

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تابع هدایت هیدرولیکی بر مدل سازی نشت از بدنه سدهای خاکی

حجت احمدی^{۱*}، حسین رضایی^۲، کامران زینالزاده^۳

۱. استادیار گروه آب دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار گروه آب دانشگاه ارومیه

۳. استادیار گروه آب دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۴/۷)

چکیده

آنالیز نشت از بدنه سدهای خاکی، علاوه بر محاسبه میزان تلفات آب، در محاسبه مقدار فشار آب منفذی و به تبع آن در آنالیز پایداری بدنه نقش اساسی دارد. همچنین هر گونه آنالیز نشت وابسته به خصوصیات هیدرولیکی مصالح تشکیل دهنده سد است. برای بررسی تأثیر پارامتر هدایت هیدرولیکی بر پدیده نشت، مدل آزمایشگاهی یک سد خاکی ساخته شد و با اندازه گیری دقیق پارامترهای هیدرولیکی مصالح در حالت اشباع و غیر اشباع، با استفاده از دستگاه نفوذسنج دیسک، جریان آب در داخل مدل آزمایشگاهی با نرم افزار Seep/w مدل شد و نتایج آن با داده های مشاهده شده مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد با به کارگیری تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع در مقایسه با حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی اشباع نتایج مدل با داده های مشاهداتی تطابق بهتری دارد. مقایسه نتایج مدل ریاضی و داده های اندازه گیری شده نشان داد اختلاف بین نتایج مدل و داده های واقعی با نزدیک شدن به محدوده خط فریاتیک بیشتر می شود. همچنین مقایسه نتایج تحلیل ها نشان می دهد در حالت نشت غیر ماندگار به صورت پایین افتادگی سطح آب، تحلیل عددی با فرض هدایت هیدرولیکی ثابت، سرعت پایین افتادن سطح آب در بدنه و زهکشی آن را نسبت به حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی غیر اشباع کندتر پیش بینی می کند.

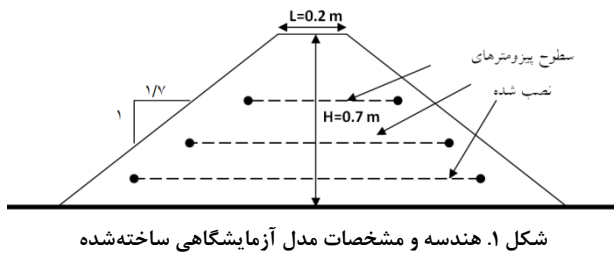
کلیدواژگان: سد خاکی، فشار آب منفذی، نشت، نفوذسنج دیسک، هدایت هیدرولیکی

مقدمه

توزیع رطوبت در محیط های متخلخل در شرایط وجود جریان های نشت ماندگار و غیر ماندگار در بسیاری از مسائل، نظیر نشت از پی و بدنه سد خاکی، اندرکنش آب های سطحی با آب های زیرزمینی، نشت و هدررفت آب از کانال های انتقال آب، مسائل مختلف زیست محیطی و مطالعات پخش و گسترش آلودگی مورد توجه است (Feng and Sheng 2009). بسیاری از محققان به جریان نشت در محیط های غیر محصور با سطح آزاد توجه کرده اند و اخیراً روش های جدیدی برای تحلیل چنین مسائلی ارائه شده است. مثلاً جریان نشت غیر ماندگار متأثر از بارندگی و نوسانات سطح آب با استفاده از مدل نشت اشباع- نیمه اشباع بر اساس تئوری جریان دو فازی آب و هوا در محیط متخلخل بررسی شده است (Sun et al, 2007). مدل SUTRA (مدل اجزای محدود جریان اشباع- غیر اشباع وابسته به چگالی سیال) برای جریان آب های زیرزمینی متأثر از نوسانات دوره ای

شرایط مرزی نظیر دوره های ترسالی و خشک سالی اصلاح شد (Bardet and Tubita 2002). (Ataei-Ashtiani et al, 1999) با ارائه روش حل موسوم به فشار مبسوط^۱ مسئله نشت با سطح جریان آزاد را با به کارگیری تابع پله ای واحد (هویساید) ۰ و ۱ حل کردند. طی سال های اخیر، با اصلاحاتی بر شرط تابع هویساید، روش فشار مبسوط به صورتی کارآمدتر اصلاح شد؛ طوری که هم گرایی حل رابطه نشت در شرایط غیر محصور به مقدار قابل توجهی بهبود پیدا کرد (Ji et al, 2007).

بسیاری از مدل های ارائه شده به فشار آب یا بار هیدرولیکی وابسته است. در نتیجه در این مدل ها و روش های عددی، به دلیل وجود پدیده مویبندی، به طور دقیق نمی توان سطح تماس آب و هوا را مشخص کرد. همچنین، به دلیل تغییرات شدید درجه اشباع خاک در نزدیکی این سطح، تعیین موقعیت دقیق سطح فریاتیک مشکل است (Feng and Sheng, 2009). بنابراین برای تعیین دقیق موقعیت سطح نشت و خط



شکل ۲. تصویر مدل آزمایشگاهی سد خاکی ساخته شده و پیزومترهای نصب شده در بدنه مدل (عکس از پایین دست سد)

در بخش کف مدل به منظور کاهش جریان نشت در محل تماس خاک با بدنه مدل از یک صفحه با سطح زیر استفاده شد. همچنین جهت کاهش نشت در محل تماس دیوارهای جانبی مدل و خاک یک لایه ماسه ریز با چسب به سطح دیواره‌های جانبی چسبانده شد. این کار علاوه بر کاهش جریان نشت در این سطح باعث افزایش اصطکاک بین خاک و سطح دیوار مدل می‌شود و از پدیده جداشدگی خاک و صفحات جانبی مدل جلوگیری می‌کند (Sedghi-Asl et al, 2010). صفحات جانبی مدل از جنس پلاکسی گلاس و سایر قسمت‌ها از فولاد ساخته شد. در دو سمت بالادست و پایین دست سد، مخازن آب با قابلیت کنترل سطح آب در نظر گرفته شد تا شرایط نشت غیر دائمی در مدل بررسی شود.

