیز مدل عددی دوبعدی برای جریان آب زیرزمینی در لایه ی آبدار آزاد را که شرایط مرزی دوره ای در سطح نشت آن تاثیرگذار بود، ارائه دادند و نتایج تحقیقاتشان را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند.

هدف از تحقیق حاضر مدل سازی نشت آب در مقطع عرضی یک کانال خاکی ذوزنقه ای شکل به صورت آزمایشگاهی است که در آن به بررسی موارد زیر پرداخته شده است: تاثیر توأم سطح آب در کانال و سطح ایستابی از نظر نشت و یا تغذیه، تاثیر آب زیرزمینی در وقوع گسیختگی دیواره شیبدار کانال و مقایسه ی آن با نتایج شبیه سازی مدل عددی.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مدل فیزیکی

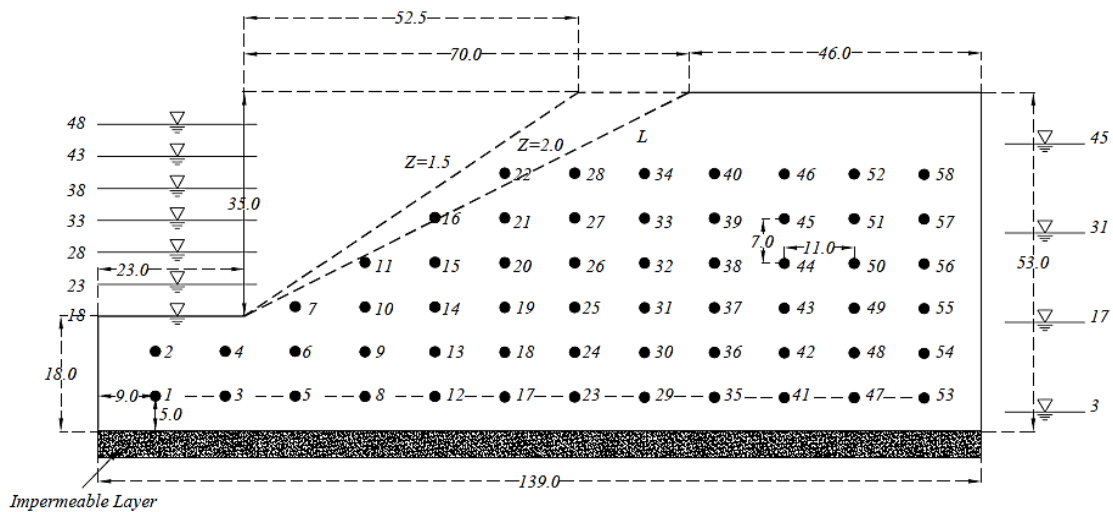
آزمایشهای تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز بر روی مدل فیزیکی دستگاه نشت انجام شد. این مدل شامل یک محفظه از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع ۷۰، عرض ۲۰ و طول ۱۷۰ سانتیمتر می باشد. آب مورد استفاده در این آزمایشها به وسیله یک پمپ از مخزنی که در زیر این دستگاه تعبیه شده است، تامین می شود. در شکل ۱ مدل فیزیکی نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از مدل فیزیکی نشت آب

جدول ۱- مشخصات خاک مورد استفاده

d_{50} (mm)	C_u	C_c	θ_{opt} (%)	γ_d (kg/m ³)	γ_{sat} (kg/m ³)	K (m/s)	C (kg/cm ²)	Φ (degree)
0.525	1.974	1.093	9.2	1471.565	1916.257	0.000206	0.0156	38.88



شکل ۳- تصویر شماتیک مدل خاک و محل قرارگیری پیزومترها (تمامی ابعاد و اندازه ها به سانتیمتر)

۲-۴- آزمایش‌ها

پس از هواگیری همه ی پیزومترها، به منظور ایجاد اختلاف بار ابتدا تراز آب در کانال به مقدار مورد نظر رسانده شد سپس سطح ایستابی را به آرامی بالا آمد تا خاک فرصت کافی برای اشباع شدن داشته باشد. در مواردی که گسیختگی اتفاق افتاد تراز سطح ایستابی در هنگام گسیختگی قرائت شد و پس از ماندگار شدن جریان، اطلاعات برداشت شدند.

به منظور اطمینان از ماندگار شدن جریان پس از ایجاد اختلاف بار مورد نظر، اندازه گیری دبی حجمی با استفاده از بشر به دقت $\pm 2cc$ به نسبت به زمان انجام شد. لحظه ای که اولین ترک ها و حرکات بر روی سطح خاک مشاهده گردید به عنوان شروع گسیختگی در نظر گرفته شد. پس از هر بار گسیختگی دوباره مدل بازسازی و آزمایش بعدی آماده می شد. شکل ۴ سطح خاک قبل و بعد از گسیختگی را به طور نمونه در یک آزمایش نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۴- سطح خاک (الف) قبل و (ب) بعد از گسیختگی

(آزمایش شماره ۲۳)

جدول شماره ۲ مشخصات آزمایش ها را نشان می دهد. ها به دلیل کم بودن اختلاف تراز سطح ایستابی و کانال، همانطور که در این جدول دیده می شود در برخی از حالت- آزمایش انجام نشده است. (مانند آزمایشات ۱۹ و ۲۵).

