نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۹ شماره ۲صفحه‌های ۱۹۹ تا ۲۱۲ / سال ۱۳۹۸

اثر وجود عدم‌قطعیت در قابلیت فشردگی خاک بر تغییرات زمانی فشار آب منفذی در پی سازه

امیر ملک پور[1]*، ستاره فروخ رو[2]، مهدیه حسینی[2]

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانش آموخته گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: malekpour.amir@gmail.com

چکیده

با توجه به عدم‌قطعیت و تغییرات مکانی مقادیر پارامترهای تحکیمی خاک و تاثیر آن بر فشار آب منفذی حین نشست در پی سازه، امروزه کاربرد روش‌های احتمالاتی مبتنی بر عدم‌قطعیت در تحلیل چنین مسائلی رایج می‌باشد. در تحقیق حاضر، نقش عدم-قطعیت قابلیت فشردگی حجمی خاک به عنوان یکی از عوامل موثر بر تغییرات زمانی فشار آب منفذی حین تحکیم در ناحیه شفت استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌برداری خاک از ۹ گمانه (مربوط به پی یک سازه فولادی و محوطه آن واقع در حومه شهرستان شفت) انجام شد و با آزمایش تحکیم، توزیع لوگ‌نرمال پارامتر قابلیت فشردگی حجمی خاک به دست آمد. سپس یک برنامه رایانه‌ای در محیط MATLAB برای تحلیل احتمالاتی معادله دیفرانسیل تحکیم به روش مونت‌کارلو توسعه داده شد. طبق نتایج، با افزایش تعداد نمونه تصادفی (ضریب قابلیت فشردگی) در روش مونت‌کارلو از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ نمونه، تغییر قابل توجهی در نتایج مشاهده نگردید. در حالیکه کشیدگی منحنی‌های چگالی احتمال با زمان، حاکی از نقش قابل توجه گذشت زمان در افزایش عدم‌قطعیت فشار آب منفذی می‌باشد. همچنین در یک عمق معین، ضخامت بیشتر لایه خاک مورد بررسی منجر به افزایش عدم‌قطعیت نتایج گردید. با ۲ برابر شدن عمق نقطه مورد بررسی و ضخامت لایه خاک، چگالی احتمال بیش از ۲۰ برابر افزایش یافت. در نهایت بیش‌ترین افزایش ضریب تغییرات فشار آب منفذی طی ۱۰۰ روز در لایه خاک به ضخامت ٤ متر برابر ۲/۱۵ درصد و در لایه خاک با ضخامت ١٦ متر کمتر از ۰/۲۵ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل احتمالاتی، توزیع لوگ‌نرمال، روش مونت کارلو، نشست تحکیمی خاک، نمونه‌برداری خاک

Effect of Uncertainty of Soil Compressibility on Temporal Variations of Pore-Water Pressure at the Foundation of Structure

A Malekpour[1*], S Farookhroo[2], M Hosseini[2]

Received: August 23, 2017 Accepted: December 16, 2018

[1]Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Univ. of Guilan, Rasht, Guilan, Iran
[2]Graduated Student, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Univ. of Guilan, Rasht, Guilan, Iran
* Corresponding Author, Email: malekpour.amir@gmail.com

Abstract

Today, as a result of the uncertainty and spatial variations of soil consolidation parameters and their effects on the pore-water pressure during the foundation settlement, it is common to apply the uncertainty-based probabilistic methods in such problems. In current study, the role of uncertainty of soil volumetric compressibility, as one of the effective factors on temporal variations of pore-water pressure during consolidation was investigated in Shaft region of Guilan province. In this respect, soil sampling was carried out in 9 bore holes (at the foundation of a steel structure and its yard located in Shaft town). Following the consolidation experiments, the log-normal distribution of soil volumetric compressibility was derived. Then, a computer code was developed in MATLAB to probabilistically analyze the partial differential equation of consolidation using Monte-Carlo simulation method. According to the results, increasing the number of random samples (of compressibility coefficient) from 100 to 1000 caused negligible effects. Whereas, the widening of probability density curves with time implies the dramatic effect of time on increasing the uncertainty of pore-water pressure. Meanwhile, for a given depth, the increased thickness of investigated soil layer caused greater uncertainty of pore-water pressure. Doubling the soil depth and investigated thickness of soil layer led to the increase of probability density by more than 20 times. Finally, during 100 days, the greatest temporal increase in coefficient of variation of pore-water pressure was obtained equal to 2.15 and 0.25 percent for 4- and 16-meters thick layers of soil, respectively.

Keywords: Consolidation settlement of soil, Log-normal distribution, Monte-Carlo method, Probabilistic analysis, Soil sampling

مقدمه

وقتی بارهای سازه‌ای بر پی‌های متشکل از خاک‌های ریزدانه اشباع اعمال می‌شوند، موجب تغییرات زمانی و کاهش فشار آب منفذی و در نتیجه نشست تحکیمی خاک می‌گردند. از پیامدهای پدیده تحکیم خاک می‌توان به نشست و تخریب ساختمان‌ها، شکستگی لوله‌های آب‌رسانی و تخریب پوشش آسفالتی جاده‌ها اشاره نمود. علاوه بر بارهای سازه‌ای، درکشور ایران یکی از دلایل مهم وقوع نشست تحکیمی در اراضی، کاهش فشار آب منفذی ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد (لشگری پور و همکاران ۱۳۸٤). در بررسی اثر بارگذاری بر تغییرات فشار آب منفذی در خاک‌های ریزدانه، عوامل عدم-قطعیت مختلفی وجود دارند که به عنوان یکی از مهم‌ترین آنها می‌توان به عدم‌قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اشاره نمود (وانگ و همکاران ۲۰۱۵، کئون ۲۰۱٦، چناری و نوری ۲۰۱۷). از این رو امروزه بسیاری از محققین استفاده از روش‌های تحلیل احتمالاتی بر مبنای عدم‌قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی را جایگزین روش‌های قطعی نموده-اند. به عنوان مثال، بداوی و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیق خود با ترکیب روش لایه نازک (TLM) و روش احتمالاتی شبیه-

سازی مونت‌کارلو به بررسی تحکیم اولیه در خاک‌های غیرهمگن دارای خصوصیات تصادفی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ویژگی غیرهمگنی به‌طور چشم‌گیر بر تحکیم اولیه‌ی خاک موثر می‌باشد. به این ترتیب که غیرهمگنی موجب تاخیر در کاهش فشار آب منفذی و در

نتیجه تاخیر در فرایند تحکیم می‌شود. گریفیتس و فنتون (۲۰۰۹) به بررسی نشست پی‌های نواری واقع بر خاک‌های دارای خصوصیات متغیر با استفاده از مدل‌های اجزای محدود پرداختند. آنها روش اجزای محدود تصادفی مبتنی بر روش گشتاور دوم مرتبه اول (FOSM) را با روش اجزای محدود تصادفی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقایسه نمودند. نتایج تحقیق آنها به بیان معایب هر یک از روش‌های احتمالاتی در اعمال همبستگی مکانی متغیرها پرداخت. هوانگ و همکاران (۲۰۱۰) تئوری تحکیم بایوت[1] را با روش اجزای محدود تصادفی ترکیب نموده و رفتار تحکیمی نهشته‌های خاکی دارای خصوصیات متغیر مکانی را به صورت یک‌بعدی و دو بعدی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که تاثیر انحراف استاندارد و همبستگی مکانی بر درجه تحکیم و فشار آب منفذی در خاک‌های غیرهمگن متفاوت می‌باشد. وو و همکاران (۲۰۱۱) نشست تحکیمی و فشار آب منفذی را در فرآیند ساخت چند مرحله‌ای خاک‌ریز در شرایط کاربرد زه‌کش‌های قائم بررسی نمودند. آنها با استفاده از مدل‌های موجود سرعت تحکیم، نشست خاک و عدم قطعیت در پیش بینی مقادیر آنها را ارزیابی نموده و به بررسی و مقایسه مهم‌ترین عوامل عدم‌قطعیت پرداختند. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) از ترکیب روش‌های LS-SVM و مونت‌کارلو به منظور تحلیل احتمالاتی نشست پی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش ترکیبی بکار رفته قابلیت کاربرد مناسبی در تحلیل نشست پی در خاک‌های نرم دارد.