مشخصات بدنه مدل فیزیکی و روند آزمایش‌ها

در هر پدیده نشت، علاوه بر هندسه و شرایط مرزی حاکم، مشخصات مصالح نقشی عمده در فرم و الگوی جریان دارند. برای مدل فیزیکی سد خاکی از خاک ماسه‌ای ریز حاوی درصد کمی سیلت استفاده شد. شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مصالح بدنه سد را نشان می‌دهد. علت به کارگیری چنین مصالحی پاسخ‌دهی سریع این مصالح در برابر تغییرات شرایط مرزی و به تبع آن صرفه‌جویی در زمان است. برای ساخت بدنه سد، لایه‌های خاک

فریاتیکی لازم است تغییرات هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل در حالت غیر اشباع مشخص باشد. در واقع محدودیت به کارگیری مدل‌های تحلیل نشت مربوط به تعیین خصوصیات هیدرولیکی محیط و به‌ویژه تغییرات رطوبت و به تبع آن تغییرات نفوذپذیری محیط در شرایط غیر اشباع است (Ghanbarian-Alavije et al, 2010). خصوصیات هیدرولیکی مصالح خاکی از طریق روش‌های مستقیم آزمایشگاهی و همچنین روش‌های غیر مستقیم شامل روش‌های رگرسیونی یا مدل‌های تجربی بر اساس برخی مشخصات خاک قابل استخراج است (Zhang et al, 2011).

نفوذسنج مکشی دیسک روشی دقیق برای ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی خاک در محل است. مزیت عمده این نفوذسنج حداقل به هم خوردگی سطح خاک هنگام اندازه‌گیری است. با استفاده از نفوذسنج مکشی دیسک می‌توان خصوصیات مختلف پارامترهای هیدرولیکی ساختمان خاک را اندازه‌گیری کرد (Reynolds et al, 1995; White et al, 1993).

در این تحقیق تأثیر به کارگیری خصوصیات هیدرولیکی غیر اشباع مصالح خاک بر پدیده نشت غیر محصور از بدنه سدهای خاکی بررسی شد. بر این اساس موقعیت خط نشت، توزیع فشار آب، و مقدار جریان عبوری از بدنه سد خاکی همگن مطالعه شد.

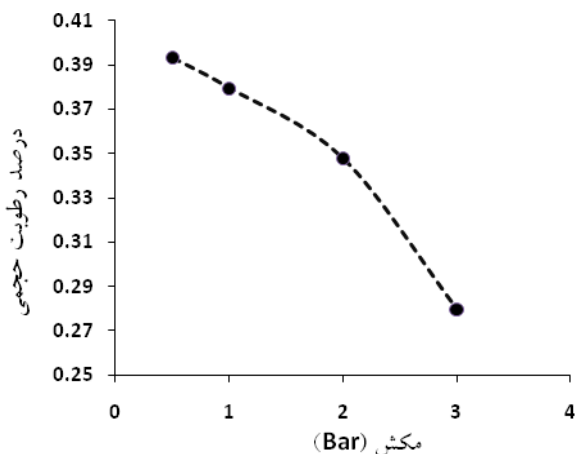
مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

به منظور بررسی پدیده نشت در بدنه سدهای خاکی، مدل آزمایشگاهی یک سد خاکی همگن به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر به شکل متقارن نسبت به محور سد ساخته شد (شکل ۱). جهت بررسی خط نشت و فشار آب منفذی در بدنه سد، از ۸۰ عدد پیزومتر در سه ردیف با شماره‌گذاری از پایین به بالا در ترازهای ۵ و ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر از کف پی نفوذناپذیر و در فواصل افقی مختلف ۵ و ۱۰ سانتی‌متری از هم استفاده شد. تراکم پیزومترها در قسمت بدنه پایین دست بیشتر از بخش بالادست بود. علت این انتخاب تغییرات شدیدتر شیب سطح نشت در نیمه پایین دست از بدنه سد است. شکل ۲ تصویری از مدل ساخته شده را همراه موقعیت پیزومترهای نصب شده بر بدنه مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است پیزومترهای ردیف دوم (پیزومترهای میانی) در قسمت بدنه پایین دست قرار گرفته‌اند و فقط دو پیزومتر از این ردیف در بدنه بالادست نصب شده است.

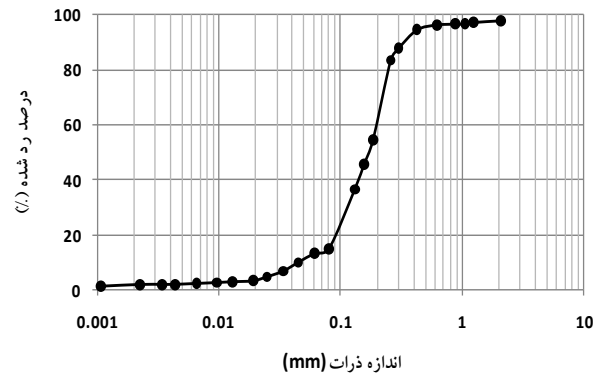
صفحات فشاری تا حداکثر مکش ۳ اتمسفر استفاده شد. منحنی مشخصه حاصل سه تکرار این آزمایش روی مصالح بدنه مدل در شکل ۴ می‌آید. نفوذپذیری مصالح بدنه در جهت قائم با استفاده از دو روش بار ثابت برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و روش نفوذسنج مکشی برای هدایت هیدرولیکی غیر اشباع تعیین شد. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع حاصل سه تکرار آزمایش بار ثابت برابر $6/41$ سانتی‌متر در ثانیه شد. برای تعیین نفوذپذیری غیر اشباع در جهت قائم از دستگاه نفوذسنج مکشی دیسک با قطر دیسک ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری پس از اتمام آزمایش‌های نشت انجام یافت و آزمایش نفوذپذیری در عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر زیر تاج سد انجام شد. برای این منظور پس از برداشتن یک لایه ۲۰ سانتی‌متری از سطح سد و قبل از شروع اندازه‌گیری، سطح مورد آزمایش به دقت مسطح شد. سپس روی آن یک لایه نازک ماسه، به ضخامت ۲ میلی‌متر یا کمتر، با اندازه ذرات حدود ۱۰۰ میکرومتر، برای اطمینان از تماس مناسب هیدرولیکی بین دیسک نفوذسنج و سطح تماس خاک ریخته شد. شکل ۵ تصویری از دستگاه نفوذسنج استفاده‌شده را روی قسمت تاج سد نشان می‌دهد.

