

مدل‌سازی عددی بالازدگی پوشش بتنی کانال اصلی انتقال آب دشت تبریز

فریبا بهروز سرند^۱، مسعود حاجی‌علیلوی بناب^{۲*} و علی پاک^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

^۳ استاد گروه خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

پروژه‌های انتقال آب به دلیل ماهیت خطی آن‌ها، از ساختارهای زمین‌شناسی متنوعی عبور کرده و همواره در تماس با آب هستند به همین علت بستر این سازه‌ها در معرض تغییر شکل و جابجائی قرار دارند. یکی از انواع بسترهای مسأله‌دار، خاک‌های متورم شونده می‌باشند. این نوع از خاک‌ها در اثر تغییر شرایط رطوبتی، مستعد تغییر شکل زیادی بوده و بر سازه‌های سبک ساخته شده بر روی خود آسیب می‌رسانند. این آسیب‌دیدگی در کانال‌های دوزنقه‌ای به صورت بالازدگی و ترک‌هایی بر روی رویه بتنی مشاهده می‌شود که به تدریج کارایی کانال را مختل می‌نماید. در این مقاله به مدل‌سازی عددی پدیده تورم خاک‌های متورم شونده غیراشباع در اندرکنش با رویه بتنی کانال‌ها پرداخته شده است. برای مدل‌سازی از ابعاد کانال دشت تبریز استفاده شده و پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل‌ها بر اساس شرایط محلی و نتایج آزمایشات انتخاب شده‌اند. در عمل یک لایه فیلتر به عنوان راهکاری برای کاهش اثر تورم به کار گرفته شده که این مسأله به صورت عددی هم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل، محل تمرکز حداکثر میزان تغییر شکل‌ها، نیروها و به تبع آن محل ایجاد ترک‌ها را در رویه نشان می‌دهند. نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی و بررسی‌های آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج تحلیل‌های عددی انطباق قابل قبولی را به دست می‌دهند. اثر فیلتر در کاهش نیروی اندرکنشی بین لاینینگ و خاک متورم شونده به کمک مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که تعبیه یک لایه فیلتر در کاهش اثر تورم مؤثر است.

واژگان کلیدی: خاک‌های متورم شونده، رویه بتنی، کانال، فیلتر، مدل‌سازی عددی.

۱- مقدمه

انجام آزمایشات آزمایشگاهی به بررسی مشخصات بستر پرداخته و پی بردند که خاصیت واگرایی در نمونه‌های به دست آمده وجود دارد و این پدیده با نفوذ آب منجر به شسته شدن بستر و نهایتاً شکست رویه بتنی شده است راهکارهایی توسط این افراد برای مقابله با این مسأله پیشنهاد شده و نهایتاً کارایی این راهکارها با ابزاربندی کانال ارزیابی گردیده است. یکی از انواع شایع این نوع از خاک‌های مسأله‌دار، خاک‌های متورم شونده می‌باشند. هر ساله تعداد بسیار زیادی از سازه‌های جدید بر روی خاک‌های متورم شونده ساخته می‌شوند عموماً بالغ بر ۶۰٪ از این سازه‌ها متحمل خسارت‌های کوچک از قبیل ترک می‌گردند و حدود ۱۰٪ از این سازه‌ها به نحوی آسیب می‌بینند که دیگر قابل تعمیر نیستند. خاک‌های متورم شونده در یک تعریف جامع به خاک‌هایی اطلاق می‌شود که در اثر تغییر شرایط رطوبتی دارای پتانسیل تورم و انقباض بوده و تغییرات حجمی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند و در نهایت منجر به وارد شدن آسیب‌های جدی به سازه‌های مختلف علل‌الخصوص سازه‌های سبک می‌گردند. این آسیب‌ها در کانال‌ها به صورت ایجاد ترک‌هایی در رویه بتنی کانال و در نهایت بالازدگی آن‌ها مشاهده می‌شوند. ترک‌های مویی ایجاد شده با گذشت زمان و با در نظر

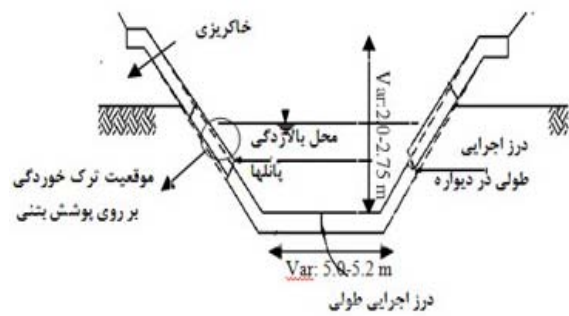
از جمله سازه‌های حساس و ضروری انتقال آب، کانال‌های بتنی غیرمسلح (رویه بتنی) می‌باشند. این نوع از کانال‌ها به علت تکنولوژی اجرایی نسبتاً ساده و هزینه پایین در مقایسه با سایر سازه‌های انتقال آب، از مرسوم‌ترین گزینه‌ها جهت هدایت آب، برای مصارف گوناگون می‌باشند و چون این سازه‌ها بر روی انواع مختلف خاک‌ها احداث می‌شوند، لذا بررسی مسائل ژئوتکنیکی مربوط به اندرکنش خاک و رویه بتنی به منظور کاهش آسیب‌های وارد بر کانال‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به موارد متعدد مشاهده شده در کشور، احداث کانال‌های آبیاری بر روی خاک‌های مسأله‌دار منجر به وارد شدن آسیب‌های جدی به سازه کانال شده و در نهایت اتلاف هزینه هنگفتی را به دنبال داشته است. خاک‌های مسأله‌دار را به طور کلی می‌توان در دو گروه عمده طبقه‌بندی نمود: خاک‌های قابل تورم و خاک‌های فروریزی. در زمینه ساخت کانال بر روی خاک‌های مسأله‌دار مطالعاتی در کشور انجام شده است. به عنوان نمونه رحیمی و همکاران [۱] علل خرابی پوشش بتنی کانال مربوط به پروژه خط انتقال ساوه را که بر روی بستر ماسه‌ای ساخته شده بود مورد مطالعه قرار دادند. این محققین با نمونه برداری از مسیر کانال و

۱-۱- مروری بر پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی عددی خاک‌های مسأله‌دار

رفتار خاک‌های متورم شونده غیر اشباع را می‌توان با استفاده از تئوری خاک‌های غیر اشباع فرمول‌بندی نمود. این فرمول‌بندی با کمک دو مؤلفه مستقل تنش، استفاده از سطوح حالت و قوانین جریان برای فاز مایع انجام می‌گردد [۲-۵]. این دو نامتغیر تنش عبارتند از تنش نرمال خالص $(\sigma - u_a)$ و مکش ماتریک $(u_a - u_w)$ که در این روابط σ تنش نرمال کلی، u_a فشار هوای منفذی و u_w فشار آب منفذی می‌باشد. تغییرات در نسبت تخلخل و درجه اشباع خاک را می‌توان به صورت تابعی از نامتغیرهای تنش به شکل دو سطح پیوستگی سه بعدی بیان نمود [۶]. توابع مربوط به پارامترهای الاستیک خاک را که برای انجام تحلیل‌های تغییر حجم خاک مورد نیاز است می‌توان به کمک این سطوح پیوستگی محاسبه نمود. روش‌های آزمایشگاهی نیز برای اندازه‌گیری مستقیم مشخصات خاک وابسته به سطوح پیوستگی وجود دارد [۴، ۷]. اما انجام این آزمایشات گران، سخت و زمانبر بوده و ممکن است برای پروژه‌های معمول مهندسی به صرفه نباشد. لذا تقریبی از ضرایب تغییر حجم برای بسیاری از تحلیل‌های مهندسی می‌تواند کافی باشد. فرآیند مربوط به تقریب ضریب تغییر حجم کمک می‌کند تا مکانیک خاک‌های غیراشباع به صورت کاربردی در کارهای مهندسی ژئوتکنیک مورد استفاده قرار بگیرد [۸]. در این روش تقریبی فرض بر این است که شرایط همدمایی در محیط برقرار شده و فاز هوا پیوسته بوده و در فشار اتمسفر قرار داشته باشد. فرآیند تنش-کرنش به کمک معادلات استاتیکی پوشش داده می‌شود در حالی که جریان آب با استفاده از معادلات پیوستگی سیال بیان می‌گردد. برای محاسبه تغییر حجم نیاز هست که هر دو معادله تعادل و پیوستگی حل شود. این معادلات می‌توانند به صورت همزمان و یا مستقل از هم حل گردند. حل همزمان این معادلات مشکل و پیچیده می‌باشد زیرا توابع غیرخطی مشخصات خاک هم وابسته به جریان آب و هم وابسته به تنش-کرنش می‌باشد. حل معادلات به صورت غیرهمزمان از حل معادله جریان آب و معادله تنش-کرنش به صورت مستقل از هم حاصل می‌گردد. روش غیر همزمان بسیار راحت‌تر از روش همزمان می‌تواند به نتیجه برسد به علت این که مشخصات خاک در هر مرحله از آنالیز مستقل از حالت دیگر می‌باشد [۹].

گرفتن سیکل‌های ذوب و یخبندان بزرگ‌تر شده و محلی برای نفوذ آب و رشد گیاهان گشته و در نهایت به تغییر مشخصات هیدرولیکی کانال منتهی گردیده و خرابی آن را به دنبال خواهند داشت. از آن‌جا که ترمیم و بازسازی سازه‌های تخریب شده هزینه هنگفتی را به پروژه تحمیل می‌کند، لذا انجام تحقیقاتی برای شناخت مکانیسم اندرکنشی بین خاک و سازه کانال بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در شکل (۱) تصویری از بالازدگی رویه بتنی کانال دشت تبریز در اثر فرآیند تورم به همراه شکل شماتیک بالازدگی رویه بتنی ارائه شده است.