در میان روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت بکار رفته در تحقیقات مذکور، روش مونت‌کارلو به دلیل سهولت اجرا و توان بالای پردازش رایانه‌های امروزی همواره مورد توجه بوده است (وانگ و همکاران ۲۰۱۰). از سوی دیگر در بررسی تغییرات فشار آب منفذی در حین تحکیم، ضریب تحکیم خاک به عنوان پارامتری تاثیرگذار شناخته می‌شود. عوامل مختلفی بر مقدار ضریب تحکیم خاک موثر می‌باشند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به هدایت هیدرولیکی خاک، وزن مخصوص آب و ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک اشاره نمود. عدم قطعیت کمیت‌های هدایت هیدرولیکی و قابلیت فشردگی حجمی خاک علاوه بر تاثیر در زمینه نشست تحکیمی خاک، در حوزه کشاورزی نیز از لحاظ تاثیر بر میزان سهولت دسترسی ریشه گیاه به آب حائز اهمیت می‌باشند. با توجه به دقت نتایج روش احتمالاتی مونت‌کارلو و مقبولیت آن در میان محققان، در تحقیقات گذشته، تاثیر تعداد داده‌های تصادفی ضریب قابلیت فشردگی حجمی بر تغییرات زمانی توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی در حین بارگذاری و تحکیم خاک به روش مونت‌کارلو مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو تحقیق حاضر به بررسی این موضوع پرداخته و در این راستا، نقش عوامل مختلف شامل زمان (از آغاز فرایند تحکیم)، ضخامت لایه خاک مورد نظر و تعداد داده‌های تصادفی (برداشت شده از توزیع احتمالاتی ضریب قابلیت فشردگی حجمی) و تاثیر آنها بر تحلیل احتمالاتی فشار آب منفذی در حین فرآیند تحکیم خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا با استفاده از نمونه‌های مختلف خاک به دست آمده (از پی یک سازه فولادی و محوطه آن در حومه شهرستان شفت استان گیلان)، توزیع احتمالاتی ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک تعیین می‌گردد. سپس با توسعه برنامه رایانه‌ای در MATLAB، تحلیل احتمالاتی تغییرات زمانی فشار آب منفذی به روش مونت‌کارلو، به ازای ضخامت‌های مختلف لایه خاک مورد بررسی در پی و در اعماق گوناگون انجام می‌شود. در انتها میزان تاثیر عدم‌قطعیت قابلیت فشردگی خاک بر عدم‌قطعیت فشار آب منفذی با زمان، در سناریوهای مختلف مطالعه و نتیجه‌گیری می‌گردد.

تغییرات زمانی فشار آب منفذی ناشی از تحکیم

هنگامی که پی سازه متشکل از خاک‌های ریزدانه اشباع است، تنها ظرفیت باربری مناسب خاک عامل پایداری سازه نمی‌باشد و به دلیل وقوع نشست تحکیمی ناشی از کاهش فشار آب منفذی با زمان، پایداری سازه به طور تدریجی در خطر قرار می‌گیرد (سان ۲۰۱۰)، که این مسأله ضرورت بررسی تغییرات زمانی فشار آب منفذی در خاک‌های

[1]. Biot

ریزدانه را برجسته می‌نماید. در این خصوص معادله دیفرانسیل حاکم بر تغییرات فشار آب منفذی در حین تحکیم یک‌بعدی خاک را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱ بیان نمود (ترزاقی ۱۹۹۶).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad [۱]$$

که u، z و t بترتیب فشار آب منفذی، عمق و زمان می‌باشند. c_v ضریب تحکیم و برابر $k/\gamma_w m_v$ است که k، γ_w و m_v به ترتیب هدایت هیدرولیکی، وزن مخصوص آب و ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک می‌باشند. در این میان، پارامترهای حاصل از آزمایش تحکیم شامل ضریب فشردگی (C_c) و ضریب قابلیت فشردگی حجمی (m_v)کمیت‌های مهمی هستند که دارای عدم‌قطعیت بوده و طبق رابطه ۲ مقدار آنها تابعی از تغییرات تنش موثر ایجاد شده در خاک می‌باشد.

$$m_v = \frac{\left(\frac{\Delta e}{1+e_0}\right)}{\Delta\sigma'} \qquad [۲]$$

$$C_c = \Delta e / log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

که e_0، Δe، $\Delta\sigma'$ و σ_0 بترتیب نسبت تخلخل اولیه خاک، تغییرات نسبت تخلخل (ناشی از بارگذاری خاک)، تغییرات تنش موثر و تنش اولیه می‌باشند. در تحقیق حاضر از پارامتر m_v در انجام تحلیل‌ها استفاده می‌گردد.

عدم‌قطعیت در تحکیم خاک‌های ریزدانه

به دلیل عدم‌قطعیت ناشی از تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای تحکیمی در خاک‌های ریزدانه، امروزه کاربرد توزیع‌های احتمالاتی این پارامترها در تجزیه و تحلیل چنین خاک‌هایی رواج یافته است. بدین منظور لازم است توزیع احتمالاتی مناسب پارامتر موردنظر در تحلیل احتمالاتی تعیین گردد. طبق تحقیقات انجام شده که خلاصه‌ای از آنها در جدول ۱ آورده شده است، پارامترهای ژئوتکنیکی در خاک‌های ریزدانه به طور عمده از توزیع‌های نرمال و لوگ-نرمال تبعیت می‌کنند (وانگ و همکاران ۲۰۱۵).