آزمایش‌های نفوذپذیری دیسک به ترتیب در پتانسیل‌های ماتریک ۲۰، ۱۷، ۱۰، ۳، و ۰ سانتی‌متر با شروع از کمترین فشار (۲۰- سانتی‌متر) اجرا شد. برای هر آزمایش، نفوذ تجمعی تا حصول شرایط پایدار در فواصل زمانی ۱ دقیقه ثبت شد. در کل، حالت نفوذ پایدار برای کمترین فشار (۲۰- سانتی‌متر) حدود ۵۰ دقیقه پس از شروع آزمایش حاصل شد و برای فشارهای بالاتر به سمت حالت اشباع (ارتفاع فشاری ۰ سانتی‌متر) زمان رسیدن به سرعت نفوذ ثابت کاهش یافت.



شکل ۴. منحنی مشخصه رطوبتی مصالح بدنه مدل آزمایشگاهی سد همگن

به ضخامت ۵ سانتی‌متر ریخته و به کمک غلطک دستی متراکم شد.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی مصالح بدنه سد

آزمایش‌های نشت تحت بارهای مختلف آبی در بالادست از ۱۰ تا ۶۰ سانتی‌متر به صورت پایدار و ناپایدار به شکل کاهش سطح آب مخزن با گام‌های ۱۰ سانتی‌متری تراز آب انجام شد. فاصله زمانی کاهش سطح آب به تراز مورد نظر در مدت حدود ۱۰ دقیقه انجام گرفت و زمان برقراری تعادل و شروع جریان پایدار بر اساس تغییرات سطح آب پیژومترها کنترل شد. پس از برقراری شرایط ماندگار سطح تراز آب در پیژومترها ثابت شد. به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی بر آنالیز نشت غیر ماندگار یا انتقالی آزمایش‌های نشت با شرایط مرزی متغیر بررسی شد. از آنجا که در تحلیل پایداری و طراحی سدهای خاکی عموماً آنالیز غیر ماندگار برای حالت پایین‌افتادگی ناگهانی سطح آب انجام می‌شود، آزمایش‌های نشت غیر ماندگار نیز برای این حالت انجام شد. تغییر تراز آب مخزن در آنالیزهای نشت غیر ماندگار در مدت زمان حدود ۱۰ دقیقه به اندازه ۱۰ سانتی‌متر کاهش داده شد و در کل ۴ گام مختلف آنالیز نشت غیر ماندگار انجام شد. شروع هر گام آزمایش غیر دائم پس از به تعادل رسیدن گام قبلی بود. همچنین مقدار نشت عبوری از بدنه سد در قسمت خروجی مدل آزمایشگاهی به صورت وزنی اندازه‌گیری شد.

با توجه به اینکه هدف اساسی این تحقیق مطالعه تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مصالح بدنه در تحلیل نشت از بدنه سدهای خاکی است، پس از تهیه نمونه دست‌نخورده مشخصات هیدرولیکی مصالح، شامل منحنی مشخصه رطوبتی و تابع هدایت هیدرولیکی، به روش آزمایشگاهی تعیین شد. بدین منظور جهت تعیین منحنی مشخصه رطوبتی از آزمایش

K هدایت هیدرولیکی بر حسب سانتی متر بر ساعت و h بر حسب سانتی متر است.

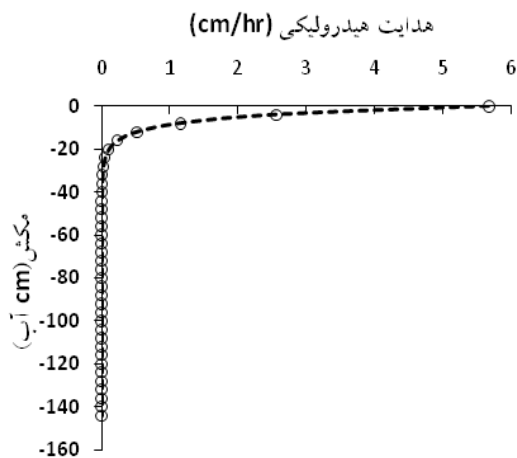
هرچند حداکثر مکش قابل اعمال با این دستگاه کمتر از ۱ اتمسفر است، با توجه به نوع مصالح، محدوده مکش اعمال شده کافی است و روند تغییرات منحنی حاصله این موضوع را تأیید می کند. شکل ۶ منحنی تابع هیدرولیکی مصالح بدنه مدل فیزیکی را نشان می دهد.

معادلات حاکم

رابطه حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل و نشست در حالت دوبعدی به صورت رابطه ۴ است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (\text{رابطه ۴})$$

H انرژی کل، k_x نفوذپذیری در جهت x ، k_y نفوذپذیری در جهت y ، Q شار واردشده از مرزهای محیط، θ رطوبت حجمی، و t زمان است.



