



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۲۱ تا ۱۲۸
Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 121-128



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

مدلسازی عددی اثر عمق نفوذ زهکش‌های قائم بر فرآیند تحکیم مطالعه موردی: پیش‌بارگذاری واحدهای زلال‌ساز سربندر خوزستان

کاظم فخاریان^{۱*}، سید محمدعلی تسلطی^۲

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲-کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۸۹/۴/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۹)

چکیده

مهم‌ترین مسئله در پروژه‌های پیش‌بارگذاری، زمان فرآیند تحکیم خاک می‌باشد. چنانچه به دلایلی زهکش قائم تا عمق مورد نظر طراحی که در واقع ضخامت لایه‌ی تراکم‌پذیر حاصل از مطالعات ژئوتکنیک می‌باشد اجرا نشود، تأخیری در زمان فرآیند تحکیم به وجود می‌آید. در این مقاله، مدلسازی عددی اثر این مؤلفه بر روی زمان فرآیند تحکیم بررسی شده و سپس به مطالعه‌ی موردی پروژه پیش‌بارگذاری واحدهای زلال‌ساز سربندر خوزستان پرداخته می‌شود. به علت آن‌که زهکش‌های قائم در برخی نقاط این پروژه تا عمق طراحی نفوذ نکرده‌اند، از این رو می‌توان مقایسه‌ای بین مدل عددی و نتایج حاصل از داده‌های ابزارها در پروژه انجام داد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده مشخص گردید که چنانچه عمق نفوذ زهکش قائم کم‌تر از ۸۰ درصد ضخامت لایه‌ی تراکم‌پذیر باشد (که معمولاً عمق طراحی زهکش قائم نیز می‌باشد)، تأخیر قابل‌ملاحظه‌ای در فرآیند تحکیم خاک نسبت به حالت نفوذ کامل به وجود می‌آید (که این مسئله در مطالعه‌ی موردی نیز دیده شد).

کلمات کلیدی:

پیش‌بارگذاری، عمق نفوذ زهکش قائم، مدل عددی، تحکیم خاک

۱- مقدمه

به علت بالا بودن نشست تحکیمی خاک‌های ریزدانه اشباع مانند رس‌ها، معمولاً اصلاح این‌گونه خاک‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. یکی از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین روش‌های اصلاح خاک‌های رسی نرم پیش‌بارگذاری است. در طول عملیات پیش‌بارگذاری و با خروج اضافه فشار آب حفره‌ای از سیستم، نشست خاک صورت گرفته و تنش مؤثر در لایه‌های سست و تراکم‌پذیر زیرسطحی افزایش یافته و لذا امکان نشست سازه پس از احداث به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. به علت نفوذپذیری پایین خاک رس، معمولاً جهت تسریع در عملیات پیش‌بارگذاری و تحکیم این نوع از خاک‌ها، از زهکش‌های قائم استفاده می‌شود. زهکش‌های قائم باعث ایجاد مسیرهای زهکش در داخل خاک شده و از این رو حرکت افقی آب به سمت زهکش‌های قائم موجب کاهش طول مسیر شده و آب موجود در خاک می‌تواند در مدت زمان کمتری از خاک خارج شود.

در بهترین شرایط لازم است که زهکش قائم تا انتهای لایه‌ی رس تراکم‌پذیر (که در مطالعات ژئوتکنیک مشخص شده) اجرا گردد. حال چنانچه به دلایلی (مثلاً ضعف دستگاه نصب، افزایش نسبی سختی خاک در برخی نواحی و غیره) زهکش قائم تا عمق مورد نظر فرو نرود، تأخیری در زمان فرآیند تحکیم خاک اتفاق می‌افتد. در این حالت، گرایدان هیدرولیکی بین این دو منطقه (منطقه‌ای که زهکش قائم وجود دارد و منطقه‌ای که زهکش قائم در آن فرو نرفته است) به وجود می‌آید [۲]. در مرجع [۲] نشان داده شده است که مقداری تأخیر در زمان فرآیند تحکیم تا یک ارتفاع مشخصی از نوک زهکش قائم (در حالتی که زهکش تا عمق طراحی فرو نرفته است) به وجود می‌آید.

کارهای این‌درانتا روجی‌کیات کامجورن^۱ [۳] در سال ۲۰۰۸ نشان داد که چنانچه عمق PVD بیش از ۶۰ درصد لایه‌ی تراکم‌پذیر باشد، تأخیر در فرآیند تحکیم خاک ناچیز است (در شرایط پیش‌بارگذاری همراه با اعمال مکش).

در این مقاله با مدل‌سازی عددی فرآیند تحکیم خاک با استفاده از نرم‌افزار عددی المان محدود آباکوس^۲ [۴] به بررسی اثر عمق نفوذ زهکش قائم بر روی زمان تحکیم خاک پرداخته شده و نمودار زمان رسیدن به ۵۰ و ۹۰ درصد تحکیم برای مقدار نفوذهای مختلف از زهکش قائم ارائه می‌شود. در ادامه به مطالعه‌ی پروژه‌ی پیش‌بارگذاری واحدهای زلال‌ساز سربندر خوزستان پرداخته می‌شود. با توجه به این‌که در نقاطی از این پروژه زهکش‌های قائم تا عمق مورد نظر فرو نرفته‌اند، از این رو می‌توان مقایسه‌ای با نتایج بدست آمده از مدل عددی انجام داد.