جدول ۱- توزیع احتمالاتی مناسب برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه (وانگ و همکاران ۲۰۱۵)

ویژگی خاک	نوع خاک	توزیع احتمالاتی
مقاومت برشی زهکشی نشده	رس	نرمال، لوگ نرمال
حد خمیری	رس	نرمال
حد روانی	رس	نرمال
شاخص خمیری	رس	نرمال
وزن مخصوص مستغرق	تمام خاک‌ها	نرمال
ضریب تحکیم	رس	نرمال، لوگ نرمال
شاخص فشردگی	رس ماسه‌ای	نرمال

همان‌گونه که مشاهده می‌شود برخی از این پارامترها همچون ضریب تحکیم تابعی از دو توزیع نرمال و لوگ‌نرمال می‌باشند. در شرایطی که با توجه به سیستم آحاد بکار رفته، پارامتر مورد بررسی دارای مقادیر بسیار کوچک باشد استفاده از توزیع لوگ‌نرمال توصیه می‌گردد. زیرا کاربرد توزیع نرمال موجب ظهور مقادیر منفی برای پارامتر ژئوتکنیکی مورد نظر می‌شود که با ماهیت فیزیکی آن کمیت در تناقض است. با توجه اینکه مقدار ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک ریزدانه در سیستم SI کوچک می‌باشد، در تحقیق حاضر از توزیع لوگ‌نرمال به منظور بررسی اثر عدم‌قطعیت این کمیت استفاده شد. رابطه‌های ۳ و ٤ بترتیب

توابع لوگ‌نرمال چگالی احتمال[۲](PDF) و توزیع احتمال تجمعی[۳](CDF) مربوط به ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک را نشان می‌دهند.

$$PDF(m_v) = \frac{1}{m_v.\sigma_{\log}.\sqrt{2\pi}} . e^{-\frac{(\ln m_v - \mu_{\log})^2}{2\sigma^2}} \qquad [۳]$$

$$CDF(m_v) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} erf\left(\frac{\ln m_v - \mu_{\log}}{\sqrt{2}\sigma_{\log}}\right) \qquad [٤]$$

که $\mu_{\log}$ و $\sigma_{\log}$ بترتیب میانگین و انحراف استاندارد توزیع لوگ‌نرمال می‌باشند و از روابط ٥ و ٦ بدست می‌آیند.

$$\mu_{\log} = e^{(\mu + \frac{\sigma^2}{2})} \qquad [٥]$$

$$\sigma_{\log} = \left(e^{(\sigma^2)} - 1\right) e^{(2\mu + \sigma^2)} \qquad [٦]$$

μ و σ بترتیب میانگین و انحراف استاندارد مربوط به توزیع نرمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک می‌باشند. همچنین در رابطه (٤)، erf تابع انتگرالی خطا می‌باشد که برای هر متغیر x از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

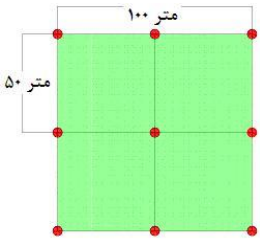
$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \qquad [۷]$$

مواد و روش‌ها

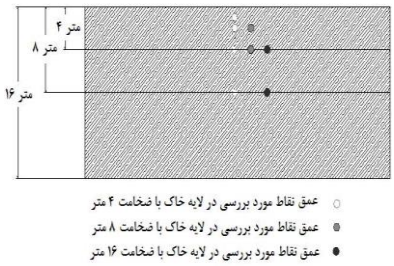
منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، به منظور بررسی اثر عدم‌قطعیت ضریب قابلیت فشردگی حجمی، نمونه‌های خاک از زمینی به وسعت تقریبی یک و نیم هکتار در پیرامون شهر شفت در استان گیلان جمع‌آوری و تحت آزمایش تحکیم قرار گرفت. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین نمونه-برداری خاک از گمانه‌های به فواصل ٥٠ متر طبق الگوی شکل ۲ (استاندارد IS ۱۹۸۱) انجام شد. در هر گمانه، نمونه-ها در فواصل عمقی دو متر تا عمق ۸ متر برداشت گردیدند. از ۹ گمانه و ٦ عمق و از هر عمق یک نمونه خاک دست - خورده (مجموعا ٥٤ نمونه) به روش SPT به دست آمد. نمونه‌های به دست آمده پس از بازسازی در آزمایشگاه تحت آزمایش تحکیم قرار گرفتند. حجم نمونه‌ها ۲۳٥ سانتی‌متر مکعب (قطر و ارتفاع نمونه بترتیب ٥٠ و ۱۲ میلی‌متر) بودند. سپس نمونه‌ها تحت آزمایش تحکیم با فشارهای مختلف در محدوده ۱ تا ٤ کیلوگرم بر سانتی متر مربع قرار گرفتند و به ازای هر بارگذاری ضریب قابلیت فشردگی حجمی تعیین گردید. در شکل ۲ منحنی‌های دانه‌بندی نمونه‌های خاک برداشت شده از میانه گمانه‌های مختلف به عنوان نمونه نشان داده شده است.

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه



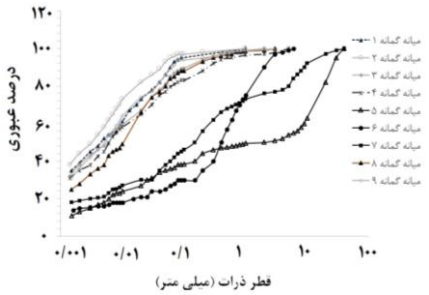
الف



ب

---

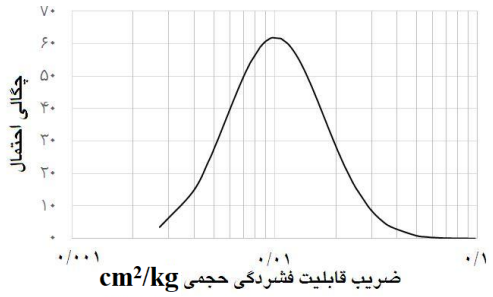
[2] . Probability Density Function
[3] . Cumulative Distribution Function



ج

شکل ۲- الف) آرایش گمانه‌ها ب) موقعیت اعماق مورد بررسی در هر گمانه به ازای ضخامت‌های مختلف لایه خاک ج) منحنی دانه‌بندی نمونه‌های خاک از هر گمانه

در یکی از نمونه‌ها به عنوان مثال به ازای نسبت تخلخل اولیه e_0 =۰/٦٦٧، با افزایش بارگذاری از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلوپاسکال ، کاهش نسبت تخلخل به ۰/٦٤٥ به دست آمده و ضریب قابلیت فشردگی حجمی از رابطه ۲ برابر با ۰/۰۱۳ cm^2/kg تعیین گردید. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، توزیع لوگ نرمال چگالی (فراوانی) احتمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی در کلیه شرایط بارگذاری جهت استفاده در تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو به دست آمد (شکل ۳). در شکل ۳، هر چه منحنی هموارتر و دارای قله کوتاه‌تر باشد، نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک می‌باشد. نقاطی که در ناحیه میانی محور X قرار می‌گیرند تعداد فراوانی بیشتری و به عبارت دیگر شانس بیشتری برای انتخاب شدن در تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو دارند.



شکل ۳- توزیع لوگ‌نرمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی نمونه‌های خاک

تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو

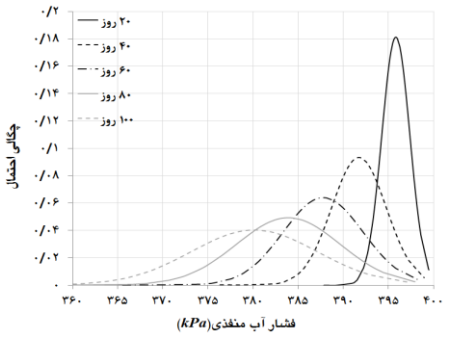
در این تحقیق، برای انجام تحلیل احتمالاتی به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک برنامه رایانه‌ای در محیط MATLAB توسعه داده شد و توزیع لوگ‌نرمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک به عنوان متغیر مورد بررسی تحلیل عدم‌قطعیت در برنامه فراخوانی گردید. از توزیع لوگ-نرمال فراخوانی شده تعداد ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی با دستور *lognrnd* برداشت شده و به صورت دو سناریو مختلف در تعیین ضریب تحکیم c_v استفاده گردید. سپس مقادیر ضریب تحکیم به دست آمده، در حل عددی رابطه ۱ به روش تفاضل محدود ضمنی استفاده گردید. رابطه ۸ فرم گسسته‌سازی رابطه ۱ به روش تفاضل محدود ضمنی را ارائه می‌نماید.