جدول ۲- مشخصات آزمایش ها در تحقیق حاضر

شماره آزمایش	شیب جانبی (Z)	تراز آب کانال (cm)	تراز سطح ایستابی (cm)	تراز وقوع گسیختگی (cm)	شماره آزمایش	شیب جانبی	تراز آب کانال	تراز سطح ایستابی	تراز وقوع گسیختگی
۱	۱/۵	۴۸	۳	-----	۲۸	۲	۴۸	۳	-----
۲	۱/۵	۴۸	۱۷	-----	۲۹	۲	۴۸	۱۷	-----
۳	۱/۵	۴۸	۳۱	-----	۳۰	۲	۴۸	۳۱	-----
۴	۱/۵	۴۸	۴۵	-----	۳۱	۲	۴۸	۴۵	-----
۵	۱/۵	۴۳	۳	-----	۳۳	۲	۴۳	۳۱	-----
۶	۱/۵	۴۳	۱۷	-----	۳۴	۲	۴۳	۱۷	-----
۷	۱/۵	۴۳	۳۱	-----	۳۵	۲	۴۳	۳	-----
۹	۱/۵	۳۸	۴۵	۴۵	۳۶	۲	۳۸	۳	-----
۱۰	۱/۵	۳۸	۳۱	-----	۳۷	۲	۳۸	۱۷	-----
۱۱	۱/۵	۳۸	۱۷	-----	۳۸	۲	۳۸	۳۱	-----
۱۲	۱/۵	۳۸	۳	-----	۳۹	۲	۳۸	۴۵	۴۵
۱۳	۱/۵	۳۳	۳	-----	۴۰	۲	۳۳	۳	-----
۱۴	۱/۵	۳۳	۱۷	-----	۴۱	۲	۳۳	۱۷	-----
۱۶	۱/۵	۳۳	۴۵	۴۵	۴۳	۲	۳۳	۴۵	۴۵
۱۷	۱/۵	۲۸	۳	-----	۴۴	۲	۲۸	۳	-----
۱۸	۱/۵	۲۸	۱۷	-----	۴۵	۲	۲۸	۱۷	-----
۱۹	۱/۵	۲۸	۴۵	۴۰/۲	۴۷	۲	۲۸	۴۵	۴۱/۸
۲۰	۱/۵	۲۳	۳	-----	۴۸	۲	۲۳	۳	-----
۲۱	۱/۵	۲۳	۱۷	-----	۴۹	۲	۲۳	۱۷	-----
۲۲	۱/۵	۲۳	۳۱	-----	۵۰	۲	۲۳	۳۱	-----
۲۳	۱/۵	۲۳	۴۵	۳۶/۶	۵۱	۲	۲۳	۴۵	۴۱/۵
۲۴	۱/۵	۱۸	۳	-----	۵۲	۲	۱۸	۳	-----
۲۶	۱/۵	۱۸	۳۱	-----	۵۴	۲	۱۸	۳۱	-----
۲۷	۱/۵	۱۸	۴۵	۳۹/۸	۵۵	۲	۱۸	۴۵	۳۹/۳

افتاد و یا اینکه تا تراز تنظیم شده، بدون وقوع گسیختگی بالا رفت.

۳- مدل عددی

در تحقیق حاضر از نرم افزار Seep/W از سری نرم افزارهای GeoStudio2007 برای شبیه سازی جریان استفاده گردید که قابلیت شبیه سازی جریان به صورت ماندگار و غیر ماندگار را دارا می باشد. روش حل معادلات در این نرم افزار المان های محدود می باشد [۱]. سطوح نشت در نتیجه غالب شدن الگوی جریان سه بعدی نزدیک مرز خروجی شکل می گیرد [۱۰]. شرایط مرزی استفاده شده در مدل شامل شرط مرزی

۲-۵- کنترل سطح آب کانال

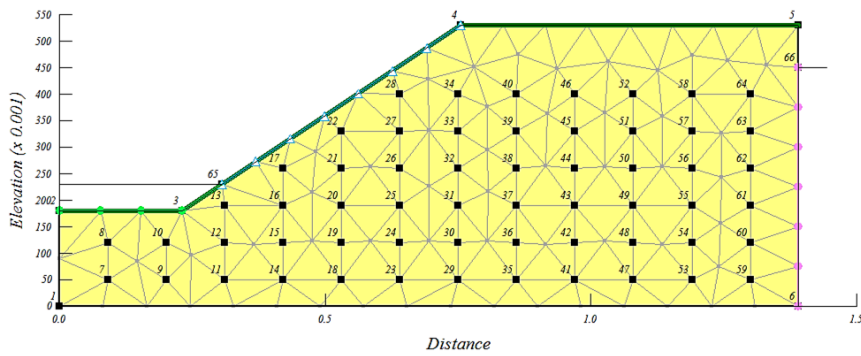
به منظور کنترل سطح آب درون کانال از یک لوله از جنس PVC که قابلیت جا به جایی در جهت قائم داشت، استفاده شد، بدین وسیله سطح آب درون کانال در تراز مورد نظر تثبیت گردید.