۲- مروری بر تئوری تحکیم شعاعی

بارون^۳ [۵] روشی برای تحلیل یک المان استوانه‌ای از خاک همراه با یک زهکش قائم در مرکز آن ارائه کرد. تئوری وی بر اساس ساده‌سازی فرضیات تحکیم تک‌بعدی ترزاقی بود. معادله دیفرانسیل حاکم بر آن به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن، u اضافه فشار آب حفره‌ای به علت افزایش تنش، t زمان، C_h ضریب تحکیم افقی خاک و r فاصله‌ی شعاعی از زهکش می‌باشد. حل رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) ارائه شده است.

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{\mu}\right], T_h = \frac{c_h t}{4r_e^2} \quad (2)$$

که در آن، U_h درصد تحکیم متوسط شعاعی، T_h عامل بدون بعد زمان، C_h ضریب تحکیم افقی خاک، r_e شعاع تأثیر زهکش و μ مؤلفه‌ای است که در برگیرنده فواصل زهکش، قطر معادل زهکش، ظرفیت دبی خروجی زهکش و ناحیه دست‌خورده خاک می‌باشد که در ساده‌ترین حالت از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\mu = \ln(n) - 0.75, n = \frac{D_e}{d_w} \quad (3)$$

که در آن، D_e قطر تأثیر زهکش و d_w قطر معادل زهکش است. روش‌های مختلفی برای در نظر گرفتن اثر توأم تحکیم قائم و شعاعی ارائه شده است. ساده‌ترین آن توسط کاریلو^۴ [۶] و در سال ۱۹۴۲ ارائه شد که از رابطه (۴) بدست می‌آید.

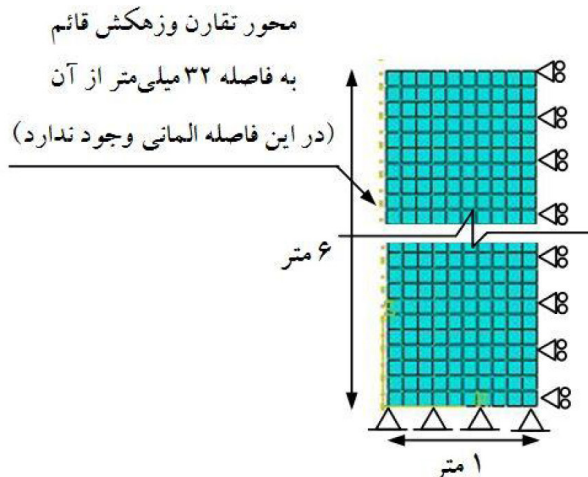
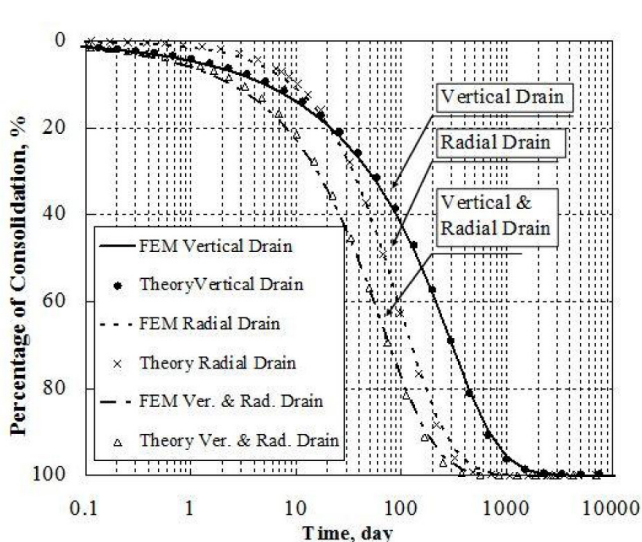
$$(1-U) = (1-U_v)(1-U_h) \quad (4)$$

که در آن، U درصد تحکیم متوسط کل، U_v درصد تحکیم متوسط در جهت قائم و U_h درصد تحکیم متوسط در جهت افقی می‌باشد.

۳- مدل عددی

مدل عددی ساخته‌شده از نوع تقارن محوری بوده و به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل شده است. در این مدل‌سازی از نوعی مشخصات رفتاری^۵ [۷] برای رفتار خاک استفاده شده است که بر اساس حالت بحرانی^۶ بوده و از قانون هم‌بسته جریان^۷ تبعیت می‌کند. المان مورد استفاده از نوع چهار گرهی بوده و دارای درجه آزادی فشار آب حفره‌ای است که در نرم‌افزار به اختصار با نماد CAX4P نشان داده می‌شود. با توجه به تأثیر اندازه‌ی شبکه^۸ بر روی نتایج، شبکه‌بندی

³ Barron⁴ Carillo⁵ Modified Cam-Clay⁶ Critical State⁷ Associated Flow Rule⁸ Mesh¹ Indraratna and Rujikiatkamjorn² ABAQUS



شکل ۱: درصد تحکیم برای حالت‌های مختلف زهکشی در مدل عددی و تئوری همراه با شبکه‌بندی مدل عددی مربوط به صحت‌سنجی

جدول ۱: مشخصات خاک در مدل عددی مربوط به صحت‌سنجی

M	λ	K	e_0	ν	P'_c	k	γ_{water}	γ_{sat}	سربار	پارامتر
-	-	-	-	-	کیلو پاسکال	متر بر روز	کیلو نیوتون بر متر مکعب	کیلو نیوتون بر متر مکعب	کیلو پاسکال	واحد
۱/۲	۰/۱۶۵۰۳۲	۰/۰۰۶۲۱	۱	۰/۲۵	۵۰	۱/۱×۱۰ ^{-۵}	۱۰	۱۸	۱۰۰	مقدار

$$(1-U) = (1-U_v)(1-U_h) \quad (5)$$

که در آن، d_w قطر معادل، a عرض و b ضخامت PVD می‌باشد. در شکل (۱) نمودارهای درصد تحکیم نسبت به زمان برای شرایط زهکشی مختلف و در دو حالت تئوری و مدل عددی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مدل عددی و مقادیر تئوری همخوانی قابل قبولی با یکدیگر دارند.

