

بررسی فرآیند تحکیم وزنی خاک‌های خیلی نرم با مدل‌سازی عددی

علی باک (دانشیار)

سوده صمیمی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

مدل‌سازی عددی تحکیم لایه‌های خاک خیلی نرم تحت اثر وزن، که در تحلیل تحکیم مواد حاصل از لایروبی و تحکیم مواد تخلیه شده در پشت سدهای باطله کاربرد دارد، طی چند دهه اخیر مورد توجه خاص قرار گرفته است.

در این مقاله با در نظر گرفتن اثرات کرنش بزرگ و تغییرات نفوذپذیری و تراکم‌پذیری لایه‌های خاکی سست در طول تحکیم، به‌کارگیری روش حل تفاضل محدود، و استفاده از یک روش جدید برای مجزاسازی بازه مکانی در طول دوره‌های پر کردن، یک برنامه رایانه‌ی برای مدل‌سازی شرایط مختلف فرآیند تحکیم وزنی تهیه شده است. سپس از طریق مقایسه نتایج مدل با مقادیر صحرایی و نتایج برنامه‌های رایانه‌ی صحت‌سنجی شده، کارایی مدل در تحلیل مسائل واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: تحکیم وزنی، کرنش‌های بزرگ، تراکم‌پذیری، نفوذپذیری، مدل‌سازی عددی.

pak@sharif.edu
s_pg_1360@yahoo.com

مقدمه

آب و مقدار کمی خاک و مواد آلی را شامل می‌شوند و از طریق لوله‌هایی به محل‌های دفع محصور شده^۱ منتقل می‌شوند. این محل‌های دفع اساساً فضا‌های خشک و باز بزرگی هستند که با خاک‌ریزهایی محصور می‌شوند تا پس از تخلیه‌ی مصالح لایروبی شده در آنها امکان ته نشینی و تحکیم مصالح دوغابی شکل فراهم شود. مدیریت این محل‌های دفع، و تصمیم‌گیری در مورد زمان ریختن حجم جدید مصالح لایروبی شده روی مواد قبلی، مستلزم آگاهی از مدت زمانی است که طول می‌کشد تا مصالح قبلی تحکیم و نشست پیدا کنند. تحلیل روند تحکیم مواد تخلیه شده در پشت سدهای باطله در معادن^۲، و نیز تحلیل روند تحکیم وزنی و حرارتی لایه‌های رس نرم که برای دفن زائدات هسته‌ی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از جمله مسائل مهم دیگری هستند که در سال‌های اخیر در حوزه‌ی مهندسی ژئوتکنیک مطرح شده‌اند. لذا تحلیل رفتار تحکیمی خاک‌های نرم تحت اثر وزن یا تحت بارگذاری سربار، و مدل‌سازی تحکیم لایه‌های خاک نرم در زیر سطح آب تحت اثر وزن، مورد توجه خاص است.

مروری بر مطالعات انجام شده

یکی از قدیمی‌ترین و مشهورترین نظریه‌های تحکیم در سال ۱۹۲۳ برای زهکشی و تغییر شکل یک‌بعدی یک لایه خاک اشباع ارائه شد.^[۱] اگرچه این نظریه مبتنی بر فرضیات ساده‌کننده‌ی نظیر کوچک بودن کرنش‌ها، و ثابت بودن ضرایب نفوذپذیری و تراکم‌پذیری در طول تحکیم است، هنوز به‌علت سادگی محاسبه و استفاده از

هنگامی که باری بر روی یک لایه خاک اشباع اعمال می‌شود، فشار آب حفره‌ی افزایش می‌یابد. با خروج تدریجی و زهکشی آب حفره‌ی، این فشار اضافی از بین می‌رود و در نتیجه ساختار خاک در طی فرآیند تحکیم دستخوش نشست می‌شود. مقدار این نشست براساس رابطه‌ی تنش - کرنش خاک تعیین می‌شود، درحالی که نرخ جریان آب حفره‌ی و مدت زمان تحکیم به‌شدت وابسته به نفوذپذیری خاک است.

تحکیم وزنی، حالت خاصی از تحکیم معمولی (تحکیم تحت اثر بار) است، با این تفاوت که در تحکیم وزنی به‌جای آنکه اعمال بار خارجی به خاک موجب کاهش حجم آن شود، وزن خود ذرات خاک ایجاد تحکیم می‌کنند.

فرآیند تحکیم وزنی در یک محیط متخلخل در حوزه‌های مختلف مهندسی - از قبیل محیط زیست، هیدرولیک، آب‌های زیرزمینی، ژئوتکنیک، معدن و شیمی - متداول است. در مهندسی محیط زیست، درک بهتر از مکانیسم تحکیم لجن ممکن است منجر به طراحی کاراتر و اقتصادی‌تر وسایل تصفیه‌ی فاضلاب شود. در هیدرولیک، پیش‌بینی حجم رسوب ته‌نشین شده در یک مخزن در تعیین طول عمر مفید آن ضروری است. از دیگر کاربردهای این فرآیند می‌توان به استفاده از مفهوم نشست وزنی برای تولید دوغاب با یک غلظت مشخص از ذرات جامد در مهندسی معدن اشاره کرد. در مهندسی ژئوتکنیک نیز، بهبود دانش فعلی از مفهوم سازوکار ته‌نشینی و تحکیم خاک‌های نرم امری مهم است. خاک‌های نرم با چگالی و مقاومت پایین‌شان مشخص می‌شوند. مصالح به‌دست آمده از لایروبی رسوبات کف محیط‌های دریایی آلوده از جمله خاک‌های نرم هستند که حاوی مقادیر زیادی

در این معادله z محور قائم در سیستم مختصات مادی (با ضخامت ذرات جامد)، t زمان، σ' تنش موثر، k ضریب نفوذپذیری، و ρ_s و ρ_f به ترتیب جرم واحد حجم دانه‌های جامد خاک و سیال حفره‌ی هستند.