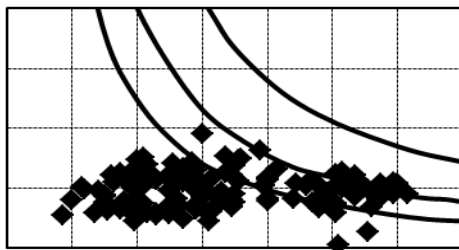
با توجه به مقدمه ارائه شده از آن‌جا که احداث کانال بر روی خاک‌های مسأله‌دار از جمله خاک‌های متورم شونده بعضاً اجتناب ناپذیر است، لذا برای کاهش مخاطرات باید به دنبال روش‌های مناسب گشت. به این منظور در این مطالعه مقطع یک کانال دوزنقه‌ای با ابعاد واقعی به کمک بسته نرم‌افزاری Geo-Studio 2007 مدل گردیده و رفتار اندرکنشی خاک و لاینینگ در شرایط آب‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است. از آن‌جا که خاک بستر کانال در شرایط غیراشباع قرار داشته و دارای پتانسیل تورم می‌باشد، لذا لازم است در ابتدا اشاره‌ای به پیشینه مطالعات انجام یافته جهت مدلسازی عددی رفتار خاک‌های غیراشباع و تلاش‌های انجام یافته توسط محققین برای کاربردی کردن تئوری‌های ارائه شده صورت گیرد.



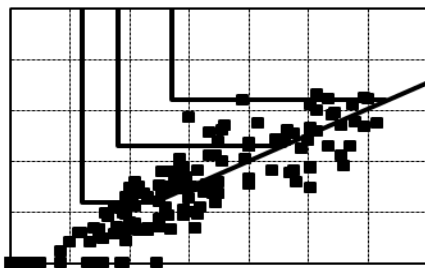
شکل ۱- تصویری از محل‌های آسیب دیده و شکل شماتیک

بالازدگی پوشش کانال [۱۰]

متغیر است. البته تعدادی از نمونه‌ها هم در محدوده پتانسیل تورم زیاد و خیلی زیاد هم قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است که پدیده تورم باید در طراحی سازه‌ها و مخصوصاً سازه‌های سبک در این منطقه مد نظر قرار گیرد. هم چنین نتیجه آزمایش تورم مستقیم مطابق شکل (۳)، تورم آزادی برابر ۰/۴/۵٪ بعد از ۴۸ ساعت و فشار تورمی نظیر معادل ۴۰ کیلو پاسکال برای نمونه دست نخورده به دست داده است که این فشار تورمی با این که برای سازه‌های سنگین خیلی زیاد نمی‌باشد ولی برای سازه‌های سبک مثل پوشش بتنی می‌تواند مخرب باشد.

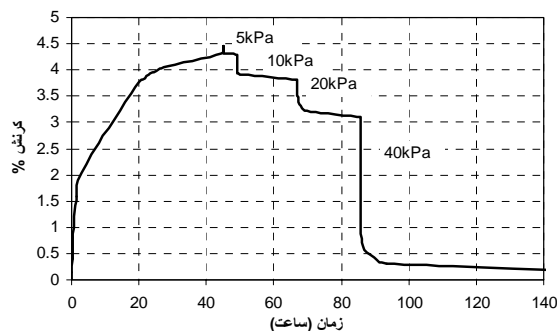


(الف)



(ب)

شکل ۲- ارزیابی پتانسیل تورم خاک در مسیر کانال AMC بر اساس: الف) (Seed (1962) ب) Van der Merwe (1964) [۱۰]



شکل ۳- منحنی تورم آزاد و بارگذاری برای تعیین فشار تورمی

[۱۰]

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات اصلی طرح انتقال آب دشت تبریز

شبکه آبیاری و زهکشی دشت تبریز شامل شش ناحیه عمرانی و در سطح ۴۰۰۰۰ هکتار می‌باشد که هم اکنون ۱۷۰۰۰ هکتار آن در حال اجرا می‌باشد. از مهم‌ترین بخش‌های این پروژه عبارتند از: کانال اصلی AMC و کانال‌های درجه ۲ و ۳ و زهکش‌های اصلی. این مجموعه حدوداً ۱۵۸۵۰ هکتار از اراضی دشت تبریز را در بر می‌گیرد و در ساحل راست رودخانه آجی‌چای قرار دارد. ظرفیت کانال اصلی جهت انتقال آب به میزان ۲۲ متر مکعب در ثانیه طراحی شده است. عرض کف کانال بین ۵ تا ۵/۲ متر و ارتفاع آن بین ۲ تا ۲/۷۵ متر متغیر می‌باشد. دیواره‌های کانال دارای شیب ۱ (عمودی) به ۱/۵ (افقی) می‌باشد. پوشش اصلی کانال (لاینینگ)، یک لایه بتن غیر مسلح درجا به ضخامت ۱۲۵ میلی‌متر با عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم بوده و عرض پانل‌های بتنی اجرا شده در طول کانال ۳ متر می‌باشد. قبل از ارائه طرح پیشنهادی که شامل فیلتر می‌باشد در زیر پوشش بتنی (لاینینگ) فقط یک لایه شفته سیمان به عیار حدود ۵۰ تا ۸۰ کیلوگرم در مترمکعب و ضخامت ۲۰ سانتیمتر در کف و دیوارها اجرا می‌شده است [۱۰].

۲-۲- شرایط ژئوتکنیکی بستر

بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده خاک‌های سطحی دشت تبریز عمدتاً ریزدانه و شامل سیلت و رس هستند. برای بررسی قدرت تورمی خاک این منطقه از روش‌های طبقه‌بندی ارائه شده در منابع استفاده شد. به طور کلی دو روش غیرمستقیم تشخیص پتانسیل تورم خاک به شکل وسیعی در ادبیات فنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عبارتند از روش Seed و همکاران [۱۱] (شکل ۲-الف)) و روش Van der Merwe [۱۲] (شکل ۲-ب)). در روش اول درصد ذرات هم اندازه با رس و فعالیت رس در یک نمودار قرار می‌گیرند. فضای این نمودار به چهار قسمت تقسیم شده است که معرف میزان پتانسیل تورم از کم تا خیلی زیاد می‌باشد. در روش دوم نیز درصد ذرات هم‌اندازه با رس و دامنه خمیری (PI) در یک نمودار قرار گرفته‌اند. در این نمودار نیز چهار فضا وجود دارد و خاک می‌تواند جزو خاک‌های با پتانسیل تورم کم تا خیلی زیاد قرار گیرد. جهت تشخیص پتانسیل تورم خاک بستر کانال دشت تبریز، نتایج آزمایش‌ها در این نمودارها پیاده شده‌اند. مشاهده می‌شود که پتانسیل تورم در طول کانال در محدوده تورم کم تا متوسط

قانون داری تبعیت کند و نفوذپذیری خاک به صورت یک تابع غیرخطی منظور گردد به صورت زیر خواهد بود.

$$\beta_{\omega 1} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \beta_{\omega 2} \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_w^x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_w}{\rho_w g} + Y \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w^y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u_w}{\rho_w g} + Y \right) \right] \quad (1)$$

که در این رابطه k_w^x و k_w^y به ترتیب ضریب نفوذپذیری در جهت x و y می باشند. t زمان، ρ_w دانسیته آب، g شتاب ثقل، Y هد ارتفاعی و ε_v کرنش حجمی می باشد و

$$\beta_{\omega 1} = \frac{m_1^w}{m_1^s}, \text{ or } \frac{E}{(1-2\mu)E_{\omega}} \\ \beta_{\omega 2} = m_2^{\omega} - \frac{m_1^w m_2^s}{m_1^s}, \text{ or } \frac{1}{H_{\omega}} - \frac{3E}{(1-2\mu)HE_{\omega}}$$

که در روابط اخیر E پارامتر الاستیسیته سازه خاک که وابسته به تنش نرمال خالص می باشد. H پارامتر الاستیسیته سازه خاک به صورت تابعی از مکش ماتریسی، E_W پارامتر الاستیک برای تغییرات مقدار آب در خاک با در نظر گرفتن تغییرات تنش نرمال خالص، H_W پارامتر الاستیک برای تغییرات مقدار آب در خاک با در نظر گرفتن تغییرات مکش ماتریسی، μ نسبت پواسون به عنوان ضریب تغییر حجم، m_1^3 و m_2^3 شیب های مربوط به سطوح حالت خاک و ضرایب تغییرات حجمی، و m_1^w و m_2^w شیب های مربوط به سطوح حالت فاز آب می باشند. شکل عمومی سطوح پیوستگی برای هر دو سازه خاک و فاز آب در شکل (۴) آورده شده است. معادله تفاضل جزئی حاکم بر تعادل توده خاک، به صورت تابعی از جابجایی در جهات x و y و یا (u, v) در حالت کرنش صفحه ای برای یک نوع خاک الاستیک غیرخطی ایزوتروپ مطابق روابط زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} (c_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial v}{\partial y}) + c_{33} \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) - d_s \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial x} + b_x = 0 \quad (2)$$

$$c_{33} \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (c_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial v}{\partial y}) - d_s \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial y} + b_y = 0 \quad (3)$$

همان طور که در بررسی های صحرائی نیز مشاهده گردید پدیده تورم منجر به بالازدگی پانل ها نسبت به هم از چند تا ۳۰ میلی متر در محل درز اجرایی و ترک خوردگی در سطح بتن کانال مطابق شکل (۱) شده است که استفاده از یک لایه فیلتر ۳۰ سانتی متری به همراه یک لایه بتن مگر که صرفاً به خاطر سهولت اجرای پوشش بتنی مطرح است به عنوان یک راه کار جهت جلوگیری و یا کاهش اثرات این پدیده پیشنهاد گردید. اجرای فیلتر روی پدیده تورم اثر مستقیم ندارد؛ بلکه مشخصات ماده استفاده شده در فیلتر، موجب کاهش اثر تورم می گردد. با توجه به اینکه فیلتر از مواد دانه ای تشکیل یافته است، فشارهای موضعی خاک بستر را می تواند به شکل یکنواخت تری به پوشش بتنی منتقل کند و جابجایی های غیر یکسان پانل های مجاور را کاهش دهد. بنابراین با این که این لایه جلوی تورم را کاملاً نمی گیرد، ولی اثر تورم روی پوشش بتنی را تقلیل می دهد و کارایی پوشش بتنی را تا حدودی حفظ می کند. به نظر مؤلفین این مهم ترین اثر لایه فیلتر در مقابل تورم می باشد. مسئله دوم وزن این لایه اضافی می باشد. این لایه فیلتر فشاری معادل ۵ کیلو پاسکال در جهت قائم ایجاد می کند. این فشار با این که در مقابل فشار تورمی زیاد نیست ولی بسته به پتانسیل تورم می تواند قسمتی از فشار تورمی را جبران نماید. این راهکار پیشنهادی در طول ۵۰ متر از کانال به طور آزمایشی پیاده شد و برای بررسی کارایی آن نقاط نقشه برداری روی مقطع کانال تعبیه شده و میزان جابجایی پانل ها در زمان های مختلف تا ۱۸ روز بعد از آب اندازی ثبت گردید. نتایج حاصل نشان دادند علاوه بر این که فیلتر توانسته است قسمتی از تورم خاک را مستهلک نماید، بلکه تغییر شکل ها را طوری روی پانل های بتنی توزیع نموده که هیچ گونه ترکی ایجاد نشده و اختلاف تغییر مکان پانل های مجاور از ۵ میلی متر تجاوز ننموده است. در صورتی که در قسمت های اولیه کانال که فیلتر اجرا نشده بود، با همین میزان پتانسیل تورم ترک هایی در پانل ها ایجاد شده بود و در طی چند ماه که خاک به اندازه کافی فرصت تغییر شکل داشته است. اختلاف تغییر مکان پانل ها تا ۳۰ میلی متر هم قابل مشاهده بودند [۱۰]. در ادامه کارایی فیلتر به صورت عددی هم مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲-۳- مبانی مدل سازی عددی تورم و معادلات تفاضل