۳-۲- اثر عمق نفوذ زهکش قائم در مدل‌سازی عددی بر روی فرآیند تحکیم خاک

عمق استوانه‌ی خاک مدل شده ۱۰ متر می‌باشد. مشخصات مدل عددی در جدول (۲) آورده شده است. همچنین در این مدل‌ها فرض شده که زهکشی از سطوح فوقانی و تحتانی خاک و از PVD صورت می‌گیرد. طول PVD در مدل‌های مختلف صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر می‌باشد. ملاک مقایسه بین این مدل‌ها زمان رسیدن به ۵۰ و ۹۰ درصد تحکیم می‌باشد.

در شکل (۲) نمودار درصد تحکیم خاک در طول زمان برای این مدل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، فرآیند تحکیم در مدلی که طول PVD بیشترین مقدار است، نسبت به سایر مدل‌ها سریع‌تر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که اختلاف چندانی بین نتایج دو مدل با PVD به طول ۱۰ و ۸ متر وجود ندارد.

بکار گرفته شده در تمامی تحلیل‌ها یکسان و به اندازه کافی ریز اختیار شده تا اندازه شبکه و شبکه‌بندی بر روی نتایج اثری نداشته باشد. خاک در طول تحلیل اشباع بوده و شرایط زهکشی از طریق اعمال اضافه فشار آب صفر در نظر گرفته شده است.

۳-۱- صحت‌سنجی مدل عددی

شبکه‌بندی مدل عددی در شکل (۱) نشان داده شده است و مشخصات خاک در مدل عددی در جدول (۱) ارائه شده است که در آن γ_{sat} وزن مخصوص اشباع خاک، γ_{water} وزن مخصوص آب، k نفوذپذیری خاک، P'_c تنش پیش‌تحکیمی خاک، ν ضریب پواسون خاک، e_0 تخلخل اولیه خاک، K شیب خط تورم خاک (در فضای $(\nu-h, p)$ ، λ شیب خط عادی تحکیم‌یافته (در فضای $(\nu-h, p)$ و M شیب خط حالت بحرانی^۱ در فضای $q-p'$ می‌باشد.

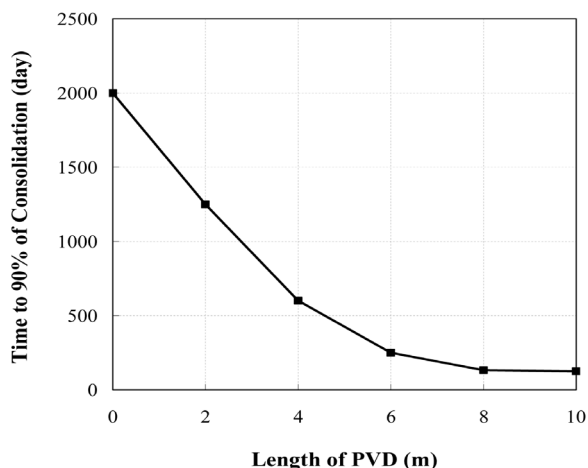
خاک مدل شده در مدل تقارن محوری به ابعاد ۶ متر در ۱ متر بوده و زهکش قائم از نوع نواری (PVD) به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در ۳ میلی‌متر می‌باشد. برای این‌که زهکش قائم نیز شرایط تقارن محوری داشته باشد، قطر معادل آن با استفاده از رابطه ارائه‌شده توسط ریکس^۲ [۸] محاسبه شده است که در آن، مقدار قطر معادل PVD از رابطه (۵) بدست می‌آید.

^۱ Critical State Line

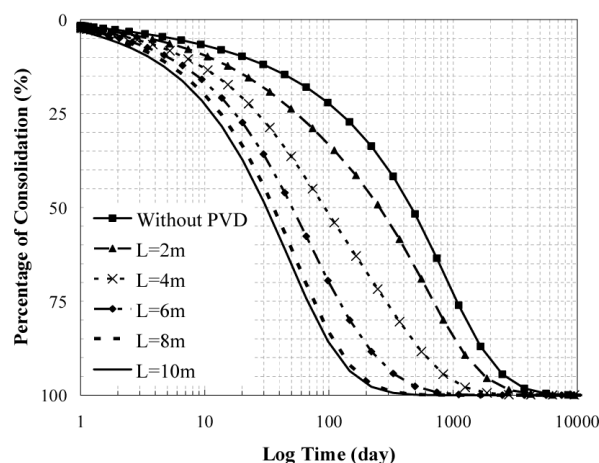
^۲ Rixner

جدول ۲: مشخصات خاک در مدل عددی تحکیم خاک مربوط به اثر راستای چیدمان PVD در آرایش مثلثی