روابط تراکم‌پذیری و نفوذپذیری

به منظور حل معادله‌ی ۱ علاوه بر شرایط مرزی مناسب، مشخص شدن روابط نسبت تخلخل - تنش موثر و ضریب نفوذپذیری - نسبت تخلخل نیز ضروری است. این روابط توسط توابع ریاضی که رفتار مشاهده شده را تقریب می‌زنند، مدل می‌شوند. فرم‌های مختلفی از این توابع (از مقادیر ثابت گرفته تا توابع لگاریتمی، نمایی و توانی) برای این دو دسته رابطه پیشنهاد، و به کار گرفته شده است: [۱۳، ۱۲، ۹]

$$\sigma' = A - \alpha e, \quad k = \rho_f k_0 (\lambda + e) \quad (2)$$

$$e = A(\sigma')^B, \quad k = E \frac{e^F}{\lambda + e} \quad (3)$$

$$e = e_0 - C_e \log\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'}\right), \quad e = e_0 - C_k \log\left(\frac{k_0}{k}\right) \quad (4)$$

اما چنان که محققین نشان داده‌اند [۱۶-۱۴]، براساس شواهد آزمایشگاهی فرم تابع توانی، فرمی مناسب برای مدل‌سازی رابطه بین ضریب نفوذپذیری و نسبت تخلخل است و به خوبی تغییرات نفوذپذیری برای خاک‌های نرم را توصیف می‌کند. در سال ۱۹۹۱ نیز یک مدل توانی توسعه یافته برای رابطه‌ی تراکم‌پذیری خاک‌ها پیشنهاد شد که برطرف‌کننده‌ی معایب عمده‌ی مدل‌های لگاریتمی - خطی و توانی مرسوم است [۱۷]. یعنی نسبت تخلخل به خوبی در تنش مؤثر صفر، قابل تعریف است و مستقل از مقدار تنش، نسبت تخلخل هیچگاه منفی نمی‌شود. همچنین این مدل به‌عبارت مدل‌سازی رفتار یک‌بعدی خاک‌های نرم قادر است رفتار خاک‌های عادی تحکیم یافته و پیش تحکیم یافته را با یک تابع پیوسته، و فقط با استفاده از یک مجموعه از پارامترها مدل کند. لذا در این تحقیق برای رابطه بین نسبت تخلخل و تنش مؤثر از تابع توانی توسعه یافته‌ی پیشنهادی در سال ۱۹۹۱، و برای رابطه بین ضریب نفوذپذیری و نسبت تخلخل از فرم توانی ارائه شده در سال ۱۹۷۹، استفاده شده است [۱۷، ۱۴].

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (5)$$

$$k = C e^D \quad (6)$$

در روابط فوق Z, D, C, B, A پارامترهای مصالح‌اند که به صورت تجربی در آزمایشگاه حاصل می‌شوند. لازم به ذکر است که B عددی منفی ولی معمولاً بزرگ‌تر از -0.5 و D بزرگ‌تر از 2 می‌باشد [۱۸]. به علاوه، در رابطه‌ی تراکم‌پذیری، در مواردی که $Z = 0$ به منظور جلوگیری از بی نهایت شدن نسبت تخلخل به ازای تنش مؤثر صفر، Z برابر $Z = \left(\frac{e_0}{A}\right)^{\frac{1}{B}}$ یعنی مقدار تنش مؤثر نظیر نسبت تخلخل اولیه (e_0) ، قرار داده می‌شود.

روش حل عددی

برای حل عددی معادله‌ی ۱ از یک روش تفاضل محدود^۷ استفاده شده است. اساس روش‌های تفاضل محدود، جایگزین کردن جملات مربوط به مشتقات جزئی با معادلات جبری به صورت تفاضلی است. روش‌های مختلفی نیز برای انجام این عمل پیشنهاد شده است که در این تحقیق به دلیل ارائه‌ی جواب‌های دقیق‌تر، برای

متغیرهایی که به راحتی قابل اندازه‌گیری هستند، به عنوان یک نظریه‌ی مینا در بسیاری از مسائل طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما با توجه به پیچیدگی روند تحکیم وزنی لایه‌های خاکی سست در زیر تراز آب، نظریه‌ی تحکیم ارائه شده در سال ۱۹۲۳ برای تحلیل فرآیند تحکیم در آنها معتبر نیست. این پیچیدگی از چند عامل نشأت می‌گیرد: نخست آن که به علت اسکلت به شدت تراکم‌پذیر خاک‌های نرم، در طول تحکیم وزنی شاهد تغییر شکل‌های بزرگ^۳ هستیم. دوم آن که متغیر بودن بار وارده با زمان موجب می‌شود نقاط مختلف خاک در عمق تحت اثر تنش‌های مختلفی قرار بگیرند؛ این تنش‌ها ممکن است به علت تراکم تدریجی ناشی از تحکیم در طول زمان تغییر کنند. سوم آن که شاهد تغییر قابل توجه پارامترهای موثر بر حل مسئله در طول تحکیم هستیم؛ برای مثال نفوذپذیری خاک (k) ، تخلخل (e) و شاخص تغییر حجم (m_v) در طول تحکیم تغییرات زیادی می‌یابند که در نظر گرفتن این تغییرات به غیرخطی شدن معادله‌ی دیفرانسیلی حاکم بر پدیده منجر می‌شود.

عده‌ی زیادی از محققین سعی کرده‌اند با در نظر گرفتن تغییرات نفوذپذیری و تراکم‌پذیری در طول تحکیم، نظریه‌ی تحکیم کلاسیک ارائه شده در سال ۱۹۲۳ را گسترش دهند [۲-۶]، اگرچه مطالعات آنان همگی بر مبنای نظریه‌ی کرنش‌های کوچک استوار بوده‌اند. در سال ۱۹۶۷ با برداشتن محدودیت کرنش‌های کوچک و نیز در نظر گرفتن تغییرات تراکم‌پذیری و نفوذپذیری در طول تحکیم، یک معادله‌ی تحکیم کرنش بزرگ برای تحکیم یک‌بعدی رس‌های اشباع ارائه شد [۷]. سپس محققین دیگری با انجام برخی اصلاحات به حل و توسعه‌ی این معادله پرداختند. مثلاً در سال ۱۹۷۶ وضعیت تنش آزاد^۴ خاک را به عنوان حالتی مرجع برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در طول تحکیم در نظر گرفتند [۸]. در سال ۱۹۸۱، با در نظر گرفتن رابطه‌ی خطی بین نفوذپذیری - نسبت تخلخل و ثابت در نظر گرفتن ضریب تحکیم تعریف شده در سال ۱۹۶۷ [۷]، معادله‌ی ارائه شده را به صورت تحلیلی حل کردند [۹]. در سال ۱۹۹۲ با وارد کردن تنش غوطه‌وری^۵ در معادله‌ی مذکور با متغیر وابسته فشار آب حفره‌ی اضافی، توانستند توالی بین دوره‌های پرکردن و تحکیم ساکن^۶ را مدل کنند [۱۰]. در سال ۲۰۰۴ نیز با فرض ثابت بودن ضریب تراکم‌پذیری در طول تحکیم، معادله‌ی ارائه شده در سال ۱۹۶۷ را از طریق متغیر وابسته‌ی فشار آب حفره‌ی اضافی به صورت تحلیلی حل کردند [۱۱].