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \frac{c_v.\Delta t}{\Delta z^2}(u_{i-1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i+1}^{n+1}) \qquad [۸]$$

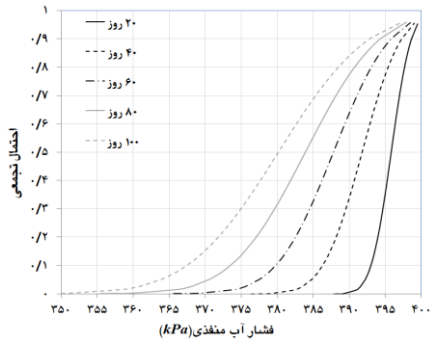
که بالانویس n و $n+1$ به ترتیب نشان‌دهنده مقدار فشار آب منفذی اولیه و فشار آب منفذی پس از گذشت زمان Δt می-باشند. پایین‌نویس i، $i+1$ و $i-1$ به ترتیب نشان‌دهنده فشار آب منفذی در عمق مورد نظر (اعماق ۱، ۲، ٤ و ۸ متر)، نقطه-ای با عمق بیشتر ($+\Delta z$) و نقطه‌ای با عمق کمتر($-\Delta z$) می‌باشند. در حل رابطه ۸، شرایط اولیه در تمام لایه خاک به صورت فشار آب منفذی برابر با میزان بارگذاری در آزمایش تحکیم (در شرایط اشباع بودن نمونه خاک) لحاظ گردید. همچنین با توجه به زهکشی از دو سمت نمونه خاک در حین بارگذاری، شرایط مرزی به صورت فشار آب منفذی صفر در بالا و پائین نمونه خاک در نظر گرفته شد. سپس با کاربرد شبیه‌سازی مونت‌کارلو، توزیع‌های چگالی احتمال و احتمال تجمعی فشار آب منفذی (به ازای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی به دست آمده از توزیع احتمالاتی ضریب قابلیت فشردگی حجمی) به فواصل زمانی ۲۰ روز (تا ۱۰۰ روز) و در اعماق ۱، ۲، ٤ و ۸ متر به دست آمد. سپس تغییرات مقادیر متوسط ضریب قابلیت فشردگی حجمی و فشار آب منفذی نسبت به عمق خاک تعیین گردید. در نهایت روند ضریب تغییرات فشار آب منفذی ($CoV = \sigma_{\log} / \mu_{\log}$) به ازای سناریوهای مطالعه شده بررسی گردید که نتایج در بخش نتایج و بحث ارائه می‌گردد.

نتایج و بحث

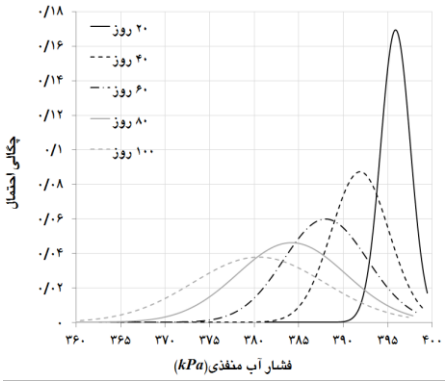
در این بخش تحلیل احتمالاتی تغییرات زمانی فشار آب منفذی در حین تحکیم به ازای ضخامت‌های مختلف لایه خاک پی و در اعماق مختلف ارائه می‌گردد. به عبارت دیگر در زمان‌ها و اعماق مختلف، اثر عدم‌قطعیت قابلیت فشردگی حجمی خاک بر توزیع چگالی احتمال (PDF) و توزیع احتمال تجمعی (CDF) فشار آب منفذی بیان می‌شود. شکل ٤ تغییرات زمانی فشار آب منفذی در عمق ۱ متر برای لایه خاک با ضخامت ٤ متر را نشان می‌دهد. در این شکل، بخش‌های ٤-الف و ٤-ب بترتیب توابع چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی فشار آب منفذی به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی به روش مونت‌کارلو را ارائه می‌نمایند. همان‌گونه که در شکل ٤-الف مشاهده می‌شود با کاربرد توزیع لوگ‌نرمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی، تغییرات زمانی فشار آب منفذی به توزیع نرمال نزدیک می‌باشد.



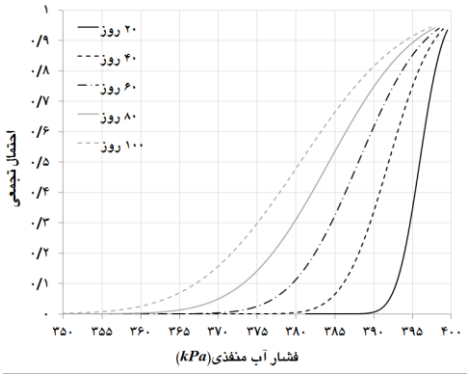
الف) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ب) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ج) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

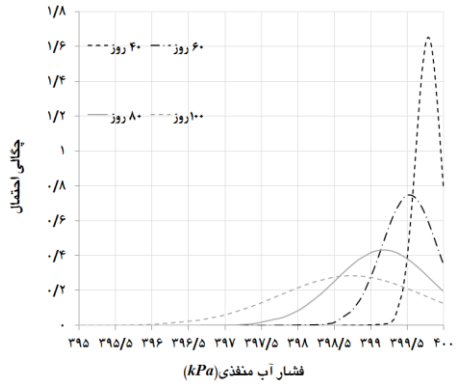


د) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

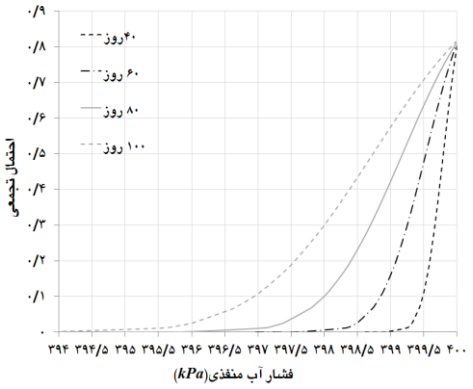
شکل ۴- توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۱ متر (ضخامت لایه خاک ۴ متر)

همچنین با افزایش زمان، منحنی‌ها دارای قله ملایم‌تر و پهنای بیشتر می‌گردند که بیانگر افزایش عدم‌قطعیت مقدار فشار آب منفذی با افزایش زمان تحکیم می‌باشد. در شکل ٤-ب مشاهده می‌گردد که در سطح احتمال ۹۰ درصد پس از گذشت ۱۰۰ روز فشار آب منفذی از ٤۰۰ به مقادیر کمتر از ۳۹۵ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد. در شکل‌های ٤-ج و ٤-د مشاهده می‌گردد که با افزایش نمونه تصادفی ضریب قابلیت فشردگی در شبیه‌سازی مونت کارلو (به ۱۰۰۰ نمونه) نتایج نزدیک به شکل‌های ٤-الف و ٤-ب به دست می‌آید. شکل ٥ توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی در عمق ۲ متر لایه خاک به ضخامت ٤ متر را به فواصل زمانی ۲۰ روز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز مشابه شکل ٤ منحنی‌های توزیع احتمال فشار آب منفذی با گذشت زمان هموارتر و دارای قله کوتاه‌تر می‌باشند. طبق منحنی‌های شکل ٥، در عمق ۲ متر احتمال اینکه فشار آب منفذی پس از ۱۰۰ روز کمتر از ۳۹۵ کیلوپاسکال باشد کمتر از ۲ درصد است.