شکل ۶. تغییرات نفوذپذیری مصالح در مکش های مختلف

مقدار رطوبت حجمی به تغییرات حالت تنش و خصوصیات فیزیکی خاک وابسته است. متغیرهای حالت تنش به صورت دو ترم $(\sigma - u_w)$ و $(u_a - u_w)$ بیان می شود که σ تنش کل و u_a و u_w به ترتیب فشار هوا و آب منفذی است. از آنجا که در بخش اشباع یا غیر اشباع از بدنه یک سد خاکی مقدار تنش کل و فشار هوای منفذی ثابت است، تغییرات رطوبت حجمی متناسب با تغییرات فشار آب منفذی یا مکش خواهد بود که این فشار خود بخشی از مقدار انرژی کل (H) در رابطه ۴ است. این معادله معمولاً به یکی از روش های عددی اجزای محدود یا اختلاف محدود حل می شود.



شکل ۵. دستگاه نفوذسنج مکشی دیسک قرارگرفته روی بدنه سد جهت اندازه گیری هدایت هیدرولیکی غیر اشباع

با استفاده از روش Logsdon and Jaynes (1993) مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بدنه مدل فیزیکی از مقادیر سرعت های نفوذپذیری پایدار سه بعدی در پتانسیل های ماتریک مختلف محاسبه شد. این روش بر اساس حل تقریبی معادله Wooding (1968) برای سرعت نفوذپذیری پایدار نامحدود $Q(h)$ از یک منبع آب مدور کم عمق و تابع نمایی هدایت هیدرولیکی Gardner (1958) به صورت رابطه ۱ است.

(رابطه ۱)

$$\frac{Q(h)}{\pi R^2} = Ks \exp(\alpha h) + \frac{[4Ks \exp(\alpha h)]}{\pi R \alpha}$$

$Q(h)$ سرعت نفوذپذیری پایدار (L^3T^{-1}) تحت پتانسیل

ماتریک h شعاع نفوذسنج دیسک (L)، α شاخص توزیع اندازه خلل خاک Gardner (L^{-1})، و Ks هدایت هیدرولیکی اشباع (LT^{-1}) است.

طبق روش Logsdon and Jaynes (1993) با رگرسیون

غیر خطی از سرعت های نفوذپذیری در مقابل پتانسیل های ماتریک، پارامترهای برازش α و Ks به دست آمدند. سپس، مقادیر K برای سایر پتانسیل های ماتریک با استفاده از تابع نمایی تعیین گردیدند (Gardner, 1958). این تابع را می توان به صورت رابطه ۲ نشان داد.

$$K = K_s \exp(\alpha h) \quad (\text{رابطه ۲})$$

K_s هدایت هیدرولیکی اشباع و K هدایت هیدرولیکی در

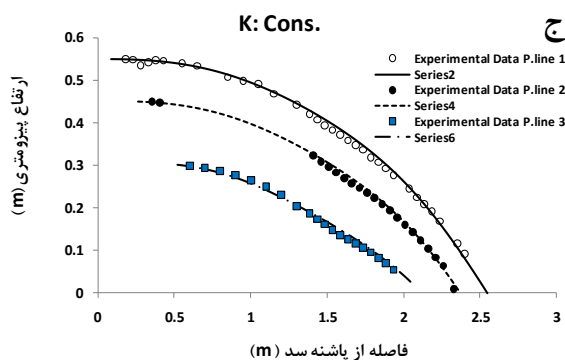
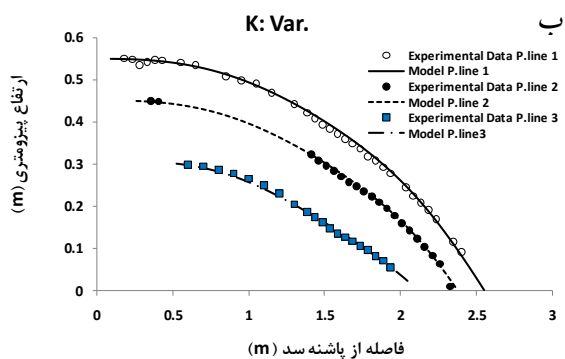
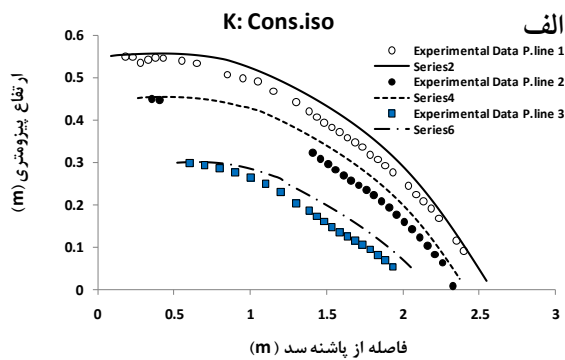
پتانسیل ماتریک h است.

تابع هدایت هیدرولیکی برآوردشده در این تحقیق در

رابطه ۳ دیده می شود.

$$K = 5.676 \exp(0.199h) \quad (\text{رابطه ۳})$$

می‌شود که مقدار هدایت هیدرولیکی افقی برابر ۵٫۷ سانتی‌متر در ساعت و نسبت هدایت هیدرولیکی قائم به افقی بدنه سد برابر ۰٫۷ باشد. شکل ۸ مقایسه فشار پیژومتریک حاصل از آنالیز مدل با داده‌های مشاهده‌ای ثبت‌شده را در سه تراز مختلف برای حالت حداکثر تراز آب مخزن نشان می‌دهد.