جزئی حاکم [۹]

معادله تفاضل جزئی حاکم بر جریان آب در خاک اشباع- غیراشباع غیرایزوتروپ ناهمگن با فرض این که جریان آب از

آب منفذی و توزیع آن را در توده خاک در اثر بارگذاری خارجی به کمک فرمول بندی هم زمان و غیر هم زمان محاسبه نمود. علاوه بر آن به کمک SIGMA/W می توان اندرکنش المان خاک را با المان های تیر یا میلگرد مدل نمود [۱۳].

۲-۵- اصول مدل سازی رفتار تورمی خاک به کمک نرم افزار SIGMA/W 2007

همان طور که در مقدمه اشاره شد، به علت پیچیده بودن مدل رفتاری خاک های غیر اشباع و تعداد زیاد پارامترهای مورد نیاز برای انجام تحلیل ها و مشکلات موجود برای اندازه گیری و یا محاسبه مقادیر عددی این پارامترهای ورودی، این مدل های رفتاری به ندرت توسط مهندسیین ژئوتکنیک مورد استفاده قرار می گیرند. بر اساس بررسی های انجام شده این مدل های رفتاری به اکثر نرم افزارهای معمول ژئوتکنیک وارد نشده اند. لذا بیشتر کارشناسان به اشتباه یا اجباراً خاک را اشباع فرض نموده و از مدل های رفتاری مربوط به این شرایط نظیر Cam-Clay و یا Modified Cam-Clay استفاده می نمایند. در سال های اخیر تلاش های زیادی توسط محققین برای کاربردی کردن مدل های رفتاری خاک های غیر اشباع و وارد نمودن این مدل ها به نرم افزارهای ژئوتکنیکی انجام شده است. لازمه کاربردی نمودن این مدل ها انجام فرضیات ساده کننده ای بوده است که تا حد امکان دقت نتایج را تحت شعاع قرار ندهد. بر اساس آنچه که از مرور منابع فنی موجود حاصل می شود تا حال فقط در دو نرم افزار ژئوتکنیکی مدل رفتاری خاک های غیر اشباع وارد شده است که عبارتند از Plaxis2D 2010 و GeoStudio 2007. در این پژوهش از بسته نرم افزاری GeoStudio 2007 جهت مدل سازی استفاده شده است. مبنای کاری این نرم افزار برای مدل سازی خاک های غیر اشباع متورم شونده مدل رفتاری و روابط ارائه شده Hung و Vu [۹] می باشد. در این مدل رفتاری نسبت تخلخل، e_f ، به ازای تنش نرمال خالص $(\sigma - u_a)_0$ و مکش ماتریک برابر با k_0 را می توان مطابق شکل (۵) هم از صفحه تنش نرمال خالص و هم از صفحه مکش ماتریک به دست آورد. معادلات نظیر به صورت زیر می باشند.

$$e_f = e_0 + C_s \log \frac{(\sigma - u_a)_0}{P_s} \quad (۴)$$

$$e_f = e_0 + C_m \log \frac{S_0}{S_s} \quad (۵)$$

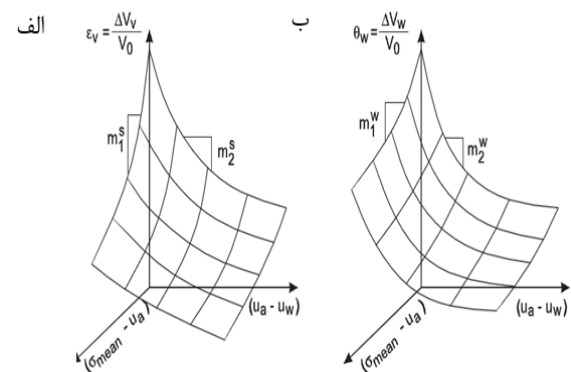
که در این روابط b_x و b_y نیروهای حجمی در جهات x و y هستند و:

$$d_s = \frac{E}{(1 - 2\mu)H}$$

$$c_{12} = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad c_{33} = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

$$c_{11} = c_{22} = \frac{(1 - \mu)E}{(1 + \mu) + 9(1 - 2\mu)}$$

معادله نشت (معادله (۱)) اثر تراکم پذیری و نرخ تغییر حجم توده خاک بر روی فرایند جریان انتقالی آب در خاک متورم شونده نشان می دهد. حل معادله نشت (۱) و معادلات تعادل توده خاک (۲) و (۳) را می توان به هر دو روش هم زمان و مستقل از هم انجام داد [۵].



شکل ۴- الف) سطوح پیوستگی المان های خاک، ب) سطوح پیوستگی فاز آب در خاک های غیر اشباع متورم شونده [۹]

۲-۴- معرفی نرم افزار SIGMA/W 2007

SIGMA/W یکی از نرم افزارهای بسته GeoStudio می باشد. این نرم افزار مبتنی بر روش المان های محدود بوده که برای تحلیل تنش- تغییر شکل سازه های خاکی مورد استفاده قرار می گیرد. فرمول بندی جامع آن این امکان را فراهم ساخته است که بتوان هر نوع مسأله ساده و پیچیده را به کمک آن حل نمود. به عنوان مثال به کمک این نرم افزار هم می توان تحلیل تغییر شکل الاستیک خطی ساده را انجام داد و هم تحلیل تنش مؤثر مبتنی بر رفتار الاستوپلاستیک غیرخطی پیچیده را تحلیل نمود. زمانی که این نرم افزار با سایر محصولات GeoStudio در کنار هم مورد استفاده قرار می گیرد، می توان نحوه تغییرات فشار

از صفحه تنش نرمال خالص در مکش ماتریک برابر با b (شکل (۵)) تغییرات نسبت تخلخل را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\Delta e = C_s \log \frac{M}{P_s} \quad (9)$$

با مرتب سازی معادله (۹) رابطه زیر به دست می آید:

$$M = P_s \times 10^{\Delta e / C_s} \quad (10)$$

$$(\sigma - u_a)_0 < M < P_s$$

از صفحه مکش ماتریک در تنش نرمال خالص برابر با $(\sigma - u_s)_0$ (شکل (۵)) تغییرات نسبت تخلخل را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\Delta e = C_m \log \frac{N}{S_s} \quad (11)$$

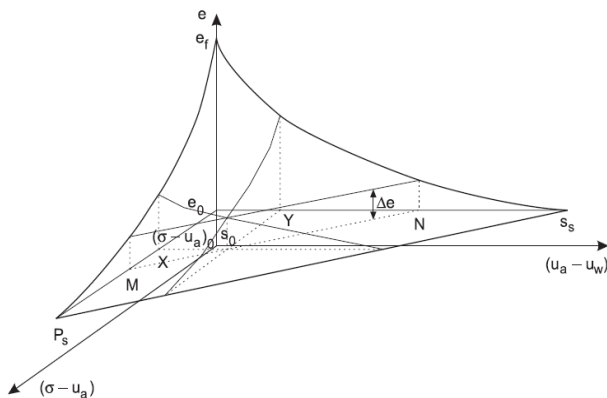
با مرتب سازی معادله (۱۱) رابطه زیر به دست می آید:

$$N = S_s \times 10^{\Delta e / C_m} \quad (12)$$

$$S_0 < N < S_s$$

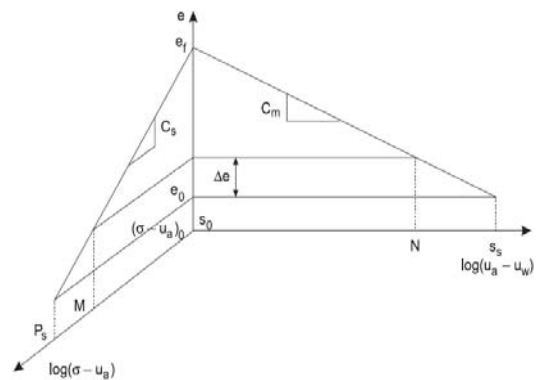
برای صفحه نسبت تخلخل ثابت برابر با e رابطه زیر به دست می آید (شکل (۶)):

$$\frac{N - S_0}{M - (\sigma - u_a)_0} = \frac{Y - S_0}{M - X} \quad (13)$$



شکل ۶- رابطه بین تنش نرمال خالص و مکش ماتریک در صفحه نسبت تخلخل ثابت [۹]

که در این روابط e_0 نسبت تخلخل اولیه خاک، P_s فشار تورم، C_s مکش تورمی (نظیر مقدار فشار تورم در صفحه مکش) می باشند. مکش S_0 و تنش نرمال خالص $(\sigma - u_a)_0$ مقادیر تنشی می باشند که در آن نقاط محورهای مربوط به پارامترهای نسبت تخلخل در برابر لگاریتم مکش و نسبت تخلخل در برابر لگاریتم تنش نرمال خالص مطابق شکل (۵) به همدیگر رسیده اند. این مقادیر توسط کارهای آزمایشگاهی قابل محاسبه می باشند. در این مدل مقدار عددی برای مقادیر مکش S_0 و تنش نرمال خالص $(\sigma - u_a)_0$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- رابطه خطی بین نسبت تخلخل و لگاریتم نامتغیرهای تنش [۹]

به کمک معادلات (۴) و (۵)، معادله (۶) به شکل زیر حاصل می گردد.