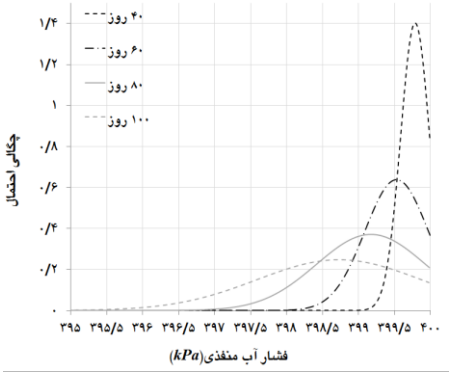
این مسأله نشان‌دهنده وجود خاک ریزدانه بسیار سنگین با قابلیت نگهداری بالای آب می‌باشد. به این دلیل با افزایش عمق، قابلیت زه‌کشی تا حد زیادی کاهش می‌یابد. همچنین در مقایسه شکل‌های ٤-الف و ٤-ج با شکل‌های ٥-الف و ٥-ج مشاهده می‌شود که با افزایش عمق مورد بررسی از ۱ متر به ۲ متر، در زمان‌های آغازین، منحنی‌های توزیع احتمال فشار آب منفذی دارای قله تیز و چگالی احتمال بیشتر می‌باشند. چگالی احتمال بیشتر در منحنی‌های شکل ٥ می‌تواند ناشی از قطعیت بیشتر نتایج به دلیل تاخیر زمانی در آغاز فرایند زه-کشی در اعماق بیشتر خاک و تغییرات کمتر فشار آب منفذی در بازه زمانی معین نسبت به عمق‌های کم باشد.



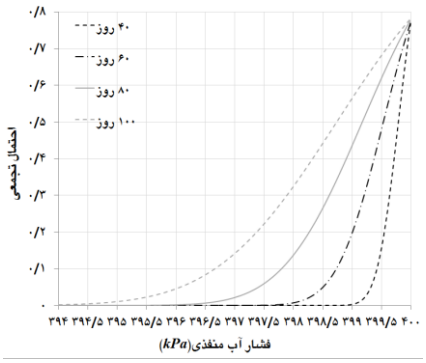
الف) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ب) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ج) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

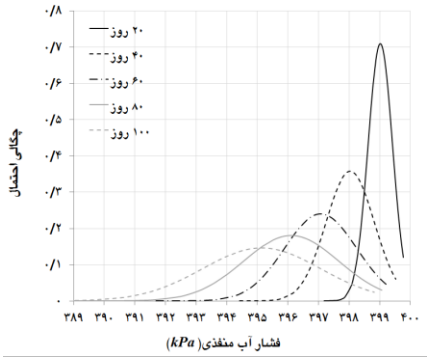


د) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

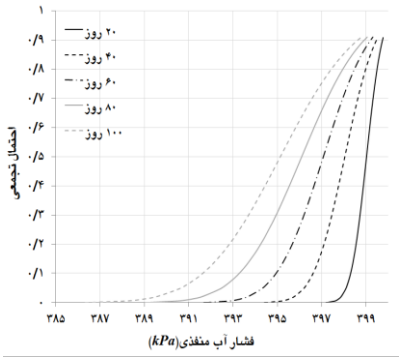
شکل ٥- توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۲ متر (ضخامت لایه خاک ۴ متر)

به منظور بررسی همزمان تاثیر ضخامت لایه خاک پی و عمق نقطه مورد بررسی، در شکل ٦ توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۲ متر (مشابه شکل ٥) اما به ازای ضخامت لایه خاک ۸ متر نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های ٥ و ٦ نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه خاک، در عمق معین ۲ متر چگالی احتمال کاهش می‌یابد. این مسأله حاکی از آن است که با افزایش ضخامت لایه خاک، عدم‌قطعیت در تعیین مقادیر فشار آب منفذی ناشی از بارگذاری خاک در یک عمق معین افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، دامنه تغییرات مقادیر محتمل فشار آب منفذی با افزایش ضخامت لایه خاک افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت لایه خاک و وجود عدم‌قطعیت در تعیین قابلیت فشردگی خاک، ضریب تغییرات (CoV) فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. در شکل ۷ به ازای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی برداشت شده از توزیع لوگ‌نرمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی، نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو و توزیع‌های احتمالاتی فشار آب منفذی در عمق ٤ متر (در میانه لایه خاک به ضخامت ۸ متر) نشان داده شده است. در شکل‌های۷-الف و ۷-ج نسبت به شکل‌های ٦-الف و ٦-ج، افزایش قابل ملاحظه چگالی احتمال مشاهده می‌شود. به

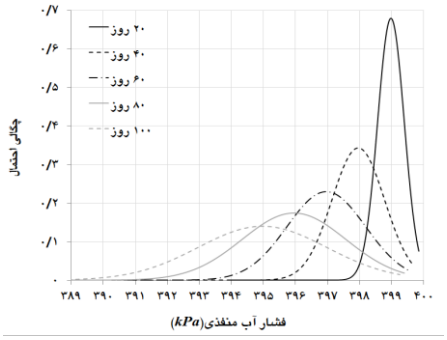
عبارت دیگر با دو برابر شدن عمق نقطه مورد بررسی از ۲ متر (شکل ٦) به ٤ متر (شکل ۷) و ۲ برابر شدن ضخامت لایه خاک مورد بررسی از ٤ متر (شکل‌های ٤ و ٥) به ۸ متر (شکل‌های ٦ و ۷)، چگالی احتمال بیش از ۲۰ برابر افزایش می‌یابد. این مساله بیانگر کاهش عدم‌قطعیت و به عبارت دیگر نشان‌دهنده تاثیر افزایش ضخامت لایه خاک و عمق مورد بررسی بر کاهش تغییرات فشار آب منفذی با زمان می‌باشد. بنابراین افزایش قابل توجه چگالی احتمال بر کاهش احتمال تغییرات زمانی فشار آب منفذی در ضخامت‌های زیاد پی و اعماق بیشتر دلالت می‌نماید.