۲-۶- کنترل سطح ایستابی

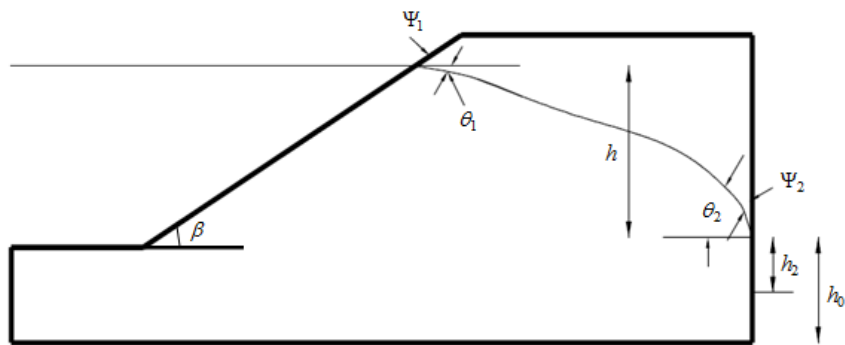
برای این منظور نیز از لوله PVC استفاده شد. ابتدا لوله در تراز مورد نظر قرار گرفت و سپس ارتفاع آب در مخزن مربوط به آب زیرزمینی با سرعت بسیار کم (۳ میلیمتر در ثانیه) بالا آمد تا اینکه در یک تراز سطح ایستابی، گسیختگی اتفاق

توجه به خطای مدل عددی تعداد ۱۲۵۶ المان به عنوان شبکه بهینه برگزیده شد و تمامی مدل ها با استفاده از این شبکه شبیه سازی شدند.

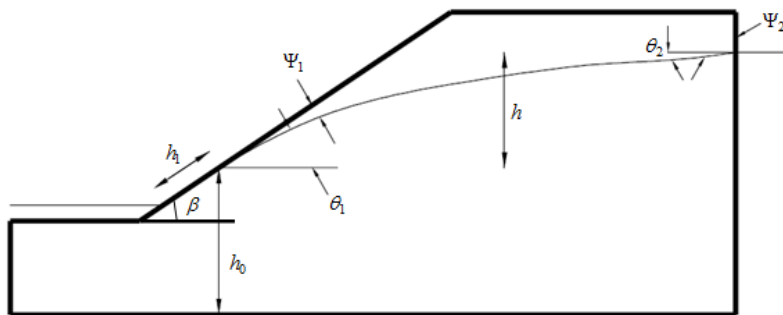
دیواره، شرط مرزی فشار کل و شرط مرزی سطح نشت می باشد که در شکل ۵ آورده شده است، همچنین در این شکل، مدل شبکه خورده مشاهده می شود. تعداد المانها از ۲۳۳ طی ۶ مرحله به ۱۸۹۴ المان افزایش یافت که در نهایت با



شکل ۵- شرایط مرزی به کار رفته و المانهای مثلثی



(الف)



(ب)

شکل ۶- پارامترهای مورد استفاده در تحلیل نتایج: (الف) حالت تخلیه، (ب) حالت تغذیه

پارامترهای مورد استفاده در تحلیل نتایج در شکل ۶ نشان داده شده اند، این پارامترها شامل موارد زیر هستند:

Ψ_1 و Ψ_2 به ترتیب زاویه بین سطح فریاتیک با شیب بدنه کانال و بدنه قائم آب زیرزمینی، θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویه بین

شکل ۱۰ روند تغییرات پارامتر بدون بعد $(u-u^*)/u$ در پیژومترها را نشان می دهد. در این شکل پارامتر u فشار پیژومتریک در هر پیژومتر u^* فشار پیژومتریک (ارتفاع آب) در بخش آب زیرزمینی است که در همه آزمایش ها ۳ سانتیمتر بود. این نمودار برای آزمایش های ۱، ۵، ۱۲، ۱۳، ۱۷ و ۲۴ ارائه شده است. رفتار فشار پیژومتریک در بقیه آزمایش ها نیز مشابه این نمودار می باشد.