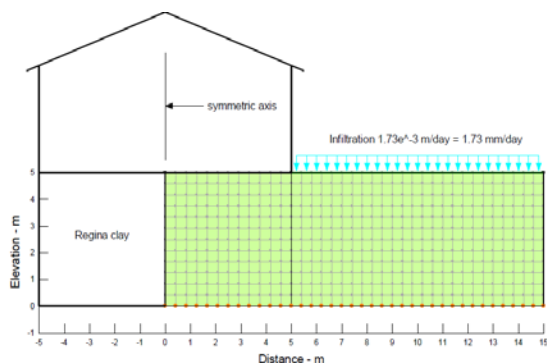
$$C_s \log \frac{(\sigma - u_a)_0}{P_s} = C_m \log \frac{S_0}{S_s} \quad (6)$$

بنابراین مکش ماتریک S_s از رابطه (۶) به صورت زیر به دست می آید:

$$S_s = S_0 \left(\frac{P_s}{(\sigma - u_a)_0} \right)^{C_s / C_m} \quad (7)$$

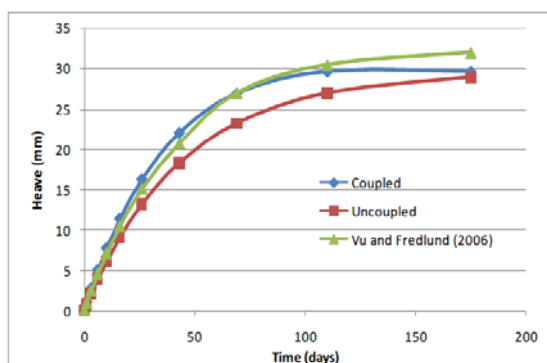
اگر فرض شود که e نسبت تخلخل به ازای تنش نرمال خالص برابر با X و مکش ماتریک برابر با Y باشد، تغییرات نسبت تخلخل را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\Delta e = e - e_0 \quad (8)$$



شکل ۷- مثال حل شده به روش تئوریک توسط
Hung و Vu و به روش مدل سازی عددی توسط نرم افزار
[۱۳] SIGMA/W 2007

جهت تأیید دقت نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری، مثال موجود در کار این محققین توسط نرم افزار نیز دقیقاً شبیه سازی شده و مدل رفتاری پیشنهاد شده برای خاک های غیراشباع به آن اختصاص داده شده است. با مراجعه به شکل (۸) و مقایسه نتایج حاصل می توان به صحت و دقت کار نرم افزار پی برد. در این نمودار میزان تورم خاک بستر درست در مجاورت گوشه راست سازه نسبت به زمان که از دو روش تئوریک Hung و Vu [۹] و نرم افزار به دست آمده، نشان داده شده است. با توجه به نمودار مشاهده می شود که نرم افزار به کمک هر دو روش تحلیل همزمان و غیر همزمان که قبلاً توضیح داده شده است نتایج بسیار رضایت بخشی را به دست می دهد. در ضمن لازم به ذکر است که اختلاف جزئی نتایج دو روش به این علت است که پارامترهای ورودی نرم افزار و روش حل معادلات نسبت به کار Hung و Vu [۹] تا حد امکان ساده شده است تا قابل استفاده برای عموم باشد.



شکل ۸- مقایسه نتایج SIGMA/W با نتایج کار
Hung و Vu [۹]

که با مرتب سازی این رابطه داریم:

$$Y = \frac{N - S_0}{M - (\sigma - u_a)_0} (M - X) + S_0 \quad (14)$$

با جاگذاری معادلات (۷)، (۸)، (۹) و (۱۲) در معادله (۱۴) رابطه نهایی بین تنش نرمال خالص X ، مکش ماتریک Y و نسبت تخلخل e به صورت زیر به دست می آید:

$$Y = \frac{S_0 \left[\left(\frac{P_s}{a} \right)^{C_s/C_m} \times 10^{(e-e_0)/C_m} - 1 \right] (P_s \times 10^{(e-e_0)/C_s} - X)}{P_s \times 10^{(e-e_0)/C_s} - (\sigma - u_a)_0} \quad (15)$$

$$(u_a - u_w) = \frac{S_0 \left[\left(\frac{P_s}{a} \right)^{C_s/C_m} \times 10^{(e-e_0)/C_m} - 1 \right] [P_s \times 10^{(e-e_0)/C_s} - (\sigma - u_a)]}{P_s \times 10^{(e-e_0)/C_s} - (\sigma - u_a)_0} + S_0 \quad (16)$$

Hung و Vu [۹] برای بررسی کارایی مدل خود به حل یک مثال در مقاله خود پرداخته اند. در این مثال مطابق شکل (۷) یک لایه ۵ متری از رس با خاصیت خمیری بالا و مکش اولیه ثابت (۴۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع) مد نظر قرار گرفته و فرض شده است یک سازه در سطح زمین بر روی این لایه ساخته شود و جریان آبی از تراز زمین با دبی مشخصی (۱/۷۳ میلی متر بر روز) منجر به تغییر رطوبت خاک با گذشت زمان گردد. با در نظر گرفتن این شرایط و اختصاص پارامترهای مکانیکی مورد نظر به خاک بستر، تغییر حجم توده خاک (تورم) به روش تئوریک دقیق که در متن مقاله این محققین وجود دارد محاسبه گردیده و با نتایج مدل های بسیار دقیق ارائه شده توسط افراد دیگر مقایسه شده و نتایج حاکی از انطباق بسیار مطلوب روش جدید Hung و Vu [۹] با روش های پیچیده قبلی می باشد. همان طور که قبلاً گفته شد مبنای مدل سازی خاک غیراشباع در نرم افزار SIGMA/W 2007 همین مدل رفتاری جدید می باشد.

مرزهای خارجی مدل در طرفین کانال در جهت جابجایی جانبی و در کف مدل در جهت جابجایی قائم محدود شده است. برای مدسازی شرایط اولیه (شرایط محلی) تلاش شده است که تا حد امکان از پارامترهای واقعی استفاده گردد تا نتایج به دست آمده قابل ارزیابی باشند. از آنجا که در شرایط محلی قبل از آبیگری خاک زیر کانال غیراشباع بوده و مکش ثابتی در آن برقرار می باشد، لذا مکش اولیه معادل ۲۰۰ کیلوپاسکال در تحلیل اولیه به خاک بستر اعمال شده است. برای مدل سازی نفوذ آب کانال به درون خاک، ارتفاع آبی برابر با ۲ متر به صورت هد آب به المان های لاینینگ وارد شده و تحلیل های مربوط به نشست و تنش- تغییر شکل به صورت همزمان انجام گرفته است. هم چنین بازه زمانی برابر با ۱۸۰ روز برای انجام تمامی تحلیل ها انتخاب شده است. علت این امر دستیابی به الگوی رفتاری یکنواخت از نظر تغییرات تنش- تغییر شکل در اثر تغییرات رطوبت بستر می باشد. مدل سازی لاینینگ به کمک المان های تیر و با ابعاد و مشخصات رویه بتنی انجام شده است. برای این کار مقطع تیر با ارتفاع ۱۲/۵ سانتی متر برابر با ضخامت رویه بتنی و عرض واحد در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای مورد نیاز برای انجام تحلیل ها در جدول (۱) و شکل (۱۰) ارائه شده است که در جدول (۱)، $\gamma, \Phi, C, \mu, E, K$ و I به ترتیب وزن واحد حجم، زاویه اصطکاک، ضریب چسبندگی، نسبت پواسون، مدول الاستیسیته، ضریب نفوذپذیری و ممان اینرسی می باشد. با توجه به این مسأله که تحلیل ها در محیط خاک های غیراشباع انجام می شود، لذا برخی از پارامترهای ورودی نرم افزار باید به صورت تابعی از تنش قائم و یا مکش وارد شوند. لذا در جهت رسیدن به این هدف مدول الاستیسیته خاک به صورت تابعی از تنش مؤثر قائم مطابق شکل (۱۰-الف) در تحلیل ها منظور شده است. هم چنین درصد رطوبت حجمی^۱ (شکل ۱۰-ب) و هدایت هیدرولیکی خاک (شکل ۱۰-ج) به صورت توابع وابسته به مکش توسط روش های ارائه شده در مقالات Fredlund و Xing [۱۴] Kovacs (1981) محاسبه شده و به برنامه معرفی گردیده است. بر این اساس تابع رطوبت حجمی خاک به کمک روابط زیر به دست می آید:

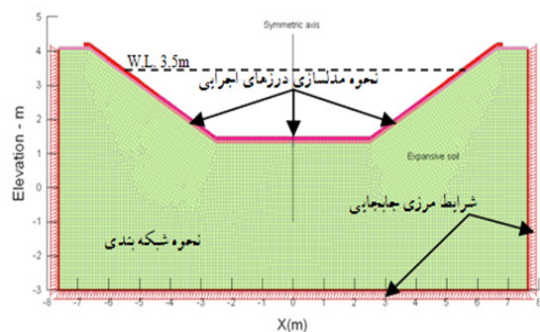
$$\Theta_w = C_\psi \frac{\Theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (17)$$

بنابراین با توجه به آنچه که گفته شد می توان چنین نتیجه گرفت که برنامه SIGMA/W می تواند برای تخمین میزان تورم خاک های غیراشباع متورم شونده که تحت تأثیر تغییرات شرایط رطوبتی و به تبع آن ایجاد فشار منفذی منفی قرار می گیرند با دقت مناسبی استفاده گردد [۱۳].