در نوشتار حاضر ابتدا معادله‌ی حاکم بر مسئله‌ی تحکیم وزنی خاک‌های نرم، و روش عددی به کار گرفته شده برای حل آن بیان می‌شود. سپس به منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل، یک مثال تحکیم وزنی واقعی تحلیل می‌شود. در ادامه، قابلیت‌های دیگر مدل در زمینه‌ی مدل‌سازی شرایط مختلف فرآیند تحکیم وزنی بیان خواهد شد.

ملاحظات تئوری

معادله‌ی دیفرانسیلی حاکم بر مسئله

چنان که بیان شد، در معادله‌ی ارائه شده در سال ۱۹۶۷ برای تحکیم یک‌بعدی، علاوه بر در نظر گرفتن اثر وزن - که برای تحکیم خاک‌های خیلی نرم مهم است - اثرات کرنش بزرگ و تغییرات ضرایب تراکم‌پذیری و نفوذپذیری در طول تحکیم نیز لحاظ شده است [۷]. در تحقیق حاضر این معادله با متغیر وابسته‌ی نسبت تخلخل (e) ، به منظور مدل‌سازی فرآیند تحکیم وزنی مورد استفاده قرار گرفته است [۷].

$$\left[\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right] \frac{\partial}{\partial e} \left[\frac{k(e)}{\lambda + e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\rho_f (\lambda + e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

از معادلات ۹ الف تا ۱۲ الف، رابطه‌ی موجود بین تنش مؤثر و فشار آب حفره‌یی اضافی $u = \sigma - u_h - \sigma'$ ، که در آن σ تنش کل، u_h فشار آب حفره‌یی هیدرواستاتیک و σ' تنش مؤثرند، و روابط تراکم‌پذیری و نفوذپذیری ارائه شده در معادلات ۵ و ۶، لازم است شرایط مرزی متناظر با معادله‌ی ۱ چنین بیان شوند.

$$e(z_t, t) = A(q + Z)^B \quad (ب ۹)$$

$$e(0, t) = A(\gamma_w(G_s - 1)z_t + q + Z)^B \quad (ب ۱۰)$$

$$\frac{\partial e}{\partial z}(0, t) = AB\gamma_w(1 - G_s)\left(\frac{e}{A}\right)^{\frac{B-1}{B}} \quad (ب ۱۱)$$

$$\left(\frac{e_1}{A_1}\right)^{\frac{1}{B_1}} - Z_1 = \left(\frac{e_r}{A_r}\right)^{\frac{1}{B_r}} - Z_r$$

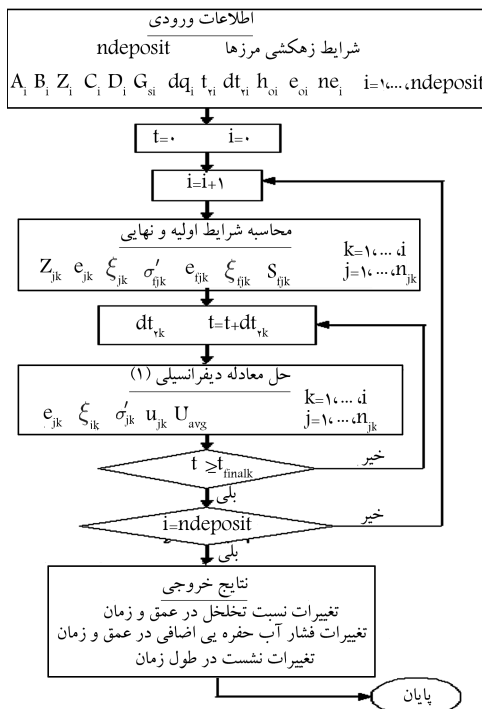
$$\frac{C_1(e_1)^{D_1}}{C_r(e_r)^{D_r}} \left[\gamma_w - \gamma_{s1} - \frac{1}{A_1 B_1} \left(\frac{e_1}{A_1}\right)^{\frac{1}{B_1}-1} \frac{\partial e_1}{\partial z} \right] = \quad (ب ۱۲)$$

$$\left[\gamma_w - \gamma_{sr} - \frac{1}{A_r B_r} \left(\frac{e_r}{A_r}\right)^{\frac{1}{B_r}-1} \frac{\partial e_r}{\partial z} \right]$$

در روابط فوق q سربار (در صورت وجود)، و γ_s وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک هستند.

برنامه‌ی رایانه‌یی

با استفاده از الگوریتم تفاضلی ۷، و شرایط مرزی ۹ ب تا ۱۲ ب، یک برنامه‌ی رایانه‌یی به منظور مدل‌سازی فرآیند تحکیم وزنی تهیه شد که نمودارگردشی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. ورودی‌های مورد نیاز این برنامه عبارت‌اند از: ۱. شرایط زهکشی در مرزها؛ ۲. تعداد لایه‌های خاک؛ ۳. پارامترهای موجود در روابط تراکم‌پذیری و نفوذپذیری (Z_i, D_i, C_i, B_i, A_i) برای هر لایه‌ی خاک؛ ۴. وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_{si}) برای هر لایه‌ی خاک؛ ۵. سربار (در صورت وجود، dq_i) برای هر لایه‌ی



شکل ۱. نمودارگردشی برنامه رایانه‌یی تهیه شده.

مجراسازی بازه مکانی از روش تفاضل پسرو^۸ استفاده شد. برای مجراسازی بازه زمانی نیز الگوی صریح^۹ به کار برده شد، به طوری که طبق این الگو مقادیر تابع در هر نقطه از یک گام زمانی مشخص با استفاده از مقادیر تابع در گام زمانی قبلی که معلوم هستند، به دست می‌آیند^{۱۱}. این روش حل منجر به الگوریتم تفاضلی زیر شد که در آن برای جلوگیری از وقوع ناپایداری عددی معمولاً لازم است با افزایش تعداد المان‌ها، گام زمانی کاهش داده شود:

$$e_j^{n+1} = \frac{\Delta t \times C}{\Delta z} \left\{ (1 - G_s) \left[\frac{D(e_j^n)^{D-1}(1+e_j^n) - (e_j^n)^D}{(1+e_j^n)^r} \right] (e_j^n - e_{j-1}^n) - \frac{(e_j^n)^{D+1/B-1} - (e_{j-1}^n)^{D+1/B-1}}{1+e_j^n} \frac{\Delta z}{1+e_{j-1}^n} \right\} + e_j^n \quad (۷)$$

در الگوریتم فوق z شماره گره، n شمارنده‌ی گام زمانی، G_s وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک، و Δt و Δz به ترتیب ابعاد شبکه در محورهای زمان و مکان هستند.