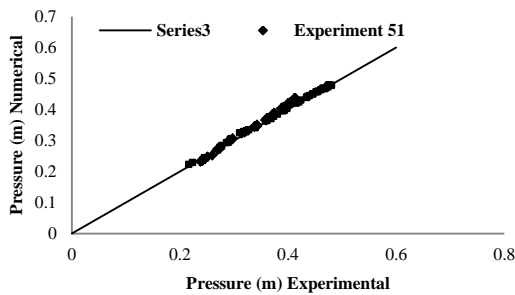
مشاهده می شود که در هر آزمایش با افزایش ارتفاع پیژومتر مقدار فشار نیز افزایش می یابد. این مسئله نمایانگر جهت جریان است که با توجه به آزمایش ها و اختلاف تراز آب، در دوطرف مدل، منطقی می باشد. با توجه به اینکه در این نمودار از آزمایش شماره ۱ تا شماره ۲۴ تراز آب در کانال کاهش می یابد، مشاهده می شود که متناسب با آن فشار نیز کم می شود. همچنین با کاهش تراز آب در کانال، مشاهده می شود که پیژومترها ابتدا روند غیرخطی دارند و سپس این روند خطی می شود. این مسئله بیانگر تغییر رفتار غیرخطی خاک به رفتار خطی، در حین کاهش تراز آب در کانال و کاهش اختلاف ارتفاع آب در دوطرف مدل است که در نتیجه آن انرژی موجود در خاک کاهش می یابد. این روند در پیژومترهای شماره ۱۷ تا ۲۲ به طور کامل مشهود می باشد.

خط فریاتیکی با خط افق در شیب بدنه کانال و بدنه قائم آب زیرزمینی، h ضخامت لایه آب بر روی نقطه نشت، h_1 سطح نشت در بدنه مورب کانال و h_2 سطح نشت در بدنه قائم آب زیرزمینی.

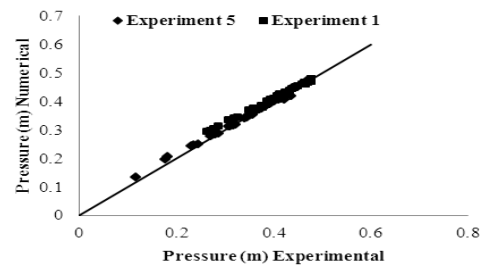
۴- نتایج و بحث

در شکل های ۷ و ۸ نتایج حاصل از مدل عددی و فیزیکی با هم مقایسه شده اند. شکل ۷ این نتایج را برای فشار کل در محل های هر پیژومتر و برای آزمایش های ۱ و ۵ با $z=1.5$ و آزمایش های ۲۹ و ۵۱ در مجموعه آزمایش ها با $z=2$ نشان می دهد و شکل ۸ این مقایسه را برای تمامی آزمایش ها و دبی حجمی جریان بیان می کند. همانطور که از این اشکال مشخص است، شبیه سازی عددی دارای دقت مناسب می باشد و می توان از آن برای تحلیل نتایج بهره برد.

به منظور بررسی قابلیت مدل عددی برای شبیه سازی خط فریاتیکی، ابتدا نقاط خط فریاتیکی در مدل فیزیکی استخراج شدند. این نقاط، نقاطی هستند که در آنها فشار کل با فشار پتانسیل ارتفاعی برابر است. شکل ۹ خط فریاتیکی را در آزمایش های ۲، ۱۹، ۳۵ و ۵۰ برای مدل عددی و فیزیکی نشان می دهد. با توجه به این نمودار مشاهده می شود که دقت مدل عددی برای شبیه سازی خط فریاتیکی مناسب است.

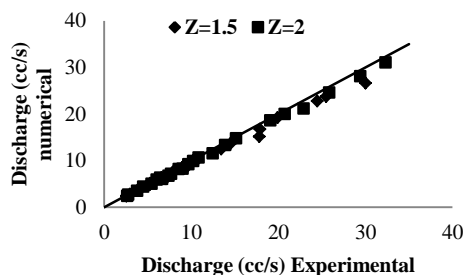


(ب)



(الف)

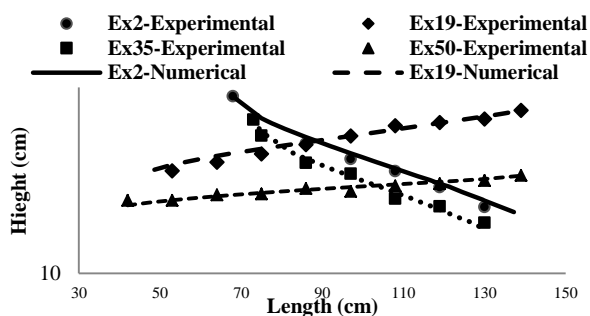
شکل ۷- مقایسه پارامتر فشار در مدل عددی و فیزیکی (الف) $z=1.5$ و (ب) $z=2$