پارامتر	سربار	γ_{sat}	γ_{water}	k	P'_c	ν	e_0	κ	λ	M	c_v	بعد PVD
واحد	کیلو پاسکال	کیلو نیوتون بر متر مکعب	کیلو نیوتون بر متر مکعب	متر بر ثانیه	کیلو پاسکال	-	-	-	-	-	متر مربع بر دقیقه	میلی‌متر
مقدار	۱۰۰	۱۸	۱۰	$1/3 \times 10^{-9}$	۴۰	۰/۲۵	۱/۰۰۸	۰/۰۰۶۲۱	۰/۱۶۵	۱/۲	8×10^{-6}	۱۰۰



شکل ۴: زمان رسیدن به ۹۰ درصد تحکیم بر حسب طول‌های مختلف PVD



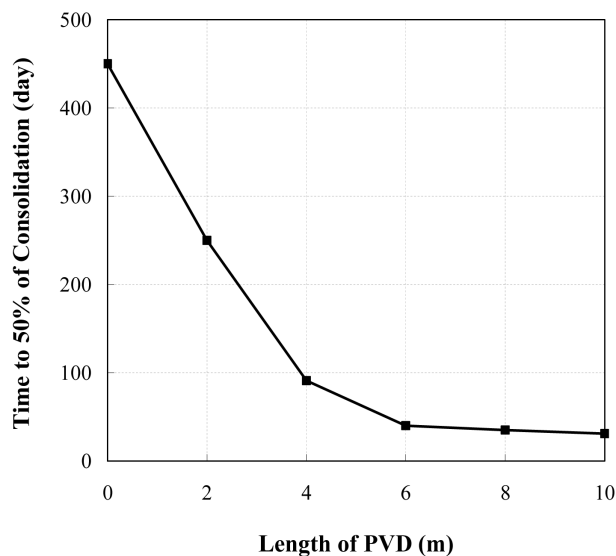
شکل ۲: نتایج درصد تحکیم در طول زمان برای طول‌های مختلف PVD

مقدار نفوذ PVD به داخل خاک در حدود ۸۰ درصد مقدار طراحی باشد، اختلاف زمانی چندانی در عملیات پیش‌بارگذاری به وجود نخواهد آمد.

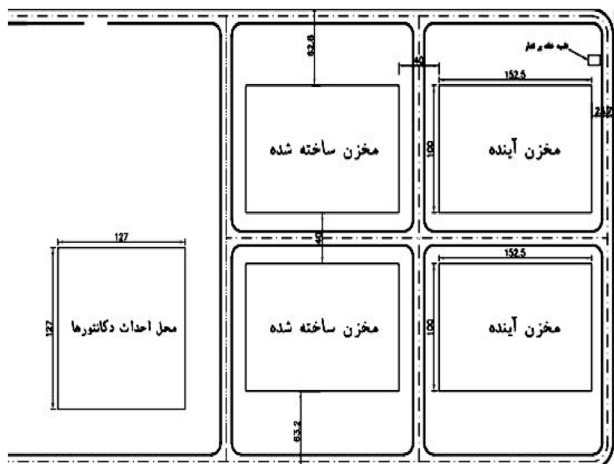
۴- پروژه پیش‌بارگذاری سربندر خوزستان

۴-۱ کلیات و معرفی پروژه

محل این پروژه در شمال غربی شهر سربندر، در حدود ۲۰ کیلومتری شمال غربی منطقه ویژه اقتصادی پتروشیمی ماهشهر و در جنوب استان خوزستان واقع است. همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، این پروژه شامل ۲ مخزن آب زمینی بتنی به ابعاد حدودی 152×100 متر مربع به

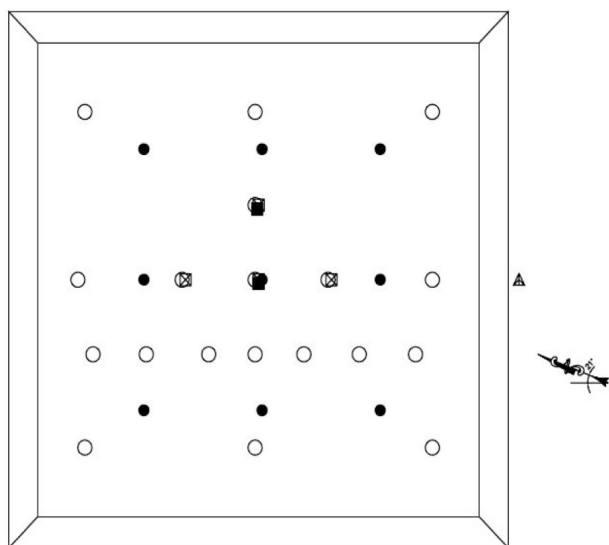


شکل ۳: زمان رسیدن به ۵۰ درصد تحکیم بر حسب طول‌های مختلف PVD



شکل ۵: موقعیت محل احداث مخازن و واحدهای زلال‌ساز (دکانتور) در پروژه پیش‌بارگذاری سربندر خوزستان

در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب نمودارهای زمان رسیدن به ۵۰ و ۹۰ درصد تحکیم نسبت به طول PVD آورده شده است. مشاهده می‌شود که در مورد زمان رسیدن به ۵۰ درصد تحکیم بین مدل‌های با PVD به طول ۱۰، ۸ و ۶ متر اختلاف چندانی وجود ندارد؛ حال آن‌که در مورد زمان رسیدن به ۹۰ درصد تحکیم، نتایج مدل‌های با طول ۱۰ و ۸ متر نزدیک به یکدیگر می‌باشد. بنابراین چنانچه در عمل