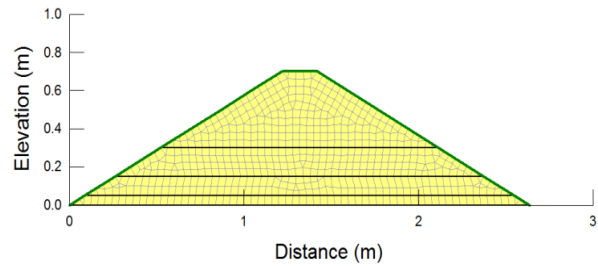


شکل ۸. مقایسه داده‌های پیژومتری اندازه‌گیری‌شده و نتایج مدل Seepw قبل از واسنجی با به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی اشباع حاصل از آزمایش‌های نفوذ روی نمونه خاک همروند (الف) و پس از واسنجی بر اساس سه ردیف پیژومتر نصب‌شده در مدل آزمایشگاهی و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (ب) و اشباع (ج) در حالت غیر همروند

نشت ماندگار

برای بررسی تأثیر تابع هدایت هیدرولیکی بر منحنی نشت از بدنه سد خاکی همگن ساخته‌شده، تغییرات بار فشاری در سه

در این تحقیق برای حل رابطه ۴ در هندسه مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده از نرم‌افزار Seep/W-2007 استفاده شد. پایه عددی این نرم‌افزار روش اجزای محدود است که در این تحقیق از المان‌های سه گوش و چهار گوش به ترتیب با ۳ و ۴ نقطه انتگرال‌گیری گوس و به صورت غیرسازمان‌یافته استفاده شد. شکل ۷ مشبندی استفاده‌شده بر اساس المان‌های سه و چهار گوش را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مشبندی اجزای محدود استفاده‌شده در تحلیل نشت از بدنه سد خاکی مطالعه‌شده

یافته‌ها و بحث

از آنجا که هدف این تحقیق بررسی تأثیر توابع انتقالی شامل هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبتی در مدل‌سازی عددی مسئله نشت در سدهای خاکی بود و با توجه به انواع مختلف جریان در حالات ماندگار و غیر ماندگار، نتایج با توجه به حالات مختلف بررسی و بر اساس ترکیب شرایط و توابع مختلف ارائه شد.

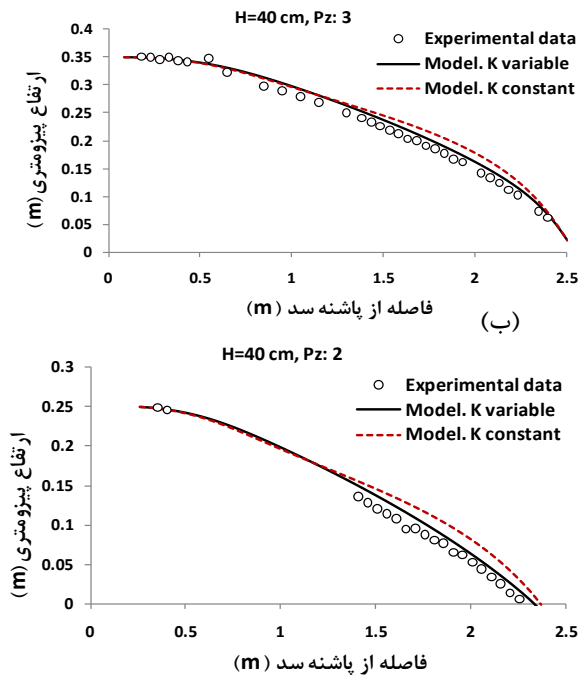
واسنجی مدل

با توجه به اینکه بدنه سد خاکی به صورت لایه‌های ۵ سانتی‌متری ساخته شده بود، ناهمسانی در پارامتر هدایت هیدرولیکی بدنه امری بدیهی بود. جهت تعیین نسبت هدایت هیدرولیکی افقی به قائم، با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش نشت از بدنه سد در حالت حداکثر تراز سطح آب در بالادست (۶۰ سانتی‌متر) و در شرایط ماندگار و غیر ماندگار، مدل بر اساس ناهمسانی هدایت هیدرولیکی بدنه واسنجی شد. علت انتخاب این تراز سهم حداکثری مصالح بدنه سد در عبور جریان از آن بود. از آنجا که در شرایط جریان پایدار سمت راست رابطه ۴ برابر ۰ است، منحنی مشخصه رطوبتی بر نتایج تأثیری ندارد و فقط مقدار هدایت هیدرولیکی پارامتر مؤثر است. واسنجی مدل با مقایسه مقادیر مختلف فشار پیژومتریک ثبت‌شده در مدل آزمایشگاهی و کامپیوتری همراه مقدار نشت عبوری از بدنه سد انجام یافت. نتیجه نهایی این بررسی نشان داد بهترین انطباق نتایج مدل کامپیوتری و داده‌های مشاهده‌ای زمانی حاصل

داده‌های آزمایشگاهی نسبت به تراز سطح آب مخزن و همچنین فاصله سطح فریاتیکی با موقعیت پیزومترها رابطه مستقیم وجود دارد؛ طوری که هر چه تراز سطح آب در مخزن کاهش می‌یابد میزان اختلاف بین نتایج تحلیل عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده نیز بیشتر می‌شود. همچنین با کاهش فاصله بین سطح فریاتیکی و سطح تراز پیزومترها این اختلاف شدیدتر می‌شود.

بررسی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ به‌وضوح این نتیجه را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه دیگری که از این تحقیق حاصل شد این است که نتایج تحلیل‌های عددی مبتنی بر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع منطقی‌تر است. همچنین اختلاف نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی با نزدیک شدن به سطح نشت و پایین دست بدنه بیشتر می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در حالت هدایت هیدرولیکی ثابت (اشباع) تغییرات فشار پیزومتریک بعد از عبور از یک نقطه عطف اختلاف معنادار نسبت به داده‌های واقعی پیدا می‌کند.