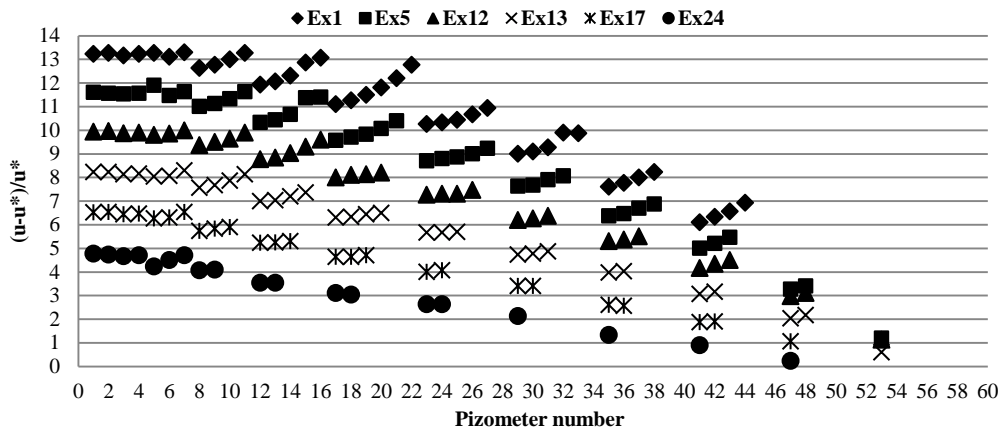
شکل ۸- مقایسه پارامتر دبی در مدل عددی و فیزیکی

جدول ۳- مقادیر فشار کل برای تمام نقاط شبکه در آزمایش ۵۱، Z=2

شماره‌ی پیزومتر	فشار کل (cm)	شماره‌ی پیزومتر	فشار کل (cm)	شماره‌ی پیزومتر	فشار کل (cm)
۱	۲۴/۱۰	۲۱	-----	۴۱	۳۹/۰۵
۲	۲۳/۸۰	۲۲	۲۳	۴۲	۳۹/۰۵
۳	۲۴/۶۵	۲۳	۳۳/۸۰	۴۳	۳۸/۸۰
۴	۲۴/۲۰	۲۴	۳۴/۳۰	۴۴	۳۸/۷۵
۵	۲۶	۲۵	۳۴/۲۰	۴۵	۳۸/۹۰
۶	۲۵/۱۰	۲۶	۳۴/۲۵	۴۶	-----
۷	۲۴/۳۰	۲۷	-----	۴۷	۴۰/۵۰
۸	۲۷/۴۰	۲۸	-----	۴۸	۴۰/۳۰
۹	۲۷	۲۹	۳۵/۹۰	۴۹	۴۰/۲۰
۱۰	۲۷	۳۰	۳۵/۹۰	۵۰	۴۰
۱۱	-----	۳۱	۳۶	۵۱	۴۰/۱۰
۱۲	۲۹/۳۰	۳۲	۳۶/۱۰	۵۲	-----
۱۳	۲۹/۴۰	۳۳	۳۶/۱۰	۵۳	۴۱/۳۰
۱۴	۲۹/۲۰	۳۴	-----	۵۴	۴۱/۲۵
۱۵	۲۹/۸۰	۳۵	۳۷/۲۰	۵۵	۴۱/۲۰
۱۶	۲۳	۳۶	۳۷/۲۰	۵۶	۴۱/۴۰
۱۷	۳۱/۳۰	۳۷	۳۷/۴۰	۵۷	۴۱/۲۵
۱۸	۳۱/۵۰	۳۸	۳۷/۴۰	۵۸	-----
۱۹	۳۱/۹۰	۳۹	۳۷/۵۰		
۲۰	۳۲/۲۰	۴۰	-----		



شکل ۹- خط فریاتیک در مدل فیزیکی و عددی

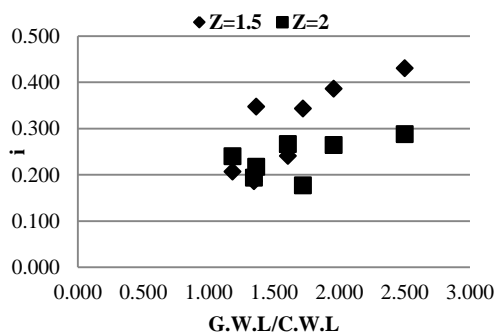


شکل ۱۰- روند تغییرات پارامتر بدون بعد $(u-u^*)/u^*$ در پیزومترها

برای حالتی که کانال در حال تغذیه شدن است نشان می دهد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با افزایش نسبت بدون بعد سطح ایستابی به سطح آب کانال مقدار گرادیان خروجی افزایش می یابد ولی در مورد شیب ملایم تر، این افزایش شتاب کمتری نسبت به شیب بیشتر دارد. همچنین در کل مقدار گرادیان برای شیب های تندتر، بیشتر می باشد که این مسئله خطرناک می باشد.