شرایط مرزی

چنان که پیش‌تر ذکر شد، برای حل معادله‌ی ۱ لازم است شرایط اولیه و مرزی مناسب نیز لحاظ شوند. با توجه به این که لایه‌ی خاک ریخته شده در ابتدا دارای چگالی اولیه‌ی یکنواخت است، بنابراین شرط اولیه‌ی معادله‌ی ۱ معادل است با:

$$e(z, 0) = e_0 \quad 0 \leq z \leq z_t \quad (۸)$$

که در آن z از کف لایه‌ی خاک به سمت بالا اندازه‌گیری می‌شود، و z_t ارتفاع کل لایه‌ی ریخته شده در سیستم مشخصات مادی است. از آنجا که سطح لایه‌ی خاک به لحاظ شرایط زهکشی آزاد است، فشار آب حفره‌یی اضافی (u) روی مرز بالایی سریعاً مستهلک می‌شود. در نتیجه:

$$u(z_t, t) = 0 \quad (الف ۹)$$

چنانچه کف لایه‌ی خاک نیز نفوذپذیر باشد، داریم:

$$u(0, t) = 0 \quad (الف ۱۰)$$

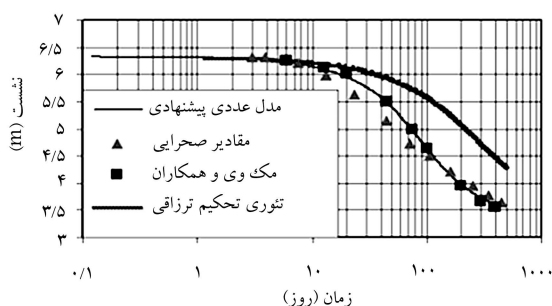
ولی روی یک کف نفوذناپذیر به دلیل عدم وجود جریان، شرط مرزی چنین خواهد بود:

$$\frac{\partial u}{\partial z}(0, t) = 0 \quad (الف ۱۱)$$

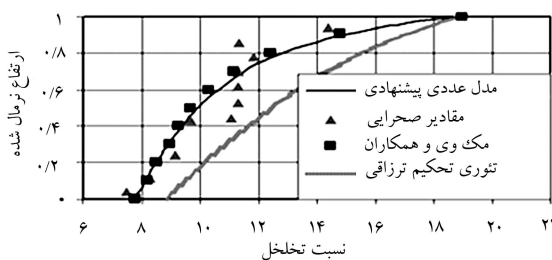
یکی از ویژگی‌های قابل توجه مدل تهیه شده، قابلیت مدل‌سازی تحکیم همزمان چند لایه‌ی خاک است. در صورت وجود بیش از یک لایه‌ی خاک، اعمال دو شرط در مرز بین هر دو لایه‌ی خاک مجاور ضروری است.

$$u_1 = u_2 \quad , \quad \frac{k_1}{1+e_1} \frac{\partial u_1}{\partial z} = \frac{k_2}{1+e_2} \frac{\partial u_2}{\partial z} \quad (الف ۱۲)$$

اما با توجه به این که متغیر وابسته‌ی معادله‌ی ۱ نسبت تخلخل است، ضروری است شرایط مرزی نیز همانند شرط اولیه برحسب نسبت تخلخل بیان شوند. لذا با استفاده



الف) تغییرات نشست در طول زمان



ب) توزیع نسبت تخلخل در عمق لایه پس از ۴۰۰ روز.

شکل ۲. مدل سازی تحکیم وزنی یک لایه رس فسفاتی.

رایانه‌یی تهیه شده و معادله‌ی تحکیم که در سال ۱۹۲۳ ارائه شده است به همراه اندازه‌گیری‌های صحرایی و نتایج روش‌های عددی ارائه شده در سال ۱۹۸۶، در شکل‌های ۲ الف و ۲ ب نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، چه در نمودار نشست - زمان (شکل ۲ الف) و چه در نمودار توزیع نسبت تخلخل در عمق پس از ۴۰۰ روز (شکل ۲ ب)، سازگاری خوبی بین نتایج حاصل از مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده صحرایی و نتایج مدل‌های عددی دیگر وجود دارد، و اختلاف ناچیز موجود بین نتایج مدل و نتایج سایر مدل‌های عددی، ناشی از اختلاف در سیستم مختصات استفاده شده، متغیر وابسته انتخاب شده، و روش حل تفاضل محدود به‌کار گرفته شده، است. درحالی‌که استفاده از معادله‌ی تحکیم (۱۹۲۳) برای مدل‌سازی روند تحکیم وزنی که در آن اثرات کرنش بزرگ و تغییرات m_v و k در طول تحکیم در نظر گرفته نشده است، موجب کندتر شدن پیش‌بینی نرخ تحکیم می‌شود و کلاً کاربردی ندارد. برای مدل‌سازی عددی این مسئله از ۵۰ المان یک‌بعدی و گام زمانی 10^4 ثانیه استفاده شده است.

مدل‌سازی عددی تحکیم یک‌لایه‌ی خاک با نسبت تخلخل اولیه‌ی یکنواخت تحت اثر توأمان وزن و سر بار

این مسئله به پیش‌بینی تحکیم وزنی یک لایه‌ی رس به ارتفاع اولیه‌ی $7/2m$ و نسبت تخلخل اولیه‌ی یکنواخت $14/8$ می‌پردازد، که تحت اثر یک سر بار $967/5 kg/m^2$ نیز قرار داده شده و تنها از سمت بالا امکان زه‌کشی دارد (شکل ۳). روابط تراکم‌پذیری و نفوذپذیری این لایه‌ی رس عبارت‌اند: از [۲۱]

$$e = 7/72(\sigma')^{-0/22} \quad (kPa) \quad (الف ۱۴)$$

$$k = 2/93056 \times 10^{-12}(e^{2/65}) \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (ب ۱۴)$$

برای مدل‌سازی عددی تحکیم در این مسئله، از ۵۰ المان یک‌بعدی و گام زمانی

خاک؛ ۶. فاصله‌ی زمانی بین ریختن لایه‌های خاک و گام زمانی (t_{ri}, dt_{ri}) ؛ ۷. ارتفاع و نسبت تخلخل اولیه (e_{oi}, h_{oi}) هر لایه‌ی خاک؛ ۸. تعداد المان‌ها (n_e) در هر لایه‌ی خاک.