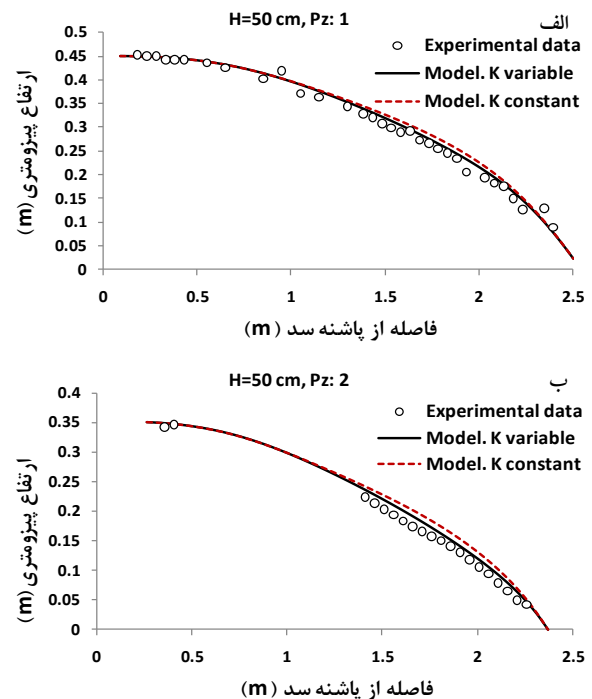
(الف)



شکل ۱۰. مقایسه بار فشاری در پیزومترهای ردیف اول (الف) و دوم (ب) با داده‌های آزمایشگاهی با هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع در حالت تراز آب مخزن برابر ۴۰ سانتی‌متر

هرچند در بخش‌های بالادست نزدیک به مخزن به دلیل نزدیکی با شرایط مرزی معلوم (مرز دریکله) انطباق نتایج مدل با مشاهدات خوب و مناسب است، در هر دو حالت اعمال هدایت هیدرولیکی غیر اشباع متغیر و اشباع ثابت مدل برآورد بیشتری

تراز مختلف با توجه به موقعیت سه ردیف پیزومتر تعبیه شده بر مدل به منزله شاخص مطالعه انتخاب شد. در آزمایش‌هایی که سطح فریاتیکی بالاتر از موقعیت پیزومترهای ردیف دوم یا سوم بود (مقدار بار فشاری مثبت) از اطلاعات و داده‌های هر ردیف به شکل مجزا استفاده شد. شکل ۹ نتایج مقایسه سطح فریاتیکی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در دو حالت مختلف به‌کارگیری مقدار هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر را در تراز ۵۰ سانتی‌متری آب مخزن نشان می‌دهد. شکل ۹ الف مربوط به پیزومترهای ردیف اول واقع در تراز ۵ سانتی‌متری از کف غیر قابل نفوذ مدل است. مقایسه نتایج شکل ۹ الف نشان می‌دهد در بخش‌های پایین دست و به سمت سطح نشت بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی اختلاف وجود دارد. این اختلاف برای حالات هدایت هیدرولیکی اشباع بیشتر است. برای همین حالت از آنالیز (تراز مخزن ۵۰ سانتی‌متر) مقایسه داده‌های پیزومترهای ردیف دوم (تراز ۱۵ سانتی‌متری از کف) در شکل ۹ ب نشان می‌دهد اختلاف نتایج مدل در هر دو حالت هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع متغیر به سمت پایین دست بیشتر شده است.

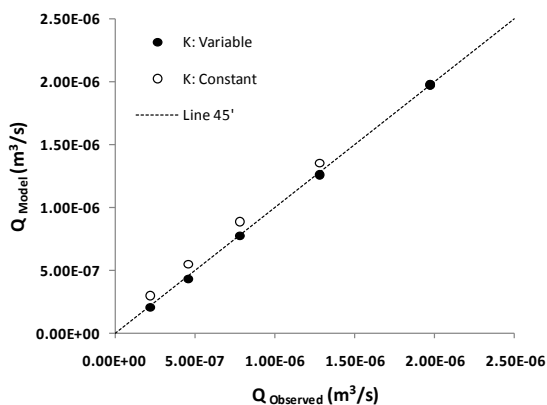


شکل ۹. مقایسه بار فشاری در پیزومترهای ردیف اول و دوم با داده‌های آزمایشگاهی با هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع در حالت تراز آب مخزن برابر ۵۰ سانتی‌متر

بررسی آزمایش‌های صورت‌گرفته در ترازهای پایین‌تر سطح مخزن نشان داد بین دقت نتایج حاصل از تحلیل عددی و

نتایج مدل بیشتر است و این به عوامل مختلف، نظیر شیب جریان در نزدیکی سطح فریایک، مربوط است. در هر حال، مقایسه نتایج حاصله این نکته را تأیید می‌کند که هدایت هیدرولیکی غیر اشباع نتایج دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر نسبت به اعمال هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه می‌کند.

به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع در تحلیل عددی نشت از بدنه سدهای خاکی، مقایسه‌ای بین مقادیر نشت حاصل از تحلیل‌های عددی هر یک از حالات بررسی شده با داده‌های مشاهده‌ای انجام شد. شکل ۱۳ نتایج این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی غیر اشباع انطباق خوبی بین داده‌های مشاهده‌ای و نتایج مدل حاصل می‌شود. در حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع نتایج مدل مقادیر بزرگ‌تری را نسبت به واقعیت ارائه کرده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، داده‌های مربوط به هدایت ۶۰ سانتی‌متر مربوط به دو حالت مختلف هدایت هیدرولیکی بر هم منطبق است که این نقطه واسنجی مدل است.