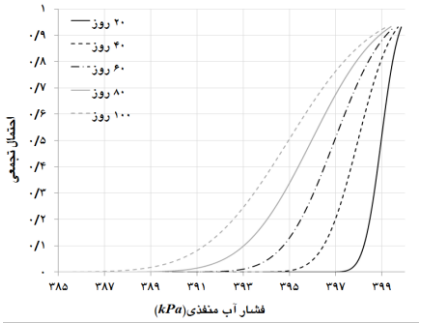
الف) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ب) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ج) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

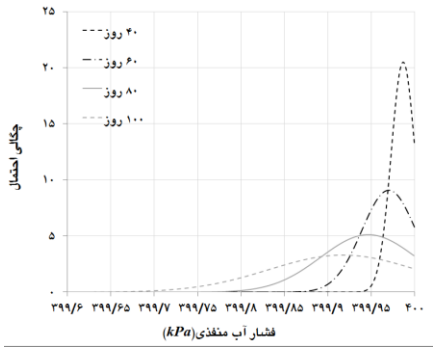


د) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

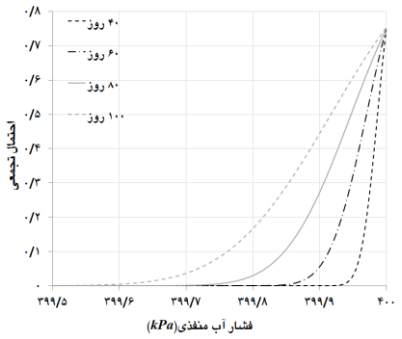
شکل ۶- توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۲ متر (ضخامت لایه خاک ۸ متر)

همچنین به ازای افزایش تعداد نمونه تصادفی ضریب قابلیت فشردگی حجمی از ۱۰۰ (شکل ۷-الف) به ۱۰۰۰ نمونه (شکل ۷-ج)، محدوده مقادیر محتمل فشار آب منفذی اندکی کاهش یافته و چگالی احتمال افزایش می‌یابد که حاکی از کاهش جزئی عدم‌قطعیت با افزایش تعداد نمونه می‌باشد. از مقایسه شکل‌های ۷-ب و ۷-د نتیجه می‌شود که در بازه زمانی مورد بررسی احتمال وقوع زه‌کشی و کاهش فشار آب منفذی در میانه لایه ۸ متری کمتر از ۰/۸ (۸۰ درصد) می‌باشد. شکل ۸ توزیع فشار آب منفذی در عمق ٤ متر را با افزایش ضخامت لایه مورد بررسی پی به ١٦ متر نشان می‌دهد. در مقایسه با نتایج شکل ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه خاک به ١٦ متر، در عمق معین ٤ متر سرعت تحکیم افزایش یافته و چگالی احتمال کاهش می‌یابد (شکل‌های ۸-الف و ۸-ج). به عبارت دیگر با افزایش ضخامت لایه خاک، در اعماق کم زه‌کشی با سرعت بیشتر و در اعماق زیاد، زه‌کشی با سرعتی به مراتب کمتر از لایه خاک با ضخامت‌های کم رخ می‌دهد. همچنین مقایسه شکل ۸-ب و ۸-د نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه خاک مورد بررسی، منحنی‌های احتمال تجمعی مشابه یکدیگر می‌باشند. به عبارت دیگر در روش مونت‌کارلو با افزایش ضخامت لایه مورد بررسی، نتیجه کاربرد تعداد بیشتر نمونه تصادفی از توزیع احتمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی (۱۰۰۰ نمونه) مشابه با تعداد نمونه کم (۱۰۰ نمونه) می‌باشد.

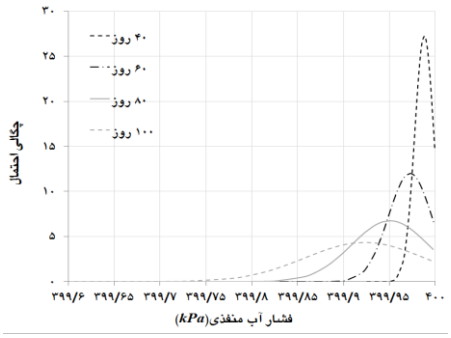
شکل ۹ توزیع احتمال فشار آب منفذی در میانه لایه خاک به ضخامت ۱۶ متر را نشان می‌دهد. در این حالت به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی بیش‌ترین چگالی احتمال در شکل ۹-الف مشاهده می‌شود. در این شرایط احتمال تغییر فشار آب منفذی پس از ۱۰۰ روز به کمتر از ۸۰ درصد می‌رسد.



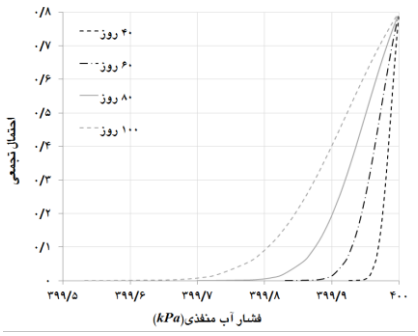
الف) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ب) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی

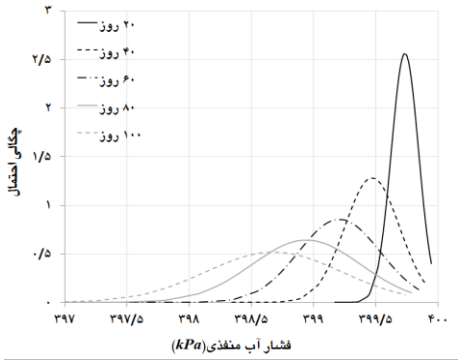


ج) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

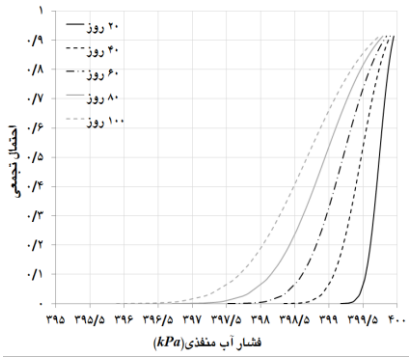


د) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

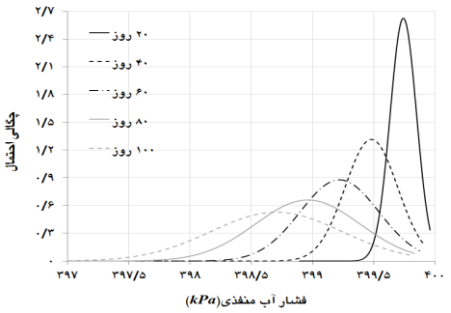
شکل ۷- توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۴ متر (ضخامت لایه خاک ۸ متر)



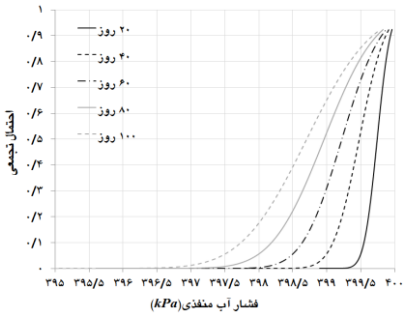
الف) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ب) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی

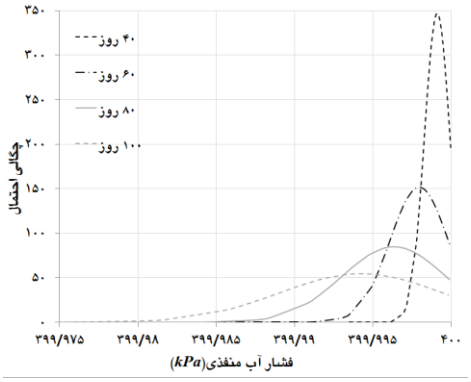


ج) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

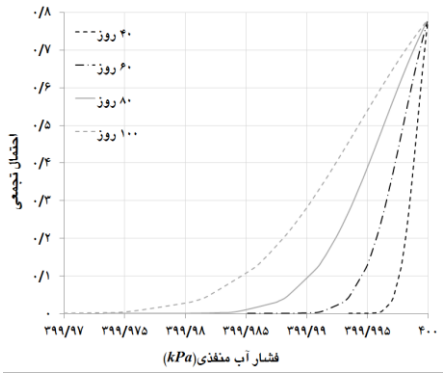


د) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

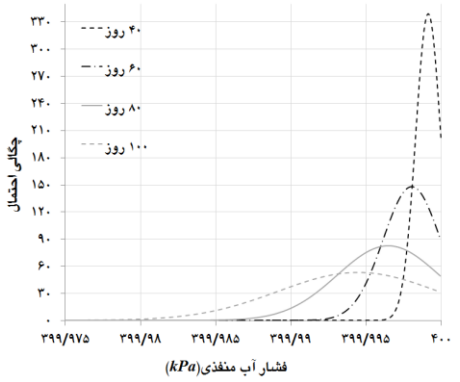
شکل ۸- توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۴ متر (ضخامت لایه خاک ۱۶ متر)