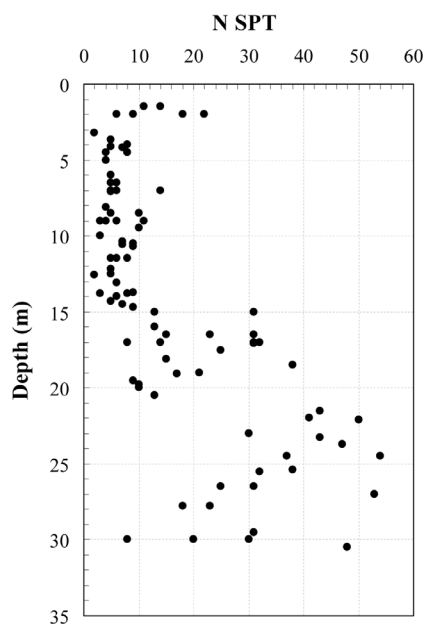
LEGEND

●	Vibrating Wire Piezometer
■	Casagrandeh Piezometer
○	Surface Settlement
⊗	Magnetic Extensometer
▲	Inclinometer

شکل ۷: پلان چیدمان ابزارها در محل واحدهای زلزال ساز پروژه پیش بارگذاری سربندر خوزستان

لایه سوم از حداقل عمق ۲۴ متری شروع و تا انتهای عمق شناسایی (۳۰ متر) از جنس رس سفت تا سخت تشکیل شده است [۱].

نتایج آزمایش صحرایی نفوذ استاندارد در اعماق حاصل از مطالعات ژئوتکنیکی تکمیلی در شکل (۸) آورده شده است. مشاهده می شود که مقادیر عدد نفوذ استاندارد از اعماق ۱۶ متری افزایش یافته که در واقع نشان دهنده لایه ماسه ای در آن عمق می باشد. همچنین در عمق ۲



شکل ۸: نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در پروژه پیش بارگذاری سربندر خوزستان

همراه واحدهای زلزال ساز (دکانتورها) به ابعاد حدودی ۱۳۰×۱۳۰ متر مربع می باشد. تنش های اعمالی به خاک زیر مخازن و واحدهای زلزال ساز به ترتیب حداکثر به ۱۰۰ و ۶۰ کیلو پاسکال برآورد شده است.

بر اساس مطالعات امکان سنجی روش های مختلف بهسازی، روش پیش بارگذاری همراه با زهکش های قائم (PVD) برای این پروژه انتخاب شد. آرایش در نظر گرفته شده برای زهکش های قائم به صورت مثلثی به فواصل ۱/۵ متر طراحی شده که تا حداکثر عمق ۱۴ متری در زمین نصب می شوند. نمای کلی از نصب و آرایش مثلثی زهکش های قائم در پروژه مورد نظر در شکل (۶) نشان داده شده است [۱].



شکل ۶: نمای کلی از نصب و آرایش مثلثی زهکش های قائم در پروژه پیش بارگذاری واحدهای زلزال ساز سربندر خوزستان

به منظور بررسی و کنترل عملکرد عملیات پیش بارگذاری در این پروژه، از ابزارهای مختلفی استفاده شده است. این ابزارها شامل ۱۹ نشست سنج سطحی، ۴ نشست سنج مغناطیسی (برای اندازه گیری نشست در سطح و لایه های مختلف زمین)، ۱۲ پیزومتر تار لرزان (برای اندازه گیری فشار آب حفره ای در دو عمق ۴ و ۱۲ متری) چهار پیزومتر کاساگرانده و یک انحراف سنج می باشد [۱]. پلان چیدمان ابزارها در این پروژه در شکل (۷) نشان داده شده است.

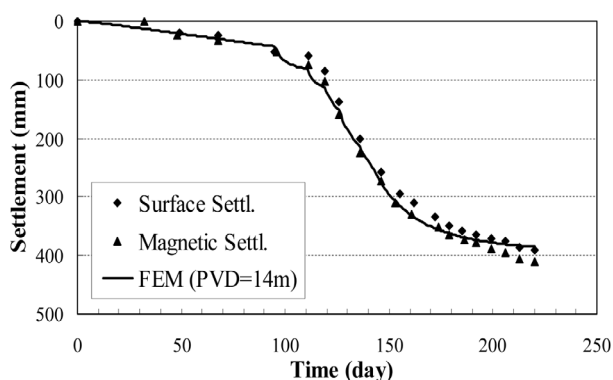
مقدار عمق قابل نفوذ زهکش های قائم در محدوده این پروژه به طور متوسط ۱۴ متر بوده است. اما در ناحیه ای مشخص شده در شکل (۷) با مستطیل خط چین، عمق نفوذ به ۱۰ متر کاهش یافته است.

۴-۲- وضعیت لایه های تحت الارضی

در مطالعات ژئوتکنیکی محدوده پروژه لایه های تحت الارضی در سه لایه طبقه بندی شده اند. لایه اول که از سطح زمین شروع شده و تا عمق ۱۶ متر ادامه می یابد عمدتاً از رس نرم با پلاستیسیته پایین (CL) تشکیل شده است. این لایه بیشترین پتانسیل نشست تحکیمی را دارد. لایه دوم از عمق ۱۶ متر شروع و تا عمق ۲۴ متر ادامه می یابد. این لایه غیرچسبنده و از جنس ماسه سیلتی یا سیلت ماسه ای و دارای میان لایه هایی از جنس رس و رس سیلتی و با ضخامت متغیر تا ۳ متر می باشد.