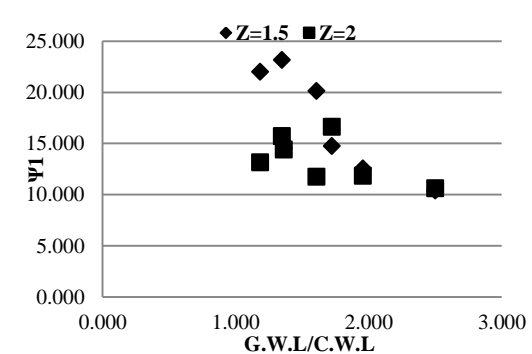
با توجه به شکل های ۱۱ و ۱۲ می توان نتیجه گرفت که کاهش شیب دیواره کانال باعث پایین افتادن سطح فریاتیک می شود و در نتیجه آن گرادیان خروجی کاهش می یابد و در عین حال سطح نشت را بیشتر می نماید.

شکل ۱۱ تغییرات زاویه Ψ_1 در مقابل نسبت بدون بعد سطح ایستابی به سطح آب کانال را برای حالت هایی که کانال در حال تغذیه شدن است، نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود که با کم شدن شیب، در ابتدا این زاویه به شدت کاهش می یابد ولی در مقادیر بیشتر اختلاف در سطح ایستابی و کانال، مقدار Ψ_1 برای هر دو شیب به هم نزدیک می شود. این مسئله بیانگر بحرانی تر بودن سطح فریاتیک در شیب های کمتر می باشد؛ زیرا در اثر آن سطح بیشتری از شیب در بالای سطح آب کانال (سطح نشت) اشباع شده است؛ ولی به دلیل کمتر بودن شیب از زاویه ایستابی ذرات و نسبت به حالت شیب تندتر، پایداری بیشتری دارد.



شکل ۱۲- تغییرات گرادیان خروجی از سطح نشت در مقابل نسبت بدون بعد سطح ایستابی به سطح آب کانال

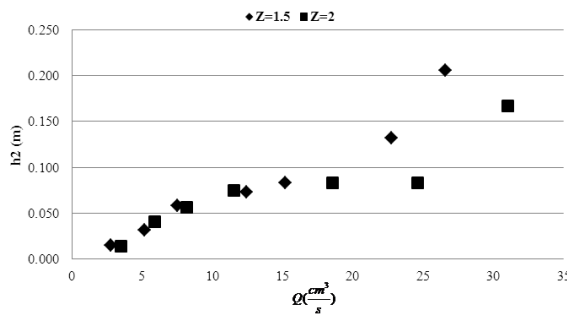
زمانی که کانال در حال تغذیه شدن است سطح نشت با h_1 و وقتی که کانال در حال نشت باشد، سطح نشت با h_2 نشان داده می شود (شکل ۶). با توجه به شکل ها مشاهده می



شکل ۱۱- تغییرات زاویه Ψ_1 در مقابل نسبت بدون بعد سطح ایستابی به سطح آب کانال

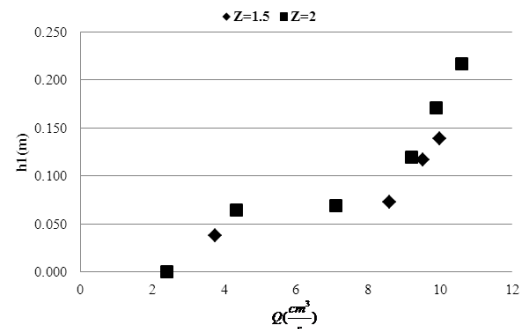
شکل ۱۲ تغییرات گرادیان خروجی از سطح نشت در مقابل نسبت بدون بعد سطح ایستابی به سطح آب کانال را

ثابت برای شیب کمتر طی می کند و در نتیجه به ازای سطح نشت ثابت، دبی بیشتری عبور می کند. این مسئله زمانی که کانال در حال تغذیه باشد (شکل ۱۳) کمتر مشهود است. اگرچه به ازای یک دبی نشت ثابت، با ملایمتر شدن شیب خاک، سطح نشت افزایش پیدا می کند؛ (شکل ۱۳) اما بررسی اطلاعات جدول ۲ بیان می کند که با ملایمتر شدن شیب خاک، پایداری ذرات در برابر گسیختگی افزایش یافته است. این امر در نتیجه ی کاهش زاویه قرارگیری ذرات خاک نسبت به شیب تندتر و کاهش گرادیان خروجی در محل پنجه خاکریز رخ می دهد.