مقدار انتخابی برای n_e به‌دقت مورد نظر برای جواب‌ها بستگی دارد و چنان‌که قبلاً بیان شد، برای جلوگیری از ناپایداری عددی اغلب لازم است با افزایش تعداد المان‌ها، گام زمانی کاهش داده شود. پس از خواندن ورودی‌های توسط برنامه، حلقه‌ی اصلی برنامه که به تعداد لایه‌های خاک تکرار خواهد شد، شروع می‌شود. در این حلقه ابتدا شرایط اولیه، شامل مختصات در سیستم مادی $(z_{ji})^1$ ، نسبت تخلخل (e_{ji}) ، و مختصات در سیستم اولرین $(\xi_{ji})^1$ ، در لحظه‌ی اضافه شدن هر لایه‌ی خاک جدید محاسبه می‌شود. پس از آن، شرایط نهایی شامل: تنش مؤثر، نسبت تخلخل و مختصات نهایی در سیستم مختصات اولرین $(\xi_{fji}, e_{fji}, \sigma'_{fji})$ و همچنین نشست نهایی کل (S_{fji}) تحت وزن لایه‌ی افزوده شده، برای گره‌های لایه‌های قبلی و لایه‌ی جدید محاسبه می‌شود. پس از انجام محاسبات اولیه، حلقه‌ی دوم برنامه شروع می‌شود. در این مرحله تا زمان ریختن لایه‌ی خاک بعدی یا تا رسیدن به یک زمان مورد نظر که توسط کاربر تعیین می‌شود، در هر گام زمانی با حل معادله‌ی دیفرانسیلی ۱ نسبت تخلخل، و سپس با استفاده از آن مختصات اولرین، تنش مؤثر، و فشار آب حفره‌ی اضافی برای گره‌های لایه‌های خاک موجود، و درجه‌ی تحکیم متوسط کل (U_{avg}) محاسبه می‌شوند. با ارضاً معیار خاتمه، حلقه‌ی دوم پایان می‌پذیرد. در صورت وجود لایه‌ی خاک جدید، مجدداً مراحل فوق تکرار خواهد شد و برنامه تا برقراری معیار اتمام حلقه‌ی اصلی (انجام محاسبات برای تمامی لایه‌های خاک) ادامه می‌یابد. خروجی‌های این برنامه عبارت‌اند از: ۱. تغییرات نسبت تخلخل در عمق لایه و در طول زمان؛ ۲. تغییرات فشار آب حفره‌ی اضافی در عمق لایه و در طول زمان؛ ۳. تغییرات نشست در طول زمان.

مدل رایانه‌یی تهیه شده علاوه بر مدل‌سازی فرآیند تحکیم وزنی با تغییر شکل‌های بزرگ، از توانایی مدل‌سازی تحکیم تحت اثر توأم وزن و سر بار، تحکیم تحت شرایط تخلخل اولیه‌ی غیر یکنواخت، تحکیم خاک چند لایه‌یی، و تحکیم در طول دوره‌های پرکردن نیز برخوردار است که در قسمت‌های بعد، پس از صحت‌سنجی مدل برخی از این قابلیت‌ها نشان داده خواهند شد.

صحت‌سنجی مدل

به‌منظور ارزیابی صحت نتایج برنامه‌ی رایانه‌یی تهیه شده، از نتایج یک آزمایش تحکیم وزنی صحرایی که در سال ۱۹۸۶ ارائه شده است، استفاده می‌شود [۲۰]. در این آزمایش تحکیم وزنی یک لایه‌ی رس فسفاتی موسوم به کینگزفورد در یک ستون به ارتفاع اولیه‌ی $6/33m$ و نسبت تخلخل اولیه‌ی $18/8$ (که در کل لایه یکنواخت بوده است)، مورد بررسی قرار گرفته است. تحکیم وزنی در این ستون خاک بر اثر زه‌کشی یک‌طرفه از بالا به صورت یک‌بعدی انجام شده است. در این آزمایش هیچ‌گونه تنشی در بالای ستون خاک اعمال نشده و تحکیم فقط تحت اثر وزن لایه‌ی خاک صورت گرفته است. در طول انجام این آزمایش نسبت تخلخل و نشست رس برای ۴۳۰ روز پایش و ثبت شده است. روابط تراکم‌پذیری و نفوذپذیری به دست آمده برای این رس عبارت‌اند از: [۲۰]

$$e = 12/19(\sigma')^{-0/29} \quad (kPa) \quad (الف ۱۳)$$

$$k = 1/41 \times 10^{-11}(e^{2/11}) \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (ب ۱۳)$$

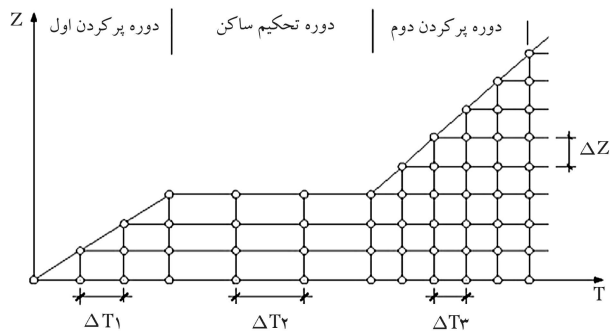
نتایج حاصل از پیش‌بینی روند تحکیم وزنی رس فسفاتی با استفاده از برنامه‌ی

مدل‌سازی عددی پدیده‌ی تحکیم وزنی در طول پرکردن مرحله‌ی ۱۳ (شرایط نسبت تخلخل اولیه‌ی غیر یکنواخت)

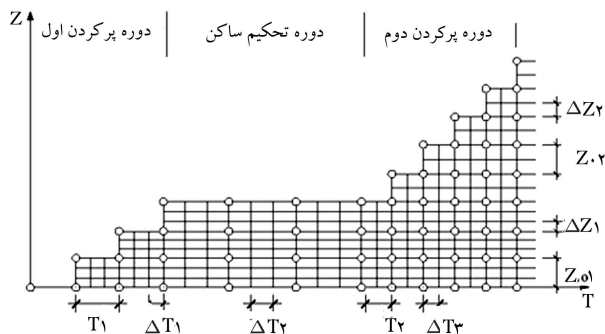
در پرکردن مرحله‌ی مصالح جدید مرتباً روی مصالح قبلی ریخته می‌شوند. لذا به‌منظور مدل‌سازی تحکیم در طول این دوره‌ها، با توجه به این که در تحقیق حاضر از سیستم مختصات مادی و روش حل تفاضل محدود استفاده شده است، لازم است همانند روش‌های کلاسیک در مجراسازی^{۱۴} مکانی مسئله، گره‌های جدید ایجاد شوند.

چنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در روش مجراسازی کلاسیک در طول دوره‌های پرکردن در هرگام زمانی یک گره جدید اضافه می‌شود.^[۱۰] این یک شیوه‌ی ساده و معمول است که در آن نرخ پرکردن از تقسیم‌نموی مکانی برگام زمانی به‌دست می‌آید. با این وجود به‌گفته‌ی برخی از محققین^[۱۰]، این وابستگی شدید بین نمو مکانی و زمانی گاهی نقطه‌ضعفی جدی را در تحلیل عددی ایجاد می‌کند، به‌طوری که این وابستگی، استفاده از شیوه‌ی مجراسازی فوق را برای مدل‌سازی تحکیم در طول دوره‌های پرکردن با استفاده از معادله‌ی ۱ که به‌صورت صریح در بازه زمانی فرموله شده را ناممکن می‌سازد. اگرچه در سال ۱۹۹۲ پیشنهاد شد که به‌منظور مستقل کردن دو نمو مکانی و زمانی، به‌جای افزودن یک گره در هرگام زمانی چندین گره اضافه شود، اما این روش نیز در مورد الگوریتم تفاضلی که در این تحقیق به‌کار رفته موثر واقع نشد. لذا در این تحقیق از روش مجراسازی دیگری (شکل ۶)، استفاده شد.

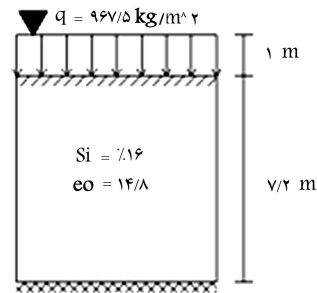
این روش به‌خوبی دو نمو زمانی و مکانی را از هم جدا کرده و امکان مدل‌سازی



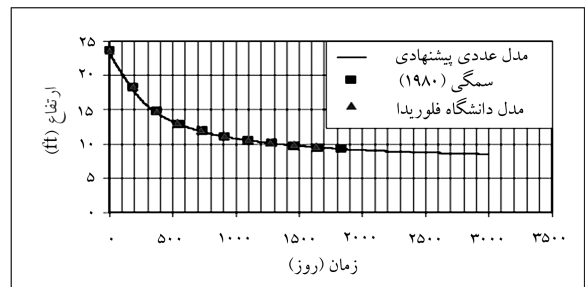
شکل ۵. روش مجراسازی کلاسیک (افزودن یک گره در هرگام زمانی).



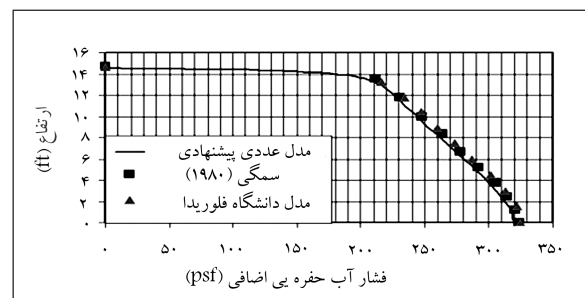
شکل ۶. روش مجراسازی مورد استفاده در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی تحکیم وزنی در روش پرکردن مرحله‌ی ۱۳.



شکل ۳. تحکیم یک لایه خاک با نسبت تخلخل اولیه‌ی یکنواخت تحت اثر وزن و سربار.



الف) تغییرات نشست در طول زمان



ب) پروفیل فشار آب حفره‌ی اضافی پس از یک سال.

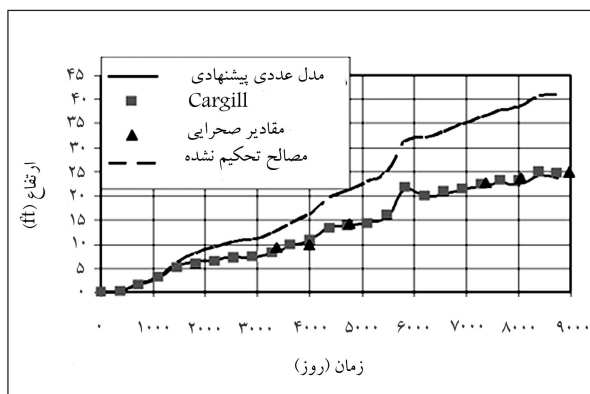
شکل ۴. مدل‌سازی تحکیم یک لایه خاک با نسبت تخلخل اولیه‌ی یکنواخت تحت اثر توامان وزن و سربار.

۱۰^۴ ثانیه استفاده شد. شکل‌های ۴الف و ۴ب به‌ترتیب نمودارهای نشست - زمان و پروفیل فشار آب حفره‌ی اضافی یک‌ساله را برای این مسئله نمایش می‌دهند. چنان که مشاهده می‌شود، در هر دو نمودار نتایج مدل تهیه‌شده در این تحقیق بسیار نزدیک به نتایج دو مدل دیگر^[۲۱]، یعنی مدل عددی تهیه‌شده در سال ۱۹۸۰، و مدل تهیه‌شده توسط دانشگاه فلوریدا، است و تطابق خوبی با آنها دارد.

چنان که در شکل ۴ب مشاهده می‌شود، اعمال سربار در این مسئله موجب کاهش شدید نسبت تخلخل و نفوذپذیری در نزدیکی سطح، و در نتیجه ایجاد یک پوسته‌ی سطحی شده است. این امر موجب گرادیان بالای فشار آب حفره‌ی اضافی در این ناحیه شده است. بنابراین به‌کارگیری شیوه‌ی بهسازی اعمال سربار از طریق پوشش‌گذاری^{۱۲} قادر است به‌خاطر تشکیل پوسته‌ی سطحی، زمان تحکیم را افزایش دهد. این مثال نشان‌دهنده‌ی توانایی مدل در تحلیل فرآیند تحکیم همزمان تحت اثر وزن و سربار است.

جدول ۱. ارتفاع سالانه‌ی مصالح ریخته‌شده به داخل محل دفع.