جدول ۳: مشخصات خاک در مدل عددی کالیبراسیون مربوط به پروژه پیش‌بارگذاری سربندر خوزستان

لایه	Z (متر)	γ_{sat} (کیلو نیوتون بر متر مکعب)	e_0	λ	κ	OCR	k_x (متر بر ثانیه)	k_y (متر بر ثانیه)
۱	۰-۴	۱۹/۵	۰/۷۲	۰/۰۵۲۱	۰/۰۰۴۳	۴/۵	$۱/۵ \times 10^{-9}$	$۷/۵ \times 10^{-10}$
۲	۴-۶	۱۹/۶	۰/۸۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۳/۵	$۱/۵ \times 10^{-9}$	$۷/۵ \times 10^{-10}$
۳	۶-۱۰	۲۰	۰/۸۲	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۷	$۱/۵ \times 10^{-9}$	$۷/۵ \times 10^{-10}$
۴	۱۰-۱۳	۲۰/۲	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۳	۲×10^{-9}	۱×10^{-9}
۵	۱۳-۱۶	۲۰/۲	۰/۷۵	۰/۱۳	۰/۰۲	۱/۴	۱×10^{-9}	۵×10^{-9}
۶	۱۶-۱۹	۱۹/۶	$\nu = ۰/۲$	$E = ۶/۵$ (مگا پاسکال)				



شکل ۱۰: نمودار نشست سطحی خاک در طول زمان برای ابزارها و مدل عددی تقارن محوری

آنچه که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، این است که در ابتدای عملیات خاکریزی بارندگی شدیدی در محل پروژه صورت گرفت و برای خارج ساختن آب ناشی از بارندگی، وقفه‌ای طولانی در پروژه به وجود آمد.

با توجه به نتایج نشست‌سنج‌های مغناطیسی، در عمق ۱۶ متری خاک دارای نشست در حدود ۴۵ میلی‌متر می‌باشد که این نشست هم شامل نشست لایه‌ی ماسه‌ای و هم نشست لایه‌های رس زیرین است. از این رو مقدار مدول الاستیسیته برای لایه‌ی ششم در مدل عددی به گونه‌ای انتخاب شده است که این مقدار نشست حاصل شود.

شکل (۱۰) روند نشست‌ها را در طول زمان در مدل عددی و مقادیر ثبت شده از نشست‌سنج‌های سطحی و مغناطیسی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از مدل عددی بعد از کالیبراسیون همخوانی قابل قبولی با داده‌های این ابزارها دارند.

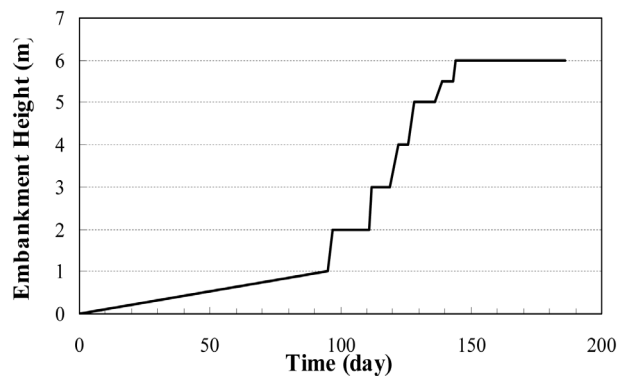
همچنین در نمودار شکل (۱۱) مقدار نشست در اعماق مختلف در طول زمان نشان داده شده است. نحوه‌ی کالیبراسیون لایه‌های مختلف خاک با استفاده از این نمودار بوده است. به این صورت که کالیبره کردن مقدار ضریب پیش‌تحکیمی از لایه‌های زیرین شروع شده و لایه به لایه به لایه‌های فوقانی رسیده است. این نمودار نشان می‌دهد که ۷۰ درصد از نشست کل خاک در محدوده‌ی سطح زمین تا عمق ۱۰ متر بوده است. تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق ۴ و ۱۲ متری در نمودار شکل (۱۲) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در بازه‌ی زمانی

تا ۳ متری نیز افزایشی در عدد نفوذ استاندارد وجود دارد که این مطلب در نتایج آزمایش تحکیم نیز مشاهده شده که در آن مقدار ضریب فشردگی خاک نسبت به لایه‌های زیرین کم‌تر بدست آمده است.

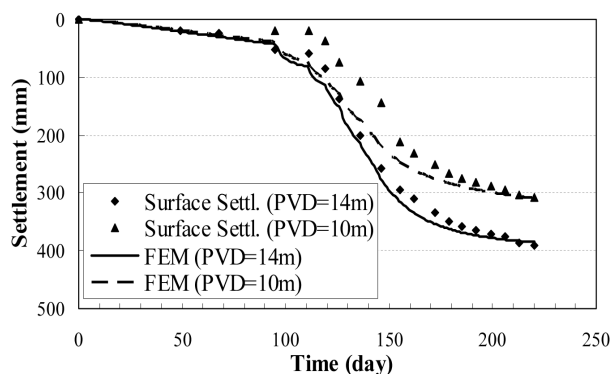
۳-۴- کالیبراسیون مدل عددی با استفاده از داده‌های ابزارگذاری پروژه

با استفاده از داده‌های ابزارهای دقیق پروژه، مدل عددی با لحاظ نمودن شرایط لایه‌بندی کالیبره شده است. با استفاده از پایش داده‌ها در پروژه مورد نظر سعی شده تا عوامل مدل به گونه‌ای دقیق شوند تا مقدار نشست خاک در طول زمان به داده‌های ابزارها نزدیک شوند.