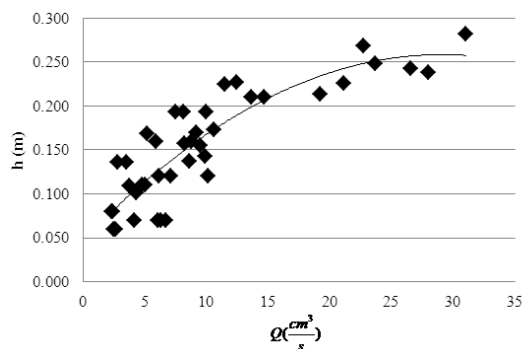


شکل ۱۴- تغییرات دبی به ازای سطح نشت برای حالتی که کانال در حال نشت است

شود که با افزایش سطح نشت، دبی زیاد می شود. در فاصله h1 بین مقادیر ۰/۰۶۵ و ۰/۰۷۵ متر در شکل ۱۳ و در فاصله h2 بین مقادیر ۰/۰۷۵ و ۰/۰۸۵ متر در شکل ۱۴ مشاهده می گردد که به ازای سطح نشت تقریباً ثابت، دبی افزایش می یابد. دلیل این امر افزایش گرادیان خروجی به جای افزایش سطح نشت می باشد. بررسی زوایای خروجی خط فریاتیک نیز موید این مسئله است. در شکل ۱۴ مشاهده می شود در مقادیر پایین سطح نشت مقادیر دبی برای هر دو شیب به هم نزدیک است ولی با افزایش سطح نشت اختلاف آنها بیشتر می شود. دلیل افزایش سطح نشت در واقع افزایش اختلاف تراز آب در کانال و سطح ایستابی است. چون شیب های بدنه اختلاف دارند، آب فاصله طولی کمتری را در یک اختلاف تراز



شکل ۱۳- تغییرات دبی به ازای سطح نشت برای حالتی که کانال در حال تغذیه است



شکل ۱۵- تغییرات دبی در مقابل مقادیر h

شکل های ۱۶ و ۱۷ مقدار τu را در پیژومترهای نزدیک سطح خاک (شکل ۳) به ترتیب برای $z=2$ و $z=1/5$ نشان می دهد. پارامتر τu نسبت بین فشار پیژومتریک و تنش موثر را بیان می نماید که با افزایش این نسبت پایداری شیب کاهش می

شکل ۱۵ تغییرات دبی را در مقابل مقادیر h که معرف فاصله قائم بین سطح آب بالادست و نقطه نشت است، نشان می دهد (شکل ۶). همانطور که مشاهده می شود با افزایش h در ابتدا دبی افزایش می یابد ولی در ادامه به یک مقدار ثابت میل می کند و با ثابت بودن تقریبی h دبی بیشتر می شود. در محدوده ابتدایی نمودار سطح نشت وجود ندارد و یا به دلیل اختلاف تراز کم، مقدار آن ناچیز است، لذا با افزایش اختلاف تراز، h زیاد می شود و در نتیجه آن دبی نیز زیاد می شود. در محدوده انتهایی نمودار، سطح نشت دارای مقدار قابل توجهی است که با افزایش اختلاف تراز دبی زیاد می شود، ولی چون سطح نشت نیز زیاد می گردد مقدار نهایی h تقریباً ثابت می ماند.

- شبیه سازی عددی با دقت قابل قبول انجام گرفت و نتایج آزمایشگاهی شامل فشار، دبی جریان و خط فریاتیکی شبیه سازی شدند. متوسط خطای شبیه سازی فشار و دبی به ترتیب ۲٪ و ۵/۷٪ می باشد.

- با بررسی پارامتر بی بعد $(u-u^*)^2/u$ در پیژومترها این نتیجه حاصل شد که با افزایش اختلاف تراز دوطرف مدل و افزایش انرژی، رفتار خاک از حالت خطی به غیرخطی تغییر می کند.

- با کاهش شیب دیواره کانال، پایداری ذرات خاک افزایش می یابد ولی سطح نشست (سطح اشباع شده خاک) بالای شیب نیز افزایش می یابد که این مسئله عدم پایداری خاک را به دنبال دارد.

- گرادیان خروجی با کاهش شیب دیواره کانال با شتاب کمتری افزایش می یابد و این مسئله خود عامل مهمی در افزایش پایداری می باشد.

- با افزایش ضخامت لایه سیال بالای نقطه نشست (h) مقدار نشست تا حد خاصی افزوده می شود و پس از آن بدون کثرت ضخامت لایه دبی افزایش می یابد.

- با کاهش شیب دیواره کانال، پارامتر τ_u افزایش می یابد که این مسئله نیز عاملی برای تخریب و گسیخته شدن شیب می باشد.

- در شیب های دیواره کمتر نیز مانند شیب های تندتر گسیختگی اتفاق می افتد و تفاوت، در تراز سطح ایستابی در زمان گسیختگی و شدت آن است. این دو پارامتر در هر دو شیب تفاوت چندانی ندارند.