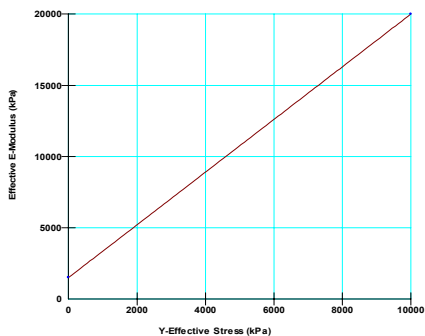
۲-۶- مدل سازی انجام شده در نرم افزار و پارامترهای

ورودی

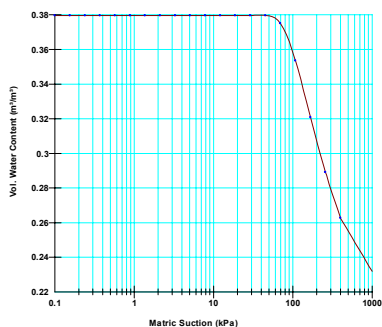
به منظور قابل مقایسه بودن نتایج بررسی های آزمایشگاهی و مشاهدات صحرایی در این تحقیق برای مدل سازی از ابعاد و مشخصات واقعی کانال انتقال آب مربوط به شبکه آبیاری و زهکشی دشت تبریز استفاده گردیده است. در مدل سازی انجام شده عرض کف کانال ۵ متر و ارتفاع آن ۲/۷۵ متر در نظر گرفته شده است. دیواره های کانال دارای شیب ۱ (عمودی) به ۱/۵ (افقی) می باشد. پوشش اصلی کانال (لاینینگ)، یک لایه بتن غیرمسلح می باشد. سه دسته درز اجرایی مطابق شرایط واقعی در مدل ساخته شده نیز در نظر گرفته شده است. یک دسته درز در کف کانال و دو دسته درز دیگر در دیواره ها به فاصله ۰/۵ متر از کف کانال منظور شده است. جهت مدل سازی درزهای کانال، فاصله ای به اندازه ۲ سانتی متر در رویه بتنی و به صورت عمود بر سطح کانال همانند شرایط اجرایی در نظر گرفته شده است. در مدل سازی انجام شده ضخامت خاک بستر در زیر کف کانال حدود ۱/۵ برابر ارتفاع کانال منظور شده است که به حد کافی به نفع اطمینان می باشد. عرض مدل ساخته شده نیز از طرفین کانال به اندازه یک متر بزرگتر از عرض کانال در تاج آن در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۹) در این برنامه برای مدل سازی مقطع کانال از المان های چهار گرهی استفاده شده است و تقریباً ۸۶۰۰ المان برای شبکه بندی به کار رفته است.



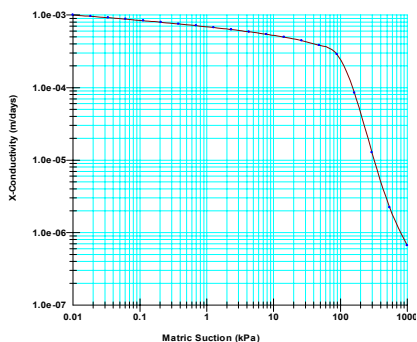
شکل ۹- مدل سازی کانال در نرم افزار



(الف)



(ب)



(ج)

که در این رابطه Θ_{11} رطوبت حجمی خاک، Θ_s رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع، e یک عدد طبیعی (۲/۷۱۸۲۸)، Ψ فشار آب منفذی منفی، و a و m پارامترهای مربوط به منحنی SWCC هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$a = \Psi_i \quad , \quad m = 3.67 \ln\left(\frac{\Theta_s}{\Theta_i}\right)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m \Theta_s} 3.72 s \Psi_i$$

که در آن Ψ_i مقدار فشار مکش خاک متناظر با نقطه انحنا منحنی و s شیب خط مماس بر تابع عبوری از این نقطه انحنا می‌باشد. در رابطه بالا C_Ψ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C_\Psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{\Psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\Psi_0}{\Psi_r}\right)} \quad (18)$$

که Ψ_r مکش نظیر مقدار آب در حالت تسلیم مربوط به منحنی SWCC می‌باشد [۱۴]. در کار اخیر این مقادیر به صورت تئوریک و به کمک نتایج آزمایشات مربوط به مصالح مشابه، به دست آمده است.

شکل ۱۰- پارامترهای مورد نیاز نرم افزار: الف) تابع مدول الاستیسیته خاک، ب) تابع درصد رطوبت حجمی،

ج) تابع هدایت هیدرولیکی خاک

جدول ۱- برخی از پارامترهای ورودی نرم افزار

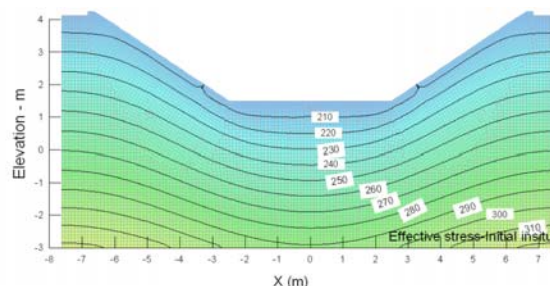
لاینینگ					
$\gamma(\text{KN/m}^3)$	μ	$E(\text{KN/m}^2)$	$I(\text{m}^4)$	$K(\text{cm/sec})$	
۲۱	۰/۲	$1/8 \times 10^7$	۰/۰۰۰۱۶	10^{-4}	
خاک متورم شونده زیر کانال					
$\gamma(\text{KN/m}^3)$	Φ	$c(\text{KN/m}^2)$	μ	$E_0(\text{KN/m}^2)$	
۱۹/۲	۲۰	۵۰	۰/۴	۱۰۰۰۰	
فیلتر					
$\gamma(\text{KN/m}^3)$	Φ	$c(\text{KN/m}^2)$	μ	$E_0(\text{KN/m}^2)$	$K(\text{cm/sec})$
۲۰	۲۵	۰	۰/۳	۱۵۰۰۰	10^{-2}

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل‌ها

۳-۱-۱- تحلیل شرایط اولیه^۱

در مرحله اول تحلیل، شرایط محیطی اولیه به مدل وارد شده و تعادل اولیه به دست می‌آید. در این حالت مدل رفتاری الاستیک خطی برای خاک و لاینینگ در نظر گرفته می‌شود و همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، با توجه به رطوبت اولیه ۲۰ درصدی خاک که از روی نتایج آزمایشات آزمایشگاهی روی نمونه‌های دست نخورده موم اندود شده به دست آمده، مقدار مکش اولیه محیط ۲۰۰ کیلوپاسکال در محاسبات منظور شده است. به عنوان نمونه تنش‌های مؤثر اولیه محیط حاصل از این آنالیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- کنتورهای مربوط به تغییرات تنشهای مؤثر محیط در شرایط اولیه

۳-۱-۲- تحلیل تورم با حل هم‌زمان معادلات

در این حالت تحلیل نفوذ آب از درون کانال و به دنبال آن تورم خاک با استفاده از SIGMA/W به روش Coupled مدل‌سازی می‌شود. در این شرایط محاسبات تنش- کرنش و تغییرات فشار منفذی به طور هم‌زمان محاسبه می‌شوند. در این حالت رفتار خاک الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده و مدل ارائه شده توسط Hung و Vu [۹] برای پیش‌بینی رفتار خاک متورم شونده غیراشباع استفاده شده است. لازم به ذکر است تمامی روابط به کار رفته در محاسبات و همچنین مکانیسم رفتاری خاک تابعی از زمان می‌باشند. از آن‌جا که هدف از مقاله حاضر بررسی مکانیسم رفتاری خاک‌های متورم شونده بستر کانال در اندرکنش با رویه بتنی کانال در اثر تغییر رطوبت خاک بستر به علت نفوذ آب کانال و هم‌چنین بررسی تأثیر اجرای لایه فیلتر در کنترل رفتار تورمی خاک بستر به کمک دو روش تجربی و عددی و مقایسه نتایج حاصله می‌باشد. لذا تحلیل‌های انجام شده

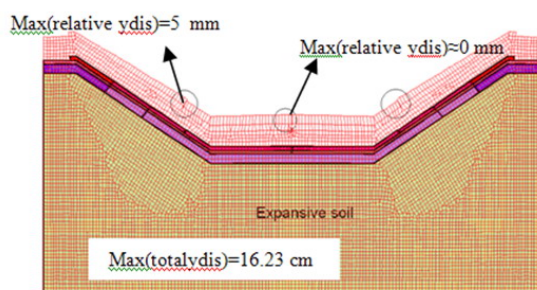
1- Initial conditions

در کار اخیر را می‌توان به دو گروه عمده طبقه‌بندی نمود. در حالت اول در زیر لاینینگ لایه فیلتر منظور نشده و محاسبات انجام گرفته و مقادیر جابجایی‌ها، لنگرها و نیروهای اندرکنشی محاسبه گردیده است. در حالت دوم یک لایه فیلتر به ضخامت ۳۰ سانتی متر در زیر لاینینگ در نظر گرفته شده و محاسبات تکرار گردیده است. در هر دو وضعیت تراز آب در کانال در ارتفاع ۲ متری از کف کانال و ثابت در نظر گرفته شده است.

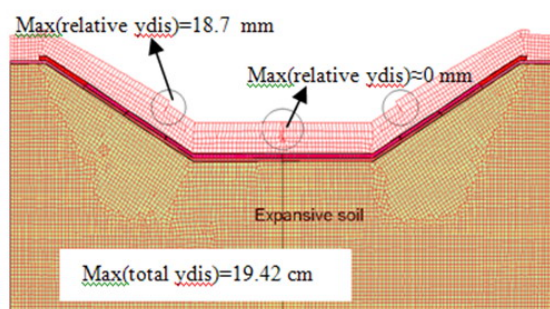
۳-۲- نتایج تحلیل‌های عددی و بحث

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نتایج تحلیل‌های عددی که نحوه تورم خاک بستر کانال و تغییر شکل‌های به وجود آمده در لاینینگ بتنی در اثر نفوذ آب از درون کانال در هر دو حالت به ترتیب بدون در نظر گرفتن لایه فیلتر و با منظور کردن این لایه نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی از لحاظ مکانیسم رفتاری لاینینگ (بالازدگی پانل‌ها نسبت به هم) انطباق قابل قبولی با حالت به وقوع پیوسته در شرایط واقعی دارد شرایط صحرایی ایجاد شده برای لاینینگ در شکل (۱) به صورت عکس نشان داده شده است.