سال	ارتفاع (ft)	سال	ارتفاع (ft)	سال	ارتفاع (ft)
۱۹۵۶	۰٫۳۱۱	۱۹۶۴	۱۲٫۲۶۱	۱۹۷۲	۳۲٫۰۸۶
۱۹۵۷	۱٫۶۳۷	۱۹۶۵	۱۴٫۲۳۴	۱۹۷۳	۳۳٫۴۱۱
۱۹۵۸	۳٫۲۴۶	۱۹۶۶	۱۶٫۲۶۶	۱۹۷۴	۳۴٫۸۳
۱۹۵۹	۶٫۵۰۶	۱۹۶۷	۱۹٫۷۲۷	۱۹۷۵	۳۶٫۴۲۷
۱۹۶۰	۸٫۲۰۴	۱۹۶۸	۲۱٫۲۷۴	۱۹۷۶	۳۷٫۸۵۷
۱۹۶۱	۹٫۲۷۲	۱۹۶۹	۲۲٫۹۵۶	۱۹۷۷	۳۸٫۵۳۱
۱۹۶۲	۱۰٫۶۳۳	۱۹۷۰	۲۴٫۹۱۶	۱۹۷۸	۴۰٫۶۸۶
۱۹۶۳	۱۱٫۰۸	۱۹۷۱	۳۱٫۴۳۷	۱۹۷۹	۴۱٫۱۰۶



شکل ۷. تغییرات ارتفاع مصالح لایروبی شده بازمان.

مصالح ریخته‌شده در این محل دفع ارائه شده است [۲۲]. با برآزش معادلات توانی ۵ و ۶ به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی ارائه شده در سال ۱۹۸۵ [۲۲]، روابط تراکم‌پذیری و نفوذپذیری زیر برای مصالح لایروبی شده به دست آمد:

$$e = 0.626(\sigma' + 0.41)^{-0.1472} \quad (kPa) \quad (الف)$$

$$k = 2/89 \times 10^{-12} (e^{2.725}) \left(\frac{m}{s}\right) \quad (ب)$$

مدل‌سازی عددی این مسئله با استفاده از بازه زمانی ۰/۵ سال برای سال اول پرکردن، بازه زمانی ۱ سال برای ۲۳ سال دیگر دوره‌ی پرکردن، گام زمانی ۱۶۰۰ ثانیه، و ۲ المان یک‌بعدی برای هر لایه‌ی ریخته‌شده، انجام شده است. نمودار تغییرات ارتفاع مصالح با زمان در شکل ۷ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از برنامه‌ی رایانه‌ی تهیه‌شده علاوه بر آن که تطابق بسیار خوبی با نتایج پیش‌بینی شده در سال ۱۹۸۵ دارد، بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی صحرایی است. وجود این توافق در طول ۲۴ سال عملیات دفع حاکی از آن است که مدل تهیه‌شده برای شبیه‌سازی مسائل تحکیم وزنی صحرایی واقعی مناسب است.

نتیجه‌گیری

در روند تحکیم وزنی خاک‌های نرم، به دلیل بزرگ‌بودن کرنش‌های حاصل و تغییرات نفوذپذیری و تراکم‌پذیری در طول تحکیم، نظریه‌های تحکیم کلاسیک که بر مبنای فرضیات ساده‌کننده نظیر کوچک‌بودن کرنش‌ها استوارند فاقد اعتبارند و باید از نظریه‌های مبتنی بر کرنش‌های بزرگ استفاده شود.

در این تحقیق با حل عددی معادله‌ی ارائه شده در سال ۱۹۶۷ به روش تفاضل محدود، یک مدل رایانه‌ی تهیه شده که توانایی مدل‌سازی فرآیند تحکیم وزنی تنها تحت اثر وزن لایه، تحت اثر توأمان وزن و سربار، تحت شرایط تداخل اولیه‌ی غیریکنواخت، و نیز تحکیم وزنی خاک‌های چندلایه و ترکیب این موارد را دارد. همچنین با استفاده از شیوه‌ی پیشنهادی در این پژوهش برای مستقل‌کردن نمو مکانی و زمانی از یکدیگر در طول مدت زمان پرکردن به روش مرحله‌ی، مدل تهیه شده قادر است هرگونه توالی دوره‌های پرکردن و تحکیم ساکن را نیز با r بدون سربار تحلیل کند. از دیگر مزایای این شیوه‌ی مجزاسازی این است که به‌غیر از مدل‌سازی دوره‌های پرکردن متوالی با نرخ‌های متفاوت، امکان در نظر گرفتن تغییرات نرخ پرکردن در طول یک دوره از این عملیات نیز فراهم شده است.

در حل عددی معادله‌ی ارائه شده در سال ۱۹۶۷ به روش تفاضل محدود و

تحکیم در طول دوره‌های پرکردن با استفاده از الگوریتم تفاضلی صریح γ را فراهم می‌کند.

در شیوه‌ی پرکردن مرحله‌ی، چنانچه عمل پرکردن با نرخ $V \left(\frac{m}{day}\right)$ صورت گیرد، انتظار می‌رود که پس از مدت زمان t_1 (day) ارتفاع مواد ریخته‌شده به داخل محل دفع برابر $h_0 = V \times t_1$ (m) باشد. اما تحکیم وزنی مصالح که در طول دوره‌ی پرکردن مرحله‌ی رخ می‌دهد، موجب می‌شود که عملاً ارتفاع مواد ریخته‌شده به داخل محل دفع در پایان t_1 (day)، کم‌تر از h_0 (m) باشد. از این رو برای مدل‌سازی تحکیم در این شرایط، هر چه طول بازه زمانی t_1 کوچک‌تر انتخاب شود، به دلیل وقوع تحکیم کم‌تر، در نظر گرفتن ارتفاع h_0 برای مصالح ریخته‌شده به واقعیت نزدیک‌تر است. همچنین بزرگی نرخ پرکردن نیز بر میزان تحکیم صورت‌گرفته تأثیر دارد، به طوری که هرچه نرخ پرکردن سریع‌تر باشد، تحکیم کم‌تری در طول دوره‌ی پرکردن رخ می‌دهد، و در نتیجه می‌توان مقدار بزرگ‌تری را برای t_1 انتخاب کرد. بدین ترتیب در این تحقیق، ابتدا با توجه به نرخ پرکردن، یک t_1 به اندازه‌ی کافی کوچک انتخاب شده، و در پایان این بازه زمانی به اندازه‌ی h_0 به ارتفاع مواد موجود در محل دفع اضافه می‌شود. در حقیقت با این فرض، به جای شیوه‌ی پرکردن پیوسته، در طول بازه زمانی t_1 پرکردن به صورت آنی در نظر گرفته می‌شود. سپس در طول بازه زمانی t_1 با انتخاب یک نمو مکانی و زمانی مستقل فرآیند تحکیم برای ارتفاع مصالح موجود مدل‌سازی می‌شود. در انتهای این بازه زمانی، به اندازه h_0 به ارتفاع تحکیم‌یافته‌ی موجود اضافه، و سپس تحکیم ارتفاع جدید مدل‌سازی می‌شود. این عملیات تا پایان دوره‌ی پرکردن تکرار خواهد شد. بنابراین مشابه حالت قبیل تنها عاملی که دو نمو مکانی و زمانی را به هم می‌پیوندد، تأمین پایداری عددی الگوریتم تفاضلی γ است. همچنین با استفاده از این روش، به‌غیر از مدل‌سازی دوره‌های پرکردن متوالی با نرخ‌های متفاوت، می‌توان متغیر بودن نرخ در طول یک دوره از عملیات پرکردن را نیز (که می‌تواند به‌خاطر تغییر ابعاد سطح محل دفع در عمق باشد)، با انتخاب h_0 ‌های متفاوت لحاظ کرد. در پایان، با استفاده از روش فوق مقادیر نشست در یک محل دفع صحرایی محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی قبلی مقایسه خواهند شد.