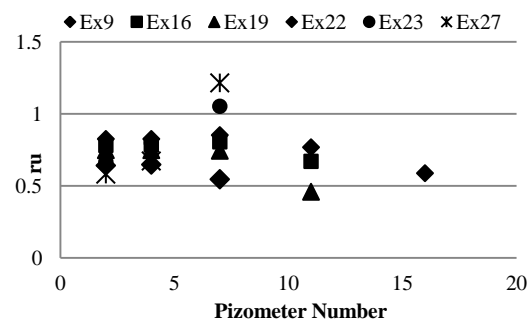
- در کل عواملی مانند افزایش شیب دیواره، فشار پیژومتریک، سطح نشست و گرادیان خروجی عوامل گسیختگی با وجود سطح ایستابی می باشند.

- بهترین روش برای کنترل گسیختگی با وجود سطح ایستابی، کنترل فشار پیژومتریک و کاهش سطح نشست است و کاهش شیب بدنه تاثیر چندانی بر این مسئله ندارد.

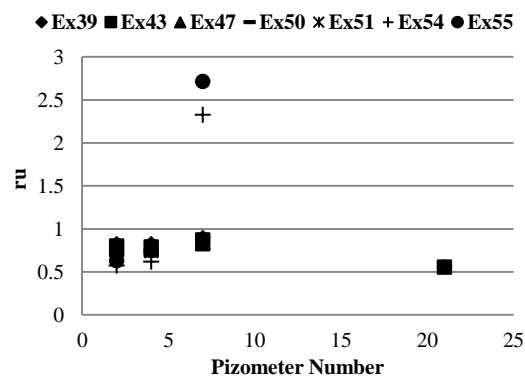
تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری های ارزشمند مسئول و کارشناس آزمایشگاه مکانیک خاک گروه مهندسی خاک و پی دانشگاه تبریز، آقای دکتر حاج علی لو و خانم مهندس فتحی، صمیمانه تشکر و قدردانی می شود.

یابد و احتمال گسیختگی آن زیاد می شود. با توجه به این نمودارها مشاهده می شود که مقدار τ_u در کل در شیب کمتر بیشتر از شیب بیشتر می باشد. دلیل آن کاهش ضخامت خاک روی پیژومتر و کاهش تنش موثر است. همچنین مشاهده می شود پیژومتر ۷ برای هردو شیب بحرانی ترین حالت را بدر ایجاد گسیختگی دارد. در کل می توان نتیجه گرفت که با کاهش شیب می توان پایداری ذرات خاک را بیشتر کرد ولی این امر باعث افزایش ناگهانی پارامتر τ_u خواهد شد.



شکل ۱۶- تغییرات پارامتر τ_u در پیژومترهای نزدیک سطح خاک برای $z=1/5$



شکل ۱۷- تغییرات پارامتر τ_u در پیژومترهای نزدیک سطح خاک برای $z=2$

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر پایداری دیواره های شیب دار کانال با وجود سطح ایستابی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج زیر از آن به دست می آید:

منابع

- [7] Li, Y., Wang, C., Yang, L.Z., and Li, Y.P. 2007. Influence of seepage face obliquity on discharge of groundwater and its pollutant into lake from a typical unconfined aquifer. *J Hydrodynamics Ser B*, 19(6): 756-761.
- [8] Mizumura, K., and Kaneda, T. 2010. Boundary condition of groundwater flow through sloping seepage face. *J Hydrol Eng*, 15(9): 718-724 .
- [9] Schnellmann, R.M., Busslinger, H.R., Schneider, and Rahardjo, H. 2010. Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Engineering Geology*, 114: 71-83
- [10] Simpson, M.J., Clement, T.P., and Gallop, T.A., 2003. Laboratory and numerical investigation of flow and transport near a seepage- face boundary. *J Ground Water*, 41(5): 690 -700.
- [11] Toufigh, M.M., Bagheripour, M.H., and Bazrafshan A. 2007. Analysis of seepage with nonlinear permeability using least square finite element and finite difference methods. *International Journal of Mechanics*, 4(1): 92-100.
- [1] Anonymous. 2004. User's Guide for Seep/W, Version 6.0. Geo-Slope International Ltd, Calgary, Alta.
- [2] Ataie-Ashtiani, B., Volker, R.E., and Lockington, D.A. 1999. Numerical and experimental study of seepage in unconfined aquifers with a periodic boundary condition. *J Hydrol*, 222: 165-184.
- [3] Chahar, B.R. 2001. Extension of Vederikov's graph for seepage from canals. *Ground Water*, 39(2): 272-275.
- [4] Chahar, B.R. 2007. Analysis of Seepage from Polygon Channels. *J Hyd Eng*, 133(4):451-460.
- [5] Chu-Agor, M., Fox, G.A., Cancienne, R.M., and Wilson, G.V. 2008. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes. *J Hydrol*, 359: 247-259.
- [6] Knight, J.H. 2005. Improving the Dupuit-Forchheimer groundwater free surface approximation. *Adv Water Resour*, 28:1048-1056.