شکل ۱۲- جابجایی قائم (تورم) ایجاد شده در مقطع کانال بدون در نظر گرفتن لایه فیلتر



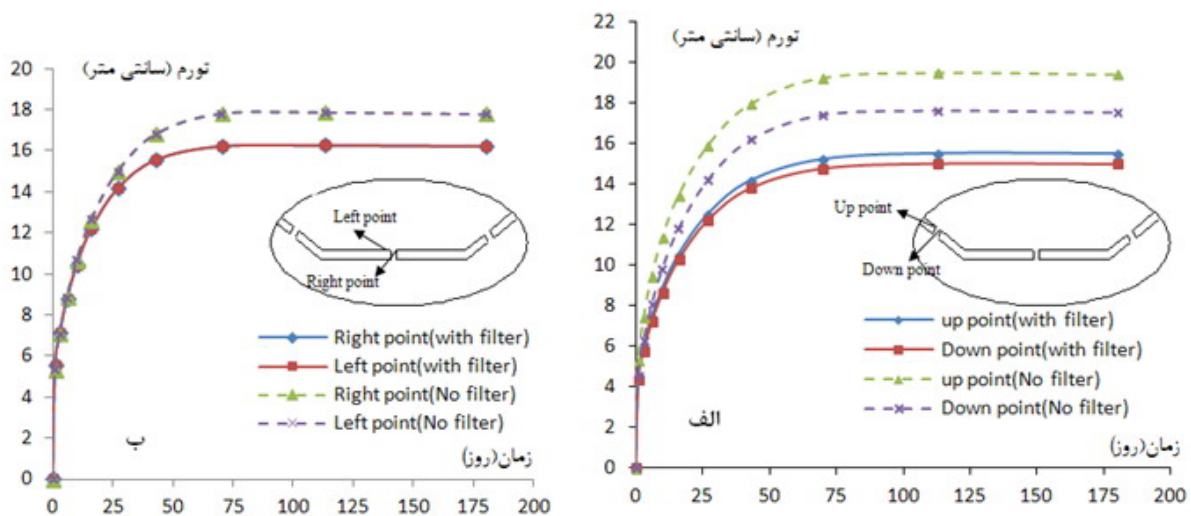
شکل ۱۳- جابجایی قائم (تورم) ایجاد شده در مقطع کانال با در نظر گرفتن لایه فیلتر

که این نتیجه منطبق بر اندازه گیری های صحرائی می باشد. لذا مشاهده می شود که با اجرای یک لایه فیلتر به ضخامت ۳۰ سانتی متر در زیر بتن مگر می توان توزیع تنش ها در زیر لاینینگ را یکنواخت تر نموده و مانع ایجاد اختلاف جابجایی در دو طرف درز شد در اثر ممانعت از وقوع این پدیده از فشار پانل ها به همدیگر کاسته شده و از خرد شدن لاینینگ در محل درزها جلوگیری می گردد. تأثیر اجرای فیلتر برای جلوگیری از وقوع این پدیده در مشاهدات صحرائی عیناً دیده شده و انطباق رضایت بخشی بین نتایج صحرائی و مدل سازی عددی مشاهده می گردد.

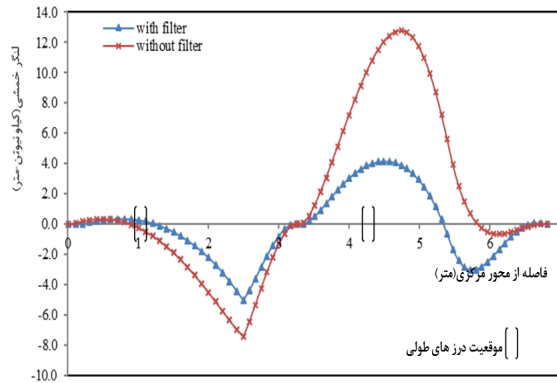
در شکل (۱۴-الف) تغییرات جابجایی قائم ایجاد شده در دو طرف درزهایی اجرایی دیواره کانال نسبت به زمان در دو حالت با در نظر گرفتن فیلتر و بدون فیلتر جهت مقایسه به صورت یکجا ارائه شده است. به نظر می رسد با اضافه کردن یک لایه فیلتر علاوه بر این که از ایجاد اختلاف نسبی جابجایی پانل ها در دو طرف درز دیواره به شدت کاسته می شود، میزان تورم کلی بستر نیز کاهش می یابد. این امر می تواند ناشی از وزن فیلتر باشد که به عنوان یک سربار عمل کرده و در مقابل فشار تورمی خاک مقابله می کند با مقایسه نمودارها مشاهده می شود که با اجرای فیلتر حدوداً ۳۰ میلی متر از میزان تورم کلی بستر کاسته شده که با آنچه در واقعیت دیده شده هماهنگ می باشد.

در شکل (۱۴-ب) نیز تغییرات تورم ایجاد شده در دو طرف درزهایی اجرایی کف کانال نسبت به زمان در دو حالت با در نظر گرفتن یک لایه فیلتر و بدون فیلتر به صورت نمودار ارائه شده است.

مطابق شکل (۱۲) نتایج محاسبات عددی در حالتی که از لایه فیلتر استفاده نشده است نشان می دهد که خاک متورم شونده غیر اشباع بستر در اثر تغییر شرایط رطوبتی، حداکثر به اندازه ۱۹۲/۴ میلی متر متورم شده و این پدیده باعث ایجاد اختلاف نسبی جابجایی در پانل های لاینینگ گردیده است. مطابق محاسبات انجام شده بیشترین مقدار این جابجایی نسبی در این شرایط برابر ۱۸/۷ میلی متر می باشد که در محل درز اجرایی در دیواره کانال روی داده است. این پدیده به صورت بالازدگی نسبی پانل های لاینینگ در محل درز، در عمل هم اتفاق افتاده که در مشاهدات صحرائی نیز گزارش شده است. در عمل مقدار این بالازدگی پانل ها در محل درز در روی دیواره همان طور که در متن مقاله نیز اشاره شده است از چند تا ۳۰ میلی متر ثبت گردیده که این رفتار به روش عددی نیز حاصل شده است اختلاف مقادیر عددی جابجایی نسبی حاصل از دو روش را می توان به دقت نتایج آزمایش که در پارامترهای ورودی نرم افزار تأثیرگذار هستند نسبت داد. در کف کانال با وجود تعبیه درز اجرایی، اختلاف جابجایی به وجود آمده در دو طرف درز مطابق تحلیل های انجام شده در این حالت بسیار ناچیز به دست آمد که مطابق مشاهدات صحرائی این نتیجه منطبق بر واقعیت می باشد. با در نظر گرفتن فیلتر در زیر لایه بتن مگر تمامی تحلیل ها مجدداً انجام گردید. نتایج تحلیل ها حاکی از آن است که با ملحوظ کردن لایه فیلتر حداکثر میزان تورم بستر به ۱۶۲/۳ میلی متر کاهش یافته است و اختلاف نسبی جابجایی پانل های لاینینگ در دو طرف درز نیز به ۵ میلی متر رسیده است



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات جابجایی قائم درزهایی اجرایی با زمان در دو حالت با در نظر گرفتن فیلتر و بدون فیلتر (الف) دیواره کانال، (ب) کف کانال



شکل ۱۵- مقایسه توزیع لنگر خمشی ایجاد شده در طول لاینینگ در دو حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن فیلتر

با مراجعه به شکل (۱۵) مشاهده می شود که در حالتی که لایه فیلتر در زیر لاینینگ منظور نشده مقادیر لنگر ایجاد شده در لاینینگ در حوالی گوشه کانال و در طول نسبتاً زیادی از دیواره کانال بیشتر از مقدار لنگر ترک خوردگی می باشد و در این طول لاینینگ ترک خواهد خورد. بنابر این چنین می توان نتیجه گیری نمود که با قرار دادن یک دسته درز در دیواره نمی توان به طور کامل از وقوع ترک خوردگی در لاینینگ پیشگیری نمود. همان طور که از شکل (۱۵) دیده می شود در محدوده کف کانال تا حوالی گوشه مقادیر لنگرها کم بوده و احتمال ترک خوردگی وجود ندارد. این نتیجه دقیقاً در مشاهدات صحرائی نیز ثبت گردیده است. با مراجعه به شکل (۱۵) موقعیت بحرانی دیگر در مقطع کانال در حوالی x (فاصله از محور تقارن کانال) برابر با $4/7$ متر قرار دارد. در این حوالی نیز لنگر به بیشترین مقدار خود رسیده است. به نظر می رسد چون لاینینگ در قسمت فوقانی مقطع مانند یک تیر دو سر مفصل عمل می کند، لذا مقدار لنگر ماکزیمم در حوالی مرکز تیر ایجاد می گردد. بنابر این به حداکثر رسیدن مقدار لنگر در این موقعیت می تواند ناشی از این پدیده باشد. با مراجعه به نتایج حاصل مشاهده می شود که قرار دادن یک لایه فیلتر از مقادیر لنگرهای خمشی به شدت کاسته است که این پدیده به علت کاهش نیروی اندرکنشی بین خاک متورم شونده بستر و لاینینگ در اثر اجرای فیلتر می باشد. اجرای فیلتر منجر به توزیع مجدد نیروهای تورمی خاک بستر گردیده و به عنوان یک عامل بازدارنده مانع ایجاد نیروهای اضافی در مرز بین خاک و لاینینگ می گردد. همان طور که از این نمودار نیز استنباط می شود، اجرای فیلتر منجر می شود که مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در اکثر

با مراجعه به نمودار چنین مشاهده می شود که اختلاف نسبی به وجود آمده در دو طرف درز در کف کانال در هر دو حالت با در نظر گرفتن یک لایه فیلتر و بدون فیلتر بسیار ناچیز می باشد که در مشاهدات و بررسی های صحرائی نیز این مطلب اثبات گردیده است و در عمل هیچ بالآمدگی نسبی پانل ها در کف کانال مشاهده نگردید. در این نمودار نیز کاهش حدود ۳۰ میلی متر میزان تورم کلی بستر که در اثر اجرای لایه فیلتر بوجود آمده ملاحظه می گردد.