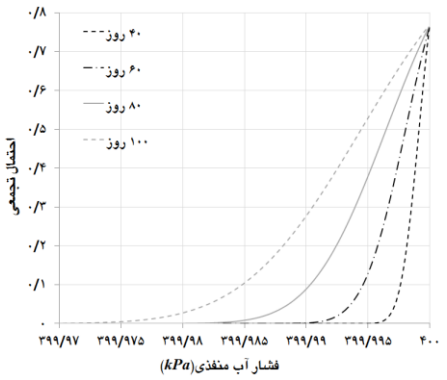
الف) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ب) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی



ج) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی



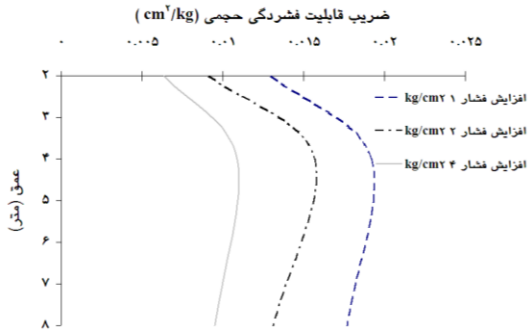
د) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی

شکل ۹- توزیع احتمال فشار آب منفذی در عمق ۸ متر (ضخامت لایه خاک ۱۶ متر)

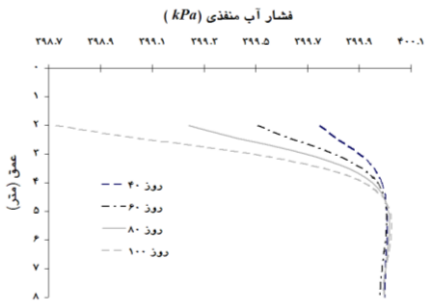
همچنین در مقایسه با نتایج شکل ۸ مشاهده می‌شود که در بیش‌ترین ضخامت لایه خاک مورد بررسی (۱۶ متر) در نزدیکی سطح خاک (عمق ٤ متر) با سرعت زیاد و در وسط لایه خاک (عمق ۸ متر) دارای کم‌ترین سرعت زه‌کشی در میان سناریوهای مورد بررسی می‌باشد. در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب بترتیب تغییرات مقادیر متوسط ضریب قابلیت فشردگی حجمی و فشار آب منفذی با عمق نشان داده شده است. در شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود که با افزایش فشار در آزمایش تحکیم همواره بیش‌ترین قابلیت فشردگی خاک مربوط به نمونه‌های برداشت شده از عمق ٤ متر (وسط لایه خاک به ضخامت ۸ متر) به دست آمد. در شکل ۱۰-ب نیز مشاهده می‌شود که با افزایش زمان تحکیم از ۸۰ به ۱۰۰

روز سرعت کاهش فشار آب منفذی تقریبا ۱/۵ برابر بازه‌های زمانی ٤٠ تا ٦٠ روز و ٦٠ تا ٨٠ روز می‌باشد.

در مرحله بعد پس از بررسی توزیع احتمالاتی هر یک از سناریوها، به منظور مقایسه عملکرد کلیه سناریوهای اعمال شده بر تغییرات زمانی فشار آب منفذی، تغییرات زمانی ضریب تغییرات (CoV) به ازای دو حالت شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی برداشت شده از توزیع احتمالاتی ضریب قابلیت فشردگی حجمی (شکل ۳) انجام شد. شکل ۱۱-الف تغییرات زمانی ضریب تغییرات فشار آب منفذی به ازای شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰ نمونه تصادفی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به ازای تمام سناریوهای مورد بررسی، روند ضریب تغییرات با زمان صعودی و تقریباً خطی می‌باشد. بیش‌ترین شیب منحنی ضریب تغییرات فشار آب منفذی با زمان در عمق ۱ متر و به ازای ضخامت لایه مورد بررسی ٤ متر می‌باشد. به عبارت دیگر بیش‌ترین عدم‌قطعیت در اعماق کم مورد بررسی می‌باشد.

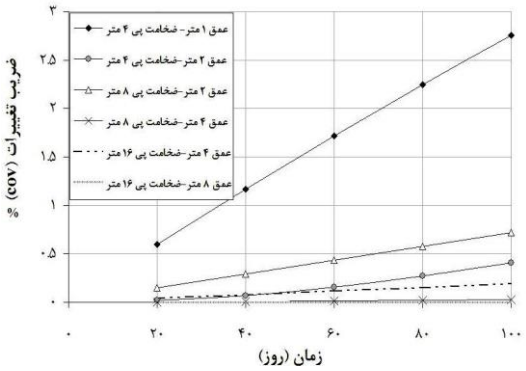


الف) تغییرات قابلیت فشردگی حجمی با عمق

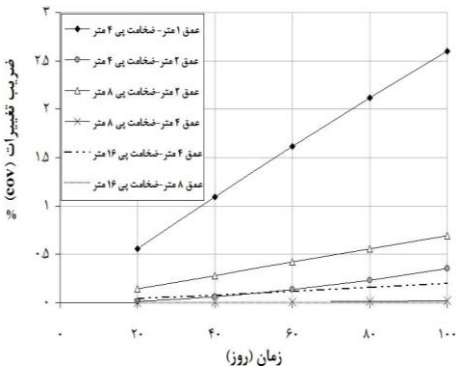


ب) تغییرات فشار آب منفذی با عمق

شکل ۱۰- تغییرات مقادیر متوسط قابلیت فشردگی حجمی و فشار آب منفذی نمونه‌های برداشت شده از اعماق مختلف



الف) با ۱۰۰ نمونه تصادفی ضریب قابلیت فشردگی حجمی



ب) با ۱۰۰۰ نمونه تصادفی ضریب قابلیت فشردگی حجمی

شکل ۱۱- تغییرات زمانی ضریب تغییرات فشار آب منفذی به ازای شبیه‌سازی مونت‌کارلو

این نتیجه مشابه نتیجه چنگ و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی عدم‌قطعیت مدول الاستیسیته در خاک‌های غیراشباع است. در این شرایط در بازه زمانی ۲۰ تا ۱۰۰ روز، ضریب تغییرات ۲/۱۵ درصد افزایش یافت. در حالی که برای لایه خاک با ضخامت ١٦ متر حداکثر افزایش ضریب تغییرات در بازه زمانی مذکور کمتر از ۰/۲۵ درصد می‌باشد. بنابراین اگر ضخامت لایه مورد بررسی ٤ برابر افزایش یابد ضریب تغییرات به عنوان شاخصی از عدم قطعیت بیش از ۸ برابر