محل دفع ۱۵

محل دفع ناحیه‌ی به مساحت ۲۵۰۰ acre است که با خاک‌ریزهایی به ارتفاع ۲۸ ft محصور شده است. این محل دفع توسط مصالح لایروبی شده با نسبت تداخل اولیه‌ی ۹ و طی ۲۴ سال پر شده است. در جدول ۱ میزان ارتفاع سالانه‌ی

از مثال‌های حل شده ضمن به نمایش گذاشتن توانایی‌ها و دقت نتایج مدل، نشان داد که چون در تحکیم خاک‌های خیلی نرم روند تحکیم سریع‌تر و مقدار نشست بیشتر از مقادیری است که نظریه‌های تحکیم کلاسیک نشان می‌دهند، در نظر گرفتن کرنش‌های بزرگ و تغییرات m_v و k در تحلیل تحکیم خاک‌های خیلی نرم ضروری است.

با توابع توانی برای اعمال تغییرات m_v و k در طول تحکیم، مشاهده شد که استفاده از روش پسر و برای مجزاسازی بازه مکانی جواب‌های بهتری می‌دهد. در الگوریتم تقاضای حاصل، در صورت استفاده از تعداد المان‌های بالا ممکن است ناپایداری عددی رخ دهد که در این صورت لازم است گام زمانی کاهش داده شود. نتایج حاصل

پانویس

1. confined disposal facilities (CDF)
2. mine tailing dams
3. finite strain
4. stress-free state
5. buoyant stress
6. quiescent consolidation
7. finite difference
8. backward-difference
9. explicit scheme
10. material coordinate system
11. eulerian coordinate system
12. capping
13. stage filling
14. discretization
15. crane island

منابع

1. Terzaghi, K.T. "Die berechnung der durchlässigkeit ziffer des tons aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen", *Akademie der Wissenschaften in Wien. Sitzungsberichte, Mathematischnaturwissenschaftliche Klasse 2a*, (132), pp. 125-138 (1923).
2. Richart, F.E. "A review of the theories for sand drains", *Proc. Am. Soc. civ. Engrs*, SM3, (1301), pp. 1-38 (1957).
3. Lo, K.Y. "Discussion on rowe, measurement of the coefficient of consolidation of lacustrine clay", *Geotechnique*, **10**, (1), pp. 36-39 (1960).
4. Davis, E.H and Raymond, G.P. "A non-linear theory of consolidation", *Geotechnique*, **15**, (2), pp. 161-173 (1965).
5. Janbu, N. "Consolidation of clay layers based on non-linear stress-strain", *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech.*(2), pp. 83-87 (1965).
6. Abbasi, N. "Analytical and experimental study on the coefficient of consolidation variations in soft clays", *Ph.D. Thesis*, Faculty of soil and Water Eng., University of Tehran (2006).
7. Gibson, R.E. "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays", *Geotechnique*, **17**, pp. 261-273 (1967).
8. Monte, J.L. and Krizek, R.J. "One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation", *Geotechnique*, **26**, (3), pp. 495-510 (1976).
9. Lee, K. and Sills, G.C. "The consolidation of a soil stratum, including self-weight effects and large strains", *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **5**, pp. 405-428 (1981).
10. Huerta, A. and Rodriguez, A. "Numerical analysis of non-linear large-strain consolidation and filling", *Computers and Structures*, **44**, (1/2), pp. 357-365 (1992).
11. Xie, K.H. and Leo, C.J. "Analytical solution of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays", *Computers and Geotechnics*, **31**, pp. 301-314 (2004).
12. Carrier, W.D. and, Bromwell, L.G., Somogyi, F. "Design capacity of slurried mineral waste ponds", *J. Geotechnical Engineering*, **109**, (5), pp. 699-716 (1983).
13. Xie, K.H., Zhuang, and Y.C., Li, X.B. "Non-linear analysis of consolidation with variable compressibility and permeability", *J. Zhejiang University SCIENCE*, **6A**(3), pp. 181-187 (2005).
14. Somogyi, F. "Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation", Implementation Package, Bromwell Engineering, Inc. Lakeland, Fla (1979).
15. Al-Tabbaa, A. and, Wood, D.M. "Some measurements of the permeability of Kaolin", *Geotechnique*, **37**, (4), pp. 499-503 (1987).
16. Znidarcic, D. and, Aiban, S.A. "Discussion on some measurements of the permeability of Kaolin by Al-Tabbaa and Wood", *Geotechnique*, **38**, (4), pp. 453-454 (1988).
17. Liu, J.C. and, Znidarcic, D. "Modelling one-dimensional compression characteristics of soils", *J. Geotechnical Engineering*, **117**, (1), pp. 162-169 (1991).
18. Huerta, A., Kriegsmann, G.A. and, Krizek, R.J., "Permeability and compressibility of slurries from seepage-induced consolidation", *J. Geotechnical Engineering*, **114**, (5), pp. 614-627 (1988).
19. Anderson, D., "Computational fluid mechanics and heat transfer", Hemisphere Publishing Corporation, 559P, (1984).
20. McVay, M.C., Townsend, F.C. and, Bloomquist, D. "Quiescent consolidation of phosphatic waste clays", *J. Geotechnical Engineering*, **112**, (11), pp. 1033-1049 (1986).
21. McVay, M.C., Zuloaga, P.I. and, Townsend, F.C. "Reclamation of phosphatic clay waste ponds by capping", Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, State-Fla (1988)
22. Cargill, K.W. "Mathematical model of the consolidation/desiccation processes in dredged material", Technical Rep. D-85-4, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss (1985).