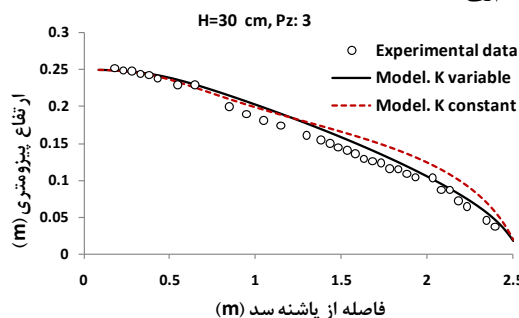
شکل ۱۳. مقایسه مقادیر نشت حاصل از آنالیز عددی در دو حالت مختلف به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی اشباع ثابت و هدایت هیدرولیکی متغیر با مقادیر نشت مشاهده‌شده

نشت غیر ماندگار

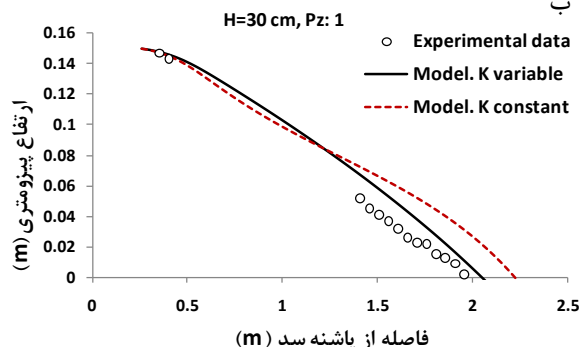
نتایج تحلیل‌های عددی نشت غیر ماندگار در حالت پایین‌افتادگی سطح آب مخزن از تراز ۶۰ به ۱۵ سانتی‌متری نشان داد سرعت زهکشی بدنه با اعمال هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع متفاوت است. بررسی‌ها نشان داد در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی غیر اشباع سرعت زهکشی بیشتر است و کاهش فشار آب منفذی در این حالت سریع‌تر اتفاق

از فشار آب منفذی دارد و این اختلاف به سمت پایین‌دست بیشتر می‌شود. این موضوع به دلیل نامشخص بودن هندسه مرزی در داخل و در پایین‌دست بدنه قبل از حل عددی است. دلیل دیگر آن نحوه واسنجی مدل مربوط است. زیرا واسنجی بر اساس حداکثر تراز سطح آب در مخزن صورت گرفته است و در نتیجه با کاهش سطح آب مخزن وضعیت از شرایط کالیبره‌شده منحرف می‌شود.

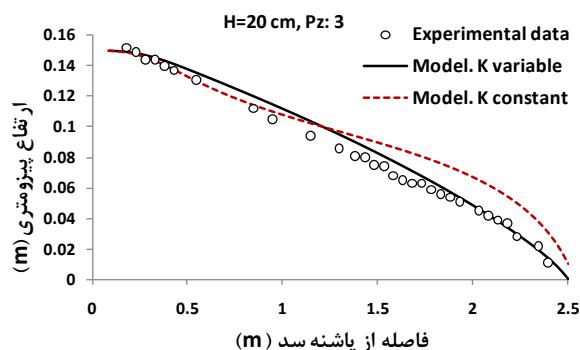
الف



ب

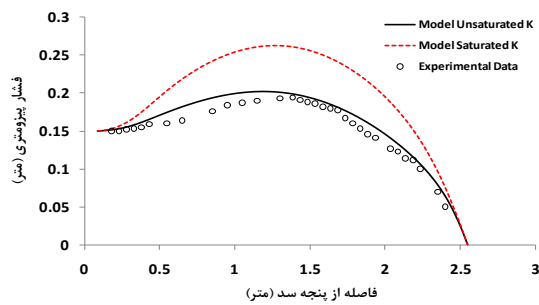


شکل ۱۱. مقایسه بار فشاری در پیزومترهای ردیف اول (الف) و دوم (ب) با داده‌های آزمایشگاهی با هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع در حالت تراز آب مخزن برابر ۳۰ سانتی‌متر



شکل ۱۲. مقایسه بار فشاری در پیزومترهای ردیف سوم با داده‌های آزمایشگاهی با هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع در حالت تراز آب مخزن برابر ۲۰ سانتی‌متر

نکته قابل تأمل این است که در نمودارهای واسنجی (شکل ۸) نیز اختلاف داده‌های پیزومترهای ردیف‌های بالایی با



شکل ۱۵. فشار پیزومتریک در تحلیل نشت غیر دائم ۳۰ دقیقه پس از پایین افتادن سطح آب مخزن از تراز ۶۰ به ۱۵ سانتی متر در پیزومترهای ردیف اول (پایین ترین ردیف)

نتیجه گیری

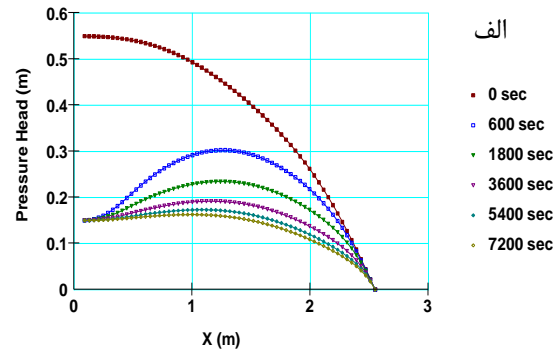
آزمایش‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته نشان داد به کارگیری خصوصیات هیدرولیکی غیر اشباع مصالح تشکیل دهنده بدنه سد خاکی در آنالیزهای نشت ضروری است؛ طوری که در صورت استفاده از مقداری ثابت برای هدایت هیدرولیکی مصالح نتایج آنالیز نشت دور از واقعیت خواهد بود.

در مدل سازی عددی صورت گرفته در این تحقیق بر اساس روش اجزای محدود با توجه به تعداد و نوع المان‌های انتخاب شده نتایج تحلیل عددی در هر دو حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از درجه اشباع تخمینی که از مقدار فشار آب منفذی در بدنه سد خاکی داشت بیشتر از واقعیت بود.