در شکل (۱۵) مقادیر لنگرهای خمشی ایجاد شده در لاینینگ در اثر تورم خاک در هر دو حالت تحلیل به صورت یکجا آورده شده است. در این نمودار محور قائم مقادیر لنگر ایجاد شده و محور افقی موقعیت هر نقطه از لاینینگ را نسبت به محور تقارن کانال نشان می دهد. با مراجعه به شکل های (۹) و (۱۱) می توان مفهوم مقادیر x را به روشنی دریافت. همان طور که از شکل (۱۵) قابل استنباط می باشد، بیشترین مقادیر لنگر در تمامی حالتها در گوشه پایین کانال یعنی در محل برخورد دیواره به کف کانال و هم چنین در موقعیت وسط ارتفاع کانال بین محل درز دیواره و تاج کانال ایجاد شده است.

بیشترین مقدار لنگری که بتن قبل از ترک خوردگی می تواند تحمل کند مطابق آیین نامه ACI از رابطه (۱۹) قابل محاسبه می باشد.

$$M_{cr} = \frac{f_r I}{h/2} \quad (19)$$

در این رابطه I و h به ترتیب مقادیر ممان اینرسی و ارتفاع مقطع بوده و f_r مقدار تنش ترک خوردگی بتن بوده و از رابطه (۲۰) قابل محاسبه می باشد.

$$f_r = 2\sqrt{f_c} \quad (20)$$

در این رابطه f_c مقاومت مشخصه بتن می باشد. با جاگذاری مقادیر متناسب با بتن رویه کانال دشت تبریز در روابط فوق مقدار لنگر ترک خوردگی بتن برابر $4/0.8$ کیلونیوتن-متر به دست می آید بنابر این این عدد به عنوان مرزی برای شروع ترک خوردگی می تواند محسوب گردد. از آنجا که درز تعبیه شده در طول دیواره به عنوان مفصل عمل می کنند، لذا مقادیر لنگر در این محلها صفر بوده و به عنوان یک پارامتر اساسی در کنترل ترک خوردگی دیواره محسوب می شوند.

- به کمک نرم‌افزار مبتنی بر المان محدود SIGMA/W می‌توان رفتار خاک‌های متورم شونده غیراشباع را در اثر تغییر شرایط با دقت مناسبی مدل‌سازی نمود.
- استفاده از مدل ارائه شده توسط Hung و Vu [۹] برای پیش‌بینی رفتار خاک متورم شونده غیراشباع منجر به نتایج قابل قبولی می‌شود.
- نتایج محاسبات عددی و مشاهدات صحرایی انطباق رضایت بخشی را از نظر پیش‌بینی محل بالازدگی پانل‌های لاینینگ، میزان بالازدگی پانل‌ها نسبت به هم و اثر فیلتر در هر یک از این پدیده‌ها نشان می‌دهند.
- مطابق نتایج حاصله محل برخورد دیواره به کف کانال، گوشه فوقانی دیواره کانال و هم چنین نقطه تلاقی خط تراز آب با دیواره و طول میانی لاینینگ به عنوان محل‌های تمرکز لنگر در مقطع کانال محسوب می‌شوند.
- درزها در دیواره و کف کانال مانند یک مفصل عمل کرده و میزان لنگرهای خمشی ایجاد شده در این نقاط که در اثر تورم بستر ایجاد شده برابر صفر می‌باشد.
- از آن‌جا که محل درز تأثیر بسزایی در میزان لنگر خمشی ایجاد شده دارد، لذا بهینه کردن محل درزها در طول مقطع کانال به عنوان راهکار دیگری است که به کمک آن می‌توان آسیب دیدگی رویه‌های بتنی کانال‌های ساخته شده بر روی بسترهای متورم شونده را کاهش داد.

۴- قدردانی

این کار تحقیقی بدون حمایت شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی قابل انجام نبوده است. مؤلفان بر خود لازم می‌دانند از همکاری این مجموعه قدردانی نمایند.

۴- مراجع

- [1] Rahimi, H., Abbasi, N., "Failure of Concrete Canal Lining on Fine Sandy Soils: A Case Study for the Saveh Project", *Irrigation and Drainage*, 2008, 57, 83-92.
- [2] Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., "A Constitutive Model for Partially Saturated Soils", *Géotechnique*, 1990, 40, 3, 405-430.
- [3] Gens, A., "Shear Strength in Unsaturated Soils: Recent Developments and Applications", *Barcelona*, 1993, pp 1-13.
- [4] Fredlund, D. G., Rahardjo, H., "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", *John Wiley & Son*, 1993.

قسمت‌های طولی کانال به کمتر از مقدار مرزی لنگر محاسبه شده یعنی ۴/۰۸ کیلونیوتن-متر برسد. لذا احتمال ایجاد ترک خوردگی در طول کانال کمتر می‌شود. این تأثیر فیلتر در کاهش میزان ترک خوردگی لاینینگ به طور عینی در مشاهدات و بررسی‌های صحرایی ملاحظه گردید. نکته دیگری که در این نمودار لازم به توضیح است مقادیر مثبت و منفی لنگر خمشی می‌باشد. در واقع این علائم مربوط به لنگر، جهت تغییر شکل رویه بتنی را در طول مقطع کانال در شرایط مختلف مشخص می‌سازد و همان‌طور که در شکل (۱۵) نیز دیده می‌شود، محل درزها به عنوان نقطه عطف منحنی‌ها بوده و جهت لنگر در این نقاط تغییر می‌کند.

بنابراین با توجه به همه توضیحات ارائه شده می‌توان به این نتیجه کلی رسید که با کمک مدل‌سازی‌های عددی و به کارگیری اصول ژئوتکنیکی مناسب در انتخاب مدل رفتاری مخصوص خاک‌های غیر اشباع و به کمک تئوری‌های پیشرفته مکانیک خاک می‌توان تا حد رضایت‌بخشی احتمال پدیده‌هایی نظیر ترک خوردگی و محل وقوع آن را در طول مقطع کانال پیش‌بینی نموده و قبل از احداث کانال بر روی این‌گونه خاک‌های مسأله‌دار با به کاربردن راهکارهایی احتمال خسارات وارده را به حداقل ممکن رساند. همان‌طور که قبلاً در متن این مقاله هم اشاره شد تا به امروز طراحی شبکه‌های آبیاری بر اساس اصول هیدرولیکی انجام می‌شد که در بعضی مواقع به علت عدم توجه به ساختارهای ژئوتکنیکی بستر مشکلات عدیده‌ای به وجود می‌آمد. ولی همان‌طور که در این مقاله نیز اثبات شد به راحتی به کمک روش‌های عددی و انتخاب مدل رفتاری مناسب با وضعیت خاک می‌توان رفتار خاک را در اندرکنش با لاینینگ در اثر تغییر شرایط رطوبتی پیش‌بینی نمود. علاوه بر استفاده از یک لایه فیلتر که در متن این مقاله تأثیر اجرای آن مورد بررسی قرار گرفت به کمک بهینه کردن تعداد و محل درزها در طول مقطع کانال و یا تغییر در شیب دیواره کانال نیز می‌توان نیروهای اندرکنشی بین خاک متورم شونده غیراشباع بستر و لاینینگ بتنی را کنترل نمود.

۳-۳- نتیجه‌گیری کلی

- اجرای یک لایه فیلتر در زیر بتن لاینینگ در خاک‌های متورم شونده منجر به کاهش نسبی تورم کلی بستر شده و می‌تواند به عنوان یک راهکار برای کاهش ترک خوردگی رویه بتنی کانال پیشنهاد گردد.

- ارائه راهکار اصلاحی"، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، ۱۳۸۸، ۲ (۱ و ۲)، ۸۳-۹۸.
- [11] Seed, H. B., Woodward, R. J., Lundgren, R., "Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays", ASCE Journal of S.M.F. Division, 1962, 88, (SM3), 53-87.
- [12] Van Der Merwe, D. H., "The Prediction of Heave from the Plasticity Index and Percentage Clay Fraction of Soils", Civil Engineer in South Africa, 1964, 6, 103-106.
- [13] GEO-SLOPE International Ltd, "Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2007", Third Edition, Calgary, Alberta, Canada, 2008.
- [14] Fredlund, D. G., Xing, A., "Equations for the Soil-Water Characteristics Curve", Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31 (4), 521-532.
- [5] Vu, H. Q., Fredlund, D. G., "The Prediction of One-, Two-, and Three-Dimensional Heave in Expansive Soils", Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41, 713-737.
- [6] Matayas, E. L., Radhakrishna, H. S., "Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils", Géotechnique, 1968, 18 (4), 432-448.
- [7] Pham, Q. H., Fredlund, D. G., Padilla, J. M., "Use of the GCTS Apparatus for Measurement of Soil-Water Characteristic Curve", The 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec City, 24-27 October, 2004, pp 1-6.
- [8] Fredlund, D. G., " The 1999 R. M. Hardy Lecture: The Implementation of Unsaturated Soil Mechanics into Geotechnical engineering", Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (5), 963-986.
- [9] Hung, Q., Vu Fredlund, D. G., "Challenges to Modelling Heave to Expansive Soils", Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43 (12), 1240-1272.
- [۱۰] حاجی علیلو، م.، بهروزسرنند، ف.، چشم دوست، م.، "اثر تورم خاک بستر بر کانال‌های انتقال آب دشت تبریز و

EXTENDED ABSTRACT

Numerical Modeling of Concrete Lining Uplift in Tabriz Plain Canal

Fariba Behrouz Sarand^{a,*}, Masoud Hajjalilue Bonab^b, Ali Pak^c

^a Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz 331811111, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

^c Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran 1136511155, Iran

Received: 25 September 2012; **Accepted:** 17 April 2013

Keywords:

Concrete lining, Canal, Expansive soils, Filter, Numerical modeling

1. Introduction

Unreinforced concrete canals are one type of sensitive and important water conveyance structures. Whereas these structures are inevitably constructed on different types of soils, investigation of geotechnical issues related to the interaction of soil and concrete lining is important for reducing damages to the canals. These damages in the hydraulic canals are observed in the forms of cracking in the concrete lining and their large displacement.

Due to numerous cases observed in Iran, construction of irrigation canals on the problematic soil has led to serious damage to the structure of canals and finally losses a lot of costs. One of the most common types of problematic soils is expansive soils. Every year many of new structure are constructed on the swelling soils, over 60% of these structures suffered minor damages such as cracking and approximately 10% of these structures are heavily damaged that cannot be repaired.