شبه‌بندی مدل عددی در این تحلیل همانند شکل (۱) بوده، با این تفاوت که عمق خاک ۱۹ متر در نظر گرفته شده و به شش لایه تقسیم شده است. پنج لایه‌ی اول از جنس رس بوده (تا عمق ۱۶ متر) و لایه‌ی ششم ماسه‌ای است. مهم‌ترین تفاوت در مشخصات ۵ لایه‌ی اول در ضریب پیش‌تحکیمی می‌باشد. زهکشی از تراز صفر، عمق ۱۶ متری (پایان رس تحکیم‌پذیر و برخورد به لنز ماسه‌ای با نفوذپذیری بسیار بالا در مقایسه با خاک رس) و زهکش قائم (PVD) به عمق ۱۴ متر صورت می‌گیرد. مشخصات خاک در مدل عددی در جدول (۳) آورده شده است. نمودار افزایش خاکریزی در طول زمان در شکل (۹) نشان داده شده است. علت در نظر گرفتن روند خاکریزی برای یک متر اول به صورت



شکل ۹: نمودار خاکریزی در طول زمان در محدوده ابزار انتخابی برای کالیبراسیون مدل عددی



شکل ۱۳: تغییرات نشست‌ها در طول زمان و در دو ناحیه مختلف عمق نفوذ PVD خاک حاصل از مدل عددی و ابزار نشست‌سنج سطحی

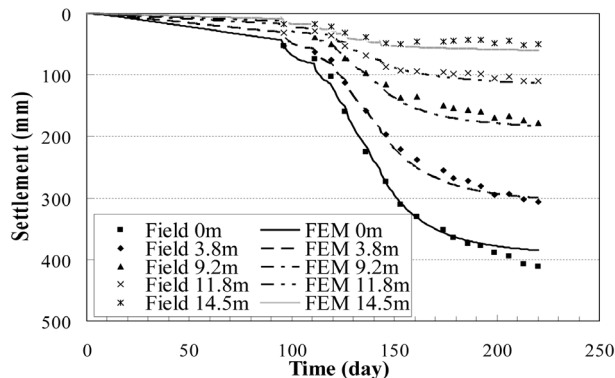
۴-۴- اثر عمق نفوذ زهکش قائم بر روی فرآیند تحکیم خاک در پروژه

در این پروژه و در محدوده‌ی منطقه‌ی مشخص شده در شکل (۶)، مقدار عمق نفوذ زهکش قائم ۱۰ متر است. از عوامل عدم نفوذ زهکش قائم تا عمق مورد نظر طراحی، قدرت کم دستگاه اجرای PVD، بزرگ‌تر بودن ابعاد ماندریل نسبت به استاندارد و برخورد به لایه‌های موضعی سخت را می‌توان نام برد.

به علت نفوذ کم عمق زهکش قائم، مقدار نشست خاک در آن منطقه کم‌تر از سایر نواحی می‌باشد. در شکل (۱۳) نمودار نشست سطحی خاک نسبت به زمان برای کم‌ترین و بیشترین مقدار عمق نفوذ PVD (۱۴ و ۱۰ متر) حاصل از ابزار نشست‌سنج سطح و نتایج مدل عددی رسم شده است. ملاحظه می‌شود که اولاً هم‌خوانی خوبی بین نتایج مدل عددی و داده‌های ابزار در پروژه وجود دارد و ثانیاً به خوبی تأثیر عمق نفوذ PVD بر روی فرآیند تحکیم خاک دیده می‌شود. به این صورت که در یک زمان مشخص، مقدار نشست خاک در منطقه‌ی عمق نفوذ ۱۴ متری زهکش قائم بیشتر از منطقه‌ی دیگر است. همچنین مقدار نشست حداکثر پس از ۲۲۰ روز از شروع عملیات پیش‌بارگذاری در نواحی با عمق نفوذ PVD ۱۴ متر برابر با ۳۹۱ میلی‌متر و در نواحی با عمق نفوذ PVD ۱۰ متر برابر با ۳۰۷ میلی‌متر است.

۵- نتیجه‌گیری

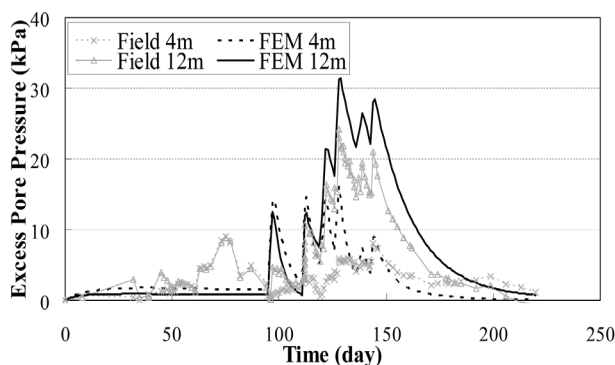
در این مقاله به بررسی اثر عمق نفوذ زهکش قائم بر روی فرآیند تحکیم خاک با استفاده از مدلسازی عددی پرداخته شد. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با تئوری تحکیم، نتیجه‌گیری شد که در مورد زمان رسیدن به ۵۰ درصد تحکیم، چنانچه عمق نفوذ زهکش قائم تا ۶۰ درصد ضخامت لایه‌ی تراکم‌پذیر (همان عمق طراحی PVD) باشد، تأخیر قابل‌توجهی در فرآیند تحکیم به وجود نمی‌آید که این مقدار در مورد زمان رسیدن به ۹۰ درصد تحکیم برابر با ۸۰ درصد ضخامت لایه‌ی تراکم‌پذیر می‌باشد.