بررسی اختلاف داده‌های مدل و آزمایشگاهی نشان داد با نزدیک شدن به محدوده خط فریاتیکی مقدار اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی بیشتر می‌شود. همچنین با توجه به میزان شیب خط فریاتیکی اختلاف داده‌های عددی و مشاهده‌ای افزایش می‌یابد. این نکته هم در آنالیزهای نشت ماندگار و هم در آنالیزهای نشت غیر ماندگار مشاهده شد؛ طوری که در آنالیزهای نشت ماندگار به سمت پایین دست، که با افزایش شیب سطح آب فریاتیکی همراه است، حداکثر مقدار اختلاف حاصل شد. در حالت نشت غیر ماندگار و پایین افتادن سطح آب به دلیل وجود جریان نشت از داخل بدنه به سمت بالادست و پایین دست به طور هم‌زمان شیب خط فریاتیکی هم به سمت مخزن و به رویه پایین دست شکل گرفت و باعث شد اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل سازی شده در هر دو سمت به میزان قابل توجهی بیشتر از اختلافی باشد که در آنالیزهای نشت دائم مشاهده می‌شد.

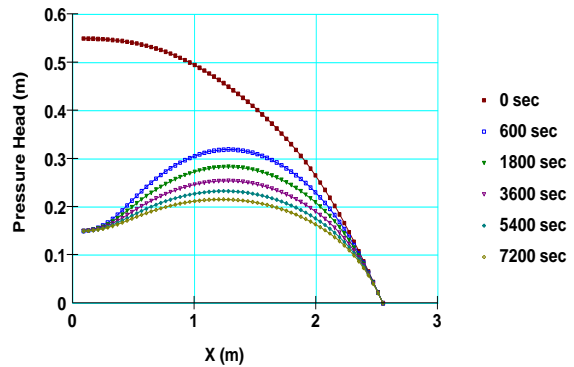
بررسی سرعت زهکشی بدنه سد در هنگام آنالیز نشت غیر دائم نشان داد سرعت پایین افتادن سطح آب در بدنه در حالت

می‌افتد. شکل ۱۴ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان‌های مساوی پس از افت سریع سطح آب مخزن زهکشی بدنه و پایین افتادن سطح فریاتیکی در حالت به کارگیری فشار آب منفذی سریع تر اتفاق می‌افتد.



الف

ب



شکل ۱۴. تغییرات فشار آب منفذی در داخل بدنه سد بر اساس هدایت هیدرولیکی اشباع ثابت (الف) و هدایت هیدرولیکی متغیر غیر اشباع (ب)

مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده پس از ۳۰ دقیقه از شروع پایین افتادن سطح آب در مخزن با آنچه در نشت دائم اتفاق افتاده بود نتایج مشابهی نشان می‌دهد. در این شرایط نیز نتایج عددی مبتنی بر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع دقیق تر است و با داده‌های اندازه‌گیری شده تطابق بهتری دارد. شکل ۱۵ تغییرات فشار پیزومتری را بر اساس پیزومترهای ردیف اول، که نسبت به پیزومترهای ردیف‌های بالاتر نتایج دقیق تری دارد، نشان می‌دهد. در این شرایط، حالت نشت غیر دائم اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل در بخش‌های پایین دست بدنه بیشتر است. با این حال به دلیل وجود شیب سطح فریاتیکی در بخش‌های بالادست و جریان معکوس رخ داده در اثر پایین افتادن سطح آب اختلاف داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل عددی برای بخش‌های بالادست نیز قابل ملاحظه شده است. با وجود این دقت نتایج تحلیل عددی بر مبنای هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بیشتر است.

بدنه را از آنالیزهای نشت دریافت می‌کند می‌تواند گامی در جهت افزایش ضریب اطمینان باشد. اما ممکن است ابعاد بدنه سد خاکی را افزایش دهد.

به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت بسیار کندتر از حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی غیر اشباع اتفاق می‌افتد. این موضوع در آنالیزهای پایداری که اطلاعات فشار آب منفذی در

REFERENCES

- 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. *Journal of Hydrology*, 222(1-4), 165-184.
- Bardet, J. P. and Tobita, T. (2002). A practical method for solving free surface seepage problems. *Journal of Computer and Geotechnics*. 29, 451-475.
- Feng, J. F. and Sheng, J. (2009). A study on unsteady seepage flow through dam. *Journal of Hydrodynamics*. 21 (4), 499-504.
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sciences*. 85, 228-232.
- Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G. H., and Van Genuchten, M. Th. (2010). Estimation of the van genuchten soil water retention properties from soil textural data. *Pedosphere*, 20 (4).
- Ji, C. N., Wang, Y. Z., and Shi, Y. (2007). Application of modified EP method in steady seepage analysis. *Journal of Computer and Geotechnics*. 32, 27-35.
- Logsdon, S. D. and Jaynes, D. B. (1993). Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*. 57, 1426-1431.
- Reynolds, W. D., Gregorich, E. G., and Curnoe, W. E. (1995). Characterisation of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. *Soil Tillage Research*, 33, 117-131.
- Sedghi-Asl, M. H., Rahimi, and Khaleghi, H., (2010). Experimental Analysis of Seepage Flow under Coastal Dikes. *Experimental Techniques*, 34(4), 49-54.
- SUN Dong-mei, ZHU Yue-ming, and Zhang Ming-jin (2007). Water-air two-phase flow model for numerical analysis of rainfall infiltration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 38(2), 150-156.
- White, I., Sully, M. J., and Perroux, K. M. (1993). Measurement of surface-soil hydraulic properties: disk permeameters, tension infiltrometers and other techniques. In: Topp, G.C., Reynolds, W.D., Green, R.E. (Eds.), *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice. Soil Science Society of America, Special Publication*, 30, 69-104.
- Wooding, R. A. (1968). Steady infiltration from a circular shallow circular pond. *Water Resources Research*. 4, 1259-1273.
- Zhang, Y. L., Chen, R., and Li, J. H. (2011). *Evaluation the accuracy of unsaturated hydraulic conductivity determined by instantaneous profile method*. Unsaturated Soils: Theory and Practice. Proceeding. Kasetsart University, Thailand.