In a comprehensive definition, expansive soils are referred to the soils which have the potential of swelling and shrinkage and show significant volumetric changes and eventually lead to serious damages to different structures, especially light structures. These damages in the hydraulic canals are observed in the forms of cracking in the concrete lining and their tuck. Over time and with the occurring of melting and freezing cycles, lining fine micro cracks are become larger and provide a situation for water penetration and plant growth then these factors eventually lead to changes of hydraulic canal characteristics and finally its destruction. Since the repair and rehabilitation of damaged structures impose huge costs on project, doing research for understanding the mechanism of interaction between the soil and canal lining seems necessary.

Therefore, by considering the presented introduction, construction of canals on problematic soils such as expansive soils is inevitable and appropriate procedures should be followed to reduce the damages.

For this purpose, in this study the section of trapezoidal canal with real dimensions has been modeled by Geo-Studio (2007) software and interaction of the soil-concrete lining and the effect of considering filter layer under canal have been studied in the impounding conditions and finally the result of numerical analyses have been compared to in-situ observations.

Since the soil of canal bed is in the unsaturated condition and has a swelling potential, firstly it is necessary to mention the background of previous studies for numerical modeling of unsaturated soil behavior and efforts have been done by researchers to implementation presented theories

2. Methodology

The behavior of an unsaturated expansive soil can be formulated using the theory of unsaturated soils, using two independent stress variables, the constitutive relationships for the soil structure and water phase, and flow laws for the water phase [1-4]. The two stress state variables are net normal stress, $(\sigma - u_a)$, and matric suction $(u_a - u_w)$, where σ is total normal stress, u_a is pore-air pressure, and u_w is pore-water pressure. Changes in the void ratio and degree of

* Corresponding Author

E-mail addresses: fsarand@sut.ac.ir (Fariba Behrouz Sarand), hajjalilue@tabrizu.ac.ir (Masoud Hajjalilue Bonab), pak@sharifu.ac.ir (Ali Pak).

saturation of an unsaturated soil can be expressed as functions of the stress state variables to form two three-dimensional constitutive surface [5].

Approximate volume change (and water content) coefficients should be adequate for most engineering analyses. Procedures for the approximation of the volume change coefficients assist in the implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering practice.

The primary interactive processes involved with a volume change analysis of an unsaturated expansive soil are stress deformation and water flow. The stress-deformation process is governed by static equilibrium, while the water flow is governed by water continuity equation. Solutions for volume change require that both the equilibrium equation and the continuity equation be solved. The solutions can be obtained using either a coupled or an uncoupled approach.

As mentioned, the behavioral models of unsaturated soils are complex. In addition a large number of parameters required for analysis and there are many problems related to measuring or calculating the values of these input parameters. Because of that, these behavioral models are rarely used by geotechnical engineers.

According to the conducted surveys, these behavioral models are not applied to common software of geotechnical engineering. Therefore, some geotechnical engineers have wrongly assumed these kinds of soils as a saturated soil and used the related behavioral models such Cam-Clay or Modify Cam-Clay.

In recent years, many attempts have been made by researchers to apply behavioral models of unsaturated soils and using these models in geotechnical engineering softwares.

For applying these models, simplifying assumptions are made but these should not undermine the accuracy of the results.

Based on the review of the available technical resources, the behavioral models of unsaturated soils are applied only to the two pieces of geotechnical engineering software so far which are Plaxis2D 2010 and GeoStudio 2007.

In this research, GeoStudio 2007 software package is used for modeling. The basis of this software for modeling of unsaturated expansive soils is the behavioral model and presented equations by Vu and Fredlund [4].

For verifying the accuracy of the results, presented example by these researchers was modeled by the software and the proposed behavioral model for unsaturated soils was assigned to it. By comparing the results, accuracy and precision of the software can be realized and the software gives a close agreement between the results by application of both coupled and uncoupled analysis methods, which has been previously described.

It should be noted that the input parameters of the software and the solution of the equations are simplified as much as possible toward the method of Vu and Fredlund to be applicable for geotechnical engineers. Thus, SIGMA/W software can be used to estimate the amount of swelling with appropriate accuracy in unsaturated expansive soils that are affected by changes in wetting conditions and consequently caused negative pore pressures.

SIGMA/W, which is in the GeoStudio software package, is based on the finite element method for stress-deformation analysis of earth structures. Its comprehensive formulation makes it possible to solve any kind of simple and complex problem. For instance, by using this software, both simple linear-elastic deformation analysis and complicated effective-stress analysis based on non-linear elastoplastic behavior can be conducted. When this software is used together with other products of GeoStudio package, changes in pore pressure and its distribution in soil mass due to the external loading can be computed by using coupled and uncoupled formulation. In addition, SIGMA/W can be used for modeling of soil interaction with beam or bar elements.

In this study Tabriz Plain Canal is selected as a case study. The irrigation and drainage network of Tabriz plain is under construction in six regions and 40000 hectares in the northwestern part of Iran. The length of the main canal is 29 km, the width of floor is between 2.5 to 5.0 m, and its height is between 2 to 2.75 m. The slope of canal walls is 1 (vertical) to 1.5 (horizontal). The canal lining is made of unreinforced concrete. In the construction phase of first 10 km, due to a heavy rain and flooding, a part of canal was filled with water. After the water was emptied out, cracks and heave were observed in some parts of the canals. In order to investigate this phenomenon, an undisturbed soil specimen was obtained from heaved zone and a free swelling test was performed.

3. Results and discussion

The results of laboratory tests show that the surface soils of Tabriz plain are composed of silt and clay. In this research, standard methods are used to predict swelling potential of these soils.

Generally there are two indirect methods for anticipating the swelling potential in references, Seed et al. method (1962) [6] and Van der Merve method (1964) [7]. The result show that the swelling potential of soil samples vary from low to high and the result of free swelling test show that the free swell height and the swelling pressure of undisturbed sample are about %5.4 and 40 kPa respectively. These values show that the soil heave should be considered in lightweight structure designing such as Tabriz plain canal.

As observed in in-situ investigation, the swelling phenomenon has led to cracking and relative displacement of canal panels in joint locations from few to 30 mm. To prevent the occurrence of this phenomenon, using a filter layer with 30 cm thickness was proposed in this project.

Application of filter layer doesn't have direct effect on soil heave but the properties of filter material lead to reduce the swelling potential. The filter is composed of granular material so it can uniformly transfer the local pressure of canal bed soils to lining and lead to reduce the relative displacement of adjacent panels. Another parameter is the weight of filter layer. This layer applies about 5 kPa additional pressure to expansive canal bed soil although this pressure isn't more than the swelling pressure but it can compensate that amount of swelling pressure.

This proposed method was tentatively performed in 50 m length of real canal. For evaluation the efficiency of this method, surveying points were observed on canal section and displacement of these points were measured.

The in-situ surveying records showed that the performance of filter layer led to reducing the swelling potential and the relative displacement of panels decreased from 30mm to 5 mm.

As mentioned before, in this research the actual dimensions of the under construction water canal of the irrigation and drainage network of Tabriz plain, which is located on the expansive soils, is used for numerical modeling. Three series of joint are considered in canal section, two joints in canal walls in the level of 0.5 meter from floor and one joint in canal floor. As a real condition for modeling of joint, two centimeter space is vertically considered in lining surface.

For the simulation of the initial conditions (local conditions), it has been assumed that the canal bed soil is somewhat dried and a constant suction is established in the soil. For modeling the infiltration into the soil, water level inside the canal is applied as a water head to the lining elements. The lining has been modeled by beam elements. Generally, it is assumed that in the initial conditions, a suction equal to 200 kPa was available in the environment.

In the first step of analysis, the initial in-situ stress conditions are applied to the model and primary balance is obtained. In this step linear elastic behavior is considered for the soil and concrete lining and the environmental suction of -200 kPa is considered in the computation.

For analysis of heave coupled case, the soil behavior is considered elastoplastic and the proposed model by Vu and Fredlund [4] is used to predict the behavior of unsaturated expansive soils. This should be considered that all equations used in the computations and the mechanism of soil behavior are functions of time.

Since the aim of the presented research is to study the soil-lining interaction behavior in various moisture conditions and also the effect of implementation of filter layer to control the swelling of canal bed soil by using site investigation and numerical methods and comparing the results of two methods, two types of analyses are done in this research. In the first case, the filter layer has not been considered under the lining and calculations have been performed and in other case, the filter layer has been considered and all calculations have been repeated. In any of cases, the water level in the canal is assumed as constant and 2 meter above the floor.

4. Conclusions

The results of numerical analyses and in-situ observations have acceptable consistent in prediction of the deformation shape of panels, the values of displacement and the effect of filter layer on these phenomenon. The use of a filter layer under the concrete lining leads to the relative reduction of general heave in unsaturated expansive bed soil and also prevents the lining cracking.

The intersection point of the canal wall with floor, the upper corner of the canal wall and middle point of lining length are considered as the locations of concentration of internal forces in the canal section. The joints along the wall act as a hinge, the values of moment in these points are zero and they have a functional role to control the cracking in the canal wall. The optimization of the location of joints and the modification of the geometric properties of canal section are others ways to reduce the lining damages in canals which are constructed on expansive soils.

5. References

- [1] Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., "A Constitutive Model for Partially Saturated Soils", *Géotechnique*, 1990, 40, 3, 405-430.
- [2] Gens, A.; "Shear Strength in Unsaturated soils: Recent Developments and Applications", Barcelona, 1993, pp 1-13.
- [3] Fredlund, D. G., Rahardjo, H., "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Son, 1993.
- [4] Vu, H. Q., Fredlund, D. G., "The Prediction of One-, Two-, and Three-Dimensional Heave in Expansive Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41, 713-737.
- [5] Matayas, E. L., Radhakrishna, H. S., "Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils", *Géotechnique*, 1968, 18 (4), 432-448.
- [6] Seed, H. B., Woodward, R. J., Lundgren, R., "Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays", *ASCE Journal of S.M.F. Division*, 1962, 88 (SM3), 53-87.
- [7] Van Der Merwe, D. H., "The Prediction of Heave from the Plasticity Index and Percentage Clay Fraction of Soils", *Civil Engineer in South Africa*, 1964, 6, 103-106.