شکل ۱۱: تغییرات نشست‌ها در طول زمان و در اعماق مختلف خاک حاصل از مدل عددی و ابزار نشست‌سنج مغناطیسی

۶۰ تا ۹۰ روز، اضافه فشار آبی در خاک به وجود آمده که در نتایج مدل عددی وجود ندارد. این اضافه فشار آب ناشی از بارندگی در آن بازه زمانی است. نکته قابل‌توجه این است که اضافه فشار آب ناشی از بارندگی در دو عمق ۴ و ۱۲ متری به یک مقدار می‌باشد. حال آن‌که در موارد ناشی از خاکریزی، مقدار اضافه فشار به وجود آمده در عمق ۱۲ متری بیشتر از عمق ۴ متری است. به عبارت دیگر در بازه‌ی زمانی بارندگی به نوعی هد آب در تمام لایه‌ها بالا رفته و فشار آب در کل توده‌ی خاک به یک میزان افزایش پیدا کرده است. بنابراین آب جمع‌شده از باران به صورت سرشار عمل نکرده و در این مدت تنش مؤثر در کل خاک ثابت مانده است (ارتفاع آب جمع‌شده نزدیک به یک متر بوده است).

نحوه‌ی کالیبراسیون نفوذپذیری خاک در مدل با استفاده از نمودار شکل‌های (۱۱) و (۱۲) انجام شده است. یعنی مقادیر نفوذپذیری‌ها برای لایه‌های مختلف به گونه‌ای انتخاب گردیده که روند تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در اعماق ۴ و ۱۲ متری مطابق با داده‌های پیزومترهای تار مرتعش شود و به طور همزمان روند نشست‌ها مطابق با داده‌های ابزارهای نشست‌سنج مغناطیسی باشد.



شکل ۱۲: تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در طول زمان و در اعماق ۴ و ۱۲ متری حاصل از مدل عددی و پیزومتر تار لرزان (PVD = متر)

- [2] Moseley, M. P.; "Ground Improvement, Blackie Academic and Professional", An Imprint of Chapman and Hall, 2000.
- [3] Indraratna, B.; and Rujikiatkamjorn, C.; "Effects of Partially Penetrating Prefabricated Vertical Drains and Loading Patterns on Vacuum Consolidation", GeoCongress 2008, New Orleans, ASCE Special Publication 178 (Geosustainability and Geohazard Mitigation, Eds: K. R Reddy, M. V. Khire, A. N. Alshawabkeh), pp. 596-603, 2008.
- [4] Hibbit; Karlsson; and Sorenson; "ABAQUS Standard User's Manual", Published by HKS Inc., 2004.
- [5] Barron, R. A.; "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans. ASCE No. 2346, pp. 718-754, 1948.
- [6] Carillo, N.; "Simple Two-and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", Journal of Mathematics and Physics, Vol. 21, No. 1, pp. 1-5, 1942.
- [7] Roscoe, K. H.; Schofield, A. N.; and Worth, C. P.; "On the Yielding of Soils", Geotechnique 8, pp. 22-53, 1958.
- [8] Rixner J. J.; Kraemer S. R.; and Smith A. D.; "Prefabricated Vertical Drains", Vol. 1-3: Summary of Research Report: Final Report, Federal Highway Administration, Washington DC, Report No. FHWA-RD-86/169, 1986.

در ادامه به مطالعه‌ی موردی پیش‌بارگذاری واحدهای زلال‌ساز سربندر خوزستان پرداخته شد. با توجه به این‌که در این پروژه در مناطقی مقدار عمق نفوذ زهکش قائم در حدود ۶۳ درصد ضخامت لایه‌ی رس تراکم‌پذیر می‌باشد، از این رو در زمان نشست تحکیمی خاک تأخیری به وجود آمده است. مقدار نشست خاک در این ناحیه در حدود ۸۴ میلی‌متر کم‌تر از مناطقی است که عمق نفوذ PVD در حدود ۹۰ درصد ضخامت لایه‌ی رسی است که این موضوع در مدل عددی مربوط به پروژه نیز دیده شد.

نکته‌ی حائز اهمیت در طراحی و اجرای زهکش‌های قائم این است که یکی از عوامل مهم در زمان عملیات پیش‌بارگذاری و فرآیند تحکیم خاک، مقدار عمق نفوذ زهکش قائم در لایه‌ی تراکم‌پذیر می‌باشد. بنابراین لازم است در هنگام اجرای زهکش قائم تمهیداتی اندیشیده شود تا زهکش قائم حداقل تا ۸۰ درصد عمق مورد نظر در طراحی، اجرا شود.

۶- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از واحد مهندسی منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر که تسهیلات مالی بکارگیری ابزارهای گسترده‌ای را در این پروژه فراهم نمود، تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین مؤلفین از شرکت‌های مهندسی مشاور تهران بوستن و ژئومحیط پارس برای در اختیار گذاشتن اطلاعات برای این پژوهش سپاسگزارند.

۷- مراجع

- [۱] گزارش مرحله اول پروژه پیش‌بارگذاری مخازن و واحد تصفیه‌خانه سربندر، شرکت مهندسی مشاور ژئومحیط پارس، ۱۳۸۸.