کاهش می‌یابد. در شکل ۱۱-ب تغییرات زمانی ضریب تغییرات فشار آب منفذی در حین تحکیم خاک به ازای شبیه-سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰ نمونه تصادفی (برداشت شده از توزیع احتمالاتی ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد نمونه‌های تصادفی مورد استفاده در شبیه‌سازی مونت‌کارلو به ۱۰۰۰ نقطه (شکل ۱۱-ب) در مقایسه با ۱۰۰ نقطه (شکل ۱۱-الف) بهبود اندکی در نتایج مشاهده می‌شود (کاهش جزئی ضریب تغییرات فشار آب منفذی در هر زمان معین). اما با افزایش زمان در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب افزایش محسوس در ضریب تغییرات مشاهده گردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عدم‌قطعیت ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک بیش از هر عامل دیگری تحت تاثیر افزایش زمان، موجب افزایش عدم‌قطعیت در تحلیل تحکیم خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، نقش عدم‌قطعیت قابلیت فشردگی خاک به عنوان یکی از عوامل موثر بر تغییرات زمانی فشار آب منفذی در حین تحکیم در ناحیه شفت استان گیلان بررسی گردید. بدین منظور نمونه‌های خاک از ۹ گمانه (مربوط به پی یک سازه فولادی و محوطه آن واقع در حومه شهرستان شفت) برداشت و قابلیت فشردگی آنها در آزمایشگاه تعیین گردید. سپس با توسعه یک برنامه رایانه‌ای در محیط MATLAB، توزیع لوگ‌نرمال قابلیت فشردگی خاک بدست آمد. در انتها تحلیل احتمالاتی تغییرات زمانی فشار آب منفذی در اعماق ۱، ۲، ٤ و ۸ متر و به ازای ضخامت‌های مختلف لایه خاک مورد بررسی (٤، ۸ و ١٦ متر) با استفاده از روش مونت‌کارلو با ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی و حل ضمنی معادله دیفرانسیل تحکیم انجام شد. نتیجه‌گیری کلی به صورت زیر می‌باشد. با کاربرد توزیع لوگ‌نرمال قابلیت فشردگی حجمی خاک در تحلیل احتمالاتی، افزایش پیروی فشار آب منفذی از توزیع نرمال با گذشت زمان مشاهده می‌گردد. در همه اعماق مورد بررسی، منحنی‌های چگالی احتمال فشار آب منفذی با گذشت زمان دارای قله هموارتر و کشیده‌تر می‌باشند. این مسأله حاکی از افزایش عدم‌قطعیت در تعیین فشار آب منفذی با گذشت زمان، در صورت وجود عدم‌قطعیت در قابلیت فشردگی خاک می‌باشد. در تعیین توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی در یک عمق معین، افزایش ضخامت لایه خاک مورد بررسی موجب افزایش عدم‌قطعیت در تعیین فشار آب منفذی می‌گردد. اما با افزایش ضخامت لایه خاک، هرچه عمق نقطه مورد بررسی بیشتر شود عدم‌قطعیت به شدت کاهش می‌یابد که می‌توان آن را به کاهش تغییرات زمانی فشار آب منفذی در اعماق زیاد خاک نسبت داد. با افزایش تعداد نمونه تصادفی بکار رفته از توزیع لوگ‌نرمال ضریب قابلیت فشردگی حجمی در تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو (از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ نمونه تصادفی)، تغییر قابل توجهی در نتایج مشاهده نگردید و طبق نتایج، نقش عامل زمان در ایجاد عدم-قطعیت مقدار فشار آب منفذی حین تحکیم به مراتب محسوس‌تر می‌باشد. بیش‌ترین قابلیت فشردگی خاک مربوط به نمونه‌های برداشت شده از عمق ٤ متر (وسط لایه خاک به ضخامت ۸ متر) به دست آمد و با افزایش زمان تحکیم از ۸۰ به ۱۰۰ روز سرعت کاهش فشار آب منفذی تقریبا ۱/۵ برابر بازه‌های زمانی دیگر به دست می‌آید که حاکی از افزایش تدریجی سرعت تحکیم در بازه زمانی ۱۰۰ روزه می‌باشد. بررسی ضریب تغییرات (CoV) فشار آب منفذی با زمان طی بازه زمانی ۲۰ تا ۱۰۰ روز نشان می‌دهد که در اثر عدم-قطعیت قابلیت فشردگی خاک، بیش‌ترین افزایش ضریب تغییرات فشار آب منفذی در کم‌ترین عمق مورد بررسی (۱ متر) و به ازای کم‌ترین ضخامت لایه خاک (٤ متر) به دست می‌آید. این مسأله حاکی از آن است که در اندازه‌گیری فشار آب منفذی در حین تحکیم بیش‌ترین عدم‌قطعیت در نقاط نزدیک به سطح خاک وجود دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه گیلان کمال سپاسگزاری و امتنان را دارند که با فراهم نمودن گرنت پژوهشی و فضای مناسب، امکان انجام این تحقیق را فراهم نمودند. همچنین از مسئولین آزمایشگاه مکانیک خاک به دلیل همکاری بی‌دریغ تشکر می‌گردد.

منابع مورد استفاده

Badaoui MH, Nour A, Slimani A and Berrah MK, 2007. Consolidation statistics investigation via thin layer method analysis. Transport in porous media 67(1):69-91.

Chenari RJ and Noori NS, 2017. Uncoupled consolidation analysis of clay deposits with linearly varying characteristics with depth. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering 41(1):49-53.

Cheng Y, Zhang LL, Li JH, Zhang LM, Wang JH and Wang DY, 2017. Consolidation in spatially random unsaturated soils based on coupled flow-deformation simulation. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 41(5):682-706.

Griffiths DV and Fenton GA, 2009. Probabilistic settlement analysis by stochastic and random finite-element methods. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135(11): 1629-1637.

Huang J, Griffiths DV and Fenton GA, 2010. Probabilistic analysis of coupled soil consolidation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 136(3):417-430.

Indian Standard (IS), 1981. Code of Practice for Subsurface Investigation for Foundations. Indian Standard Institution New Delhi, India.

Kwon Y, 2016. Geotechnical hybrid simulation to investigate the effects of the hydraulic conductivity on one-dimensional consolidation settlement. Marine Georesources and Geotechnology. 34(3):219-33.

Lashgaripour GR, Ghafouri M, Savizi Z and Peyvandi Z, 2005. Drop of groundwater table and land subsidence in Mashhad plain. Pp. 123-131. Proceedings of the ninth Conference of Geology Association of Iran. 30-31 August, Tehran, Iran.

Wu TH, Gale SM, Zhou SZ and Geiger EC, 2011. Reliability of settlement prediction—case history. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 137(4): 312-322.

Sun R, 2010. Bearing capacity and settlement behavior of unsaturated soils from model footing tests. Doctoral dissertation, University of Ottawa, Canada.

Terzaghi K, Peck RB and Mesri G, 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York, USA.

Wang Y, Cao Z and Au SK, 2010. Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis. Computers and Geotechnics. 37(7):1015-22.

Wang Y, Tengyuan Z and Zijun C,2015. Site-specific probability distribution of geotechnical properties. Computers and Geotechnics 70: 159-168.

Wang Y, Zhao X and Wang B, 2013. LS-SVM and Monte Carlo methods-based reliability analysis for settlement of soft clayey foundation. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5(4):312-7.