

تأثیر عدم قطعیت هدایت هیدرولیکی و تعداد نمونه در روش مونت کارلو بر تغییرات زمانی تحکیم خاک

امیر ملک پور^{۱*}، نیما صادقیان^۲، مهتاب محمدی^۳

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. دانشجوی گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۳. دانشجوی گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۴)

چکیده

نقش عدم قطعیت هدایت هیدرولیکی به عنوان عاملی مؤثر در تحلیل احتمالاتی تحکیم خاک حائز اهمیت می باشد. در تحقیق حاضر، برنامه‌ای رایانه‌ای در محیط MATLAB توسعه داده شد و پس از حل عددی معادله دیفرانسیل تحکیم به روش تفاضل محدود، از آن به عنوان راه حل پایه، در شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده گردید. همچنین تأثیر تعداد نمونه تصادفی در مدل احتمالاتی تحکیم به روش مونت کارلو با کاربرد ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه از توزیع لوگ-نرمال هدایت هیدرولیکی مربوط به زمینی در سراوان گیلان بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان، منحنی توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی هموارتر و عدم قطعیت بیش‌تر می‌گردد. افزایش تعداد نمونه هدایت هیدرولیکی از ۱۰۰ نقطه به ۱۰۰۰ نقطه، تأثیر کمی بر توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی نشان داد. همچنین بیش‌ترین ضریب نیکویی برازش توزیع نرمال بر فشار آب منفذی در نزدیک به سطح خاک و ۲۳ درصد بیش از مرکز لایه خاک به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل احتمالاتی، توزیع لوگ-نرمال، خاک ریزدانه، فشار آب منفذی

مقدمه

در مهندسی ژئوتکنیک، بررسی پدیده تحکیم (خروج آب از منافذ خاک تحت تاثیر بارهای وارده) در پی‌های متشکل از خاک‌های ریزدانه از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. وقوع این پدیده موجب کاهش فشار آب منفذی با زمان، نشست خاک و ناپایداری سازه‌ها و ابنیه می‌شود. از مهم‌ترین عوامل ایجاد تحکیم خاک می‌توان به برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، بارهای وارده از طرف سازه‌های واقع بر سطح خاک و فشار طبقات فوقانی خاک اشاره نمود. در ایران، بیش‌ترین میزان نشست‌های تحکیمی در استان‌هایی همچون کرمان و خراسان که دارای بیلان منفی آب زیرزمینی می‌باشند، مشاهده گردیده است (Alizadeh, 2014). امروزه در علم مکانیک خاک و مهندسی پی، با درک این نکته که بسیاری از پارامترهای مؤثر بر پدیده‌های ژئوتکنیکی دارای ماهیت تصادفی و تغییرات مکانی می‌باشند، استفاده از تحلیل‌های احتمالاتی و مبتنی بر عدم قطعیت به عنوان راهکاری مناسب در میان محققین رایج گردیده است (Gilbert, 2015). در بین تحقیقات انجام شده، Gui et al. (2000) تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی را با استفاده از

مقادیر تصادفی هدایت هیدرولیکی انجام دادند. آنها با استفاده از آزمون نیکویی برازش شاپیرو-ویلک نتیجه گرفتند که اگر انحراف معیار توزیع لوگ-نرمال هدایت هیدرولیکی کوچکتر از ۰/۵ باشد، ضریب اطمینان پایداری شیروانی از توزیع نرمال یا لوگ-نرمال تبعیت می‌کند. (Griffiths and Fenton, 2009) به بررسی نشست الاستیک پی‌های نواری واقع بر خاک‌های متغیر پرداختند. آنها معایب روش‌های احتمالاتی در تعیین همبستگی مکانی متغیرهای تصادفی را مورد بررسی قرار داده و عملکرد روش احتمالاتی FOSM را با روش مونت کارلو مقایسه نمودند. نتیجه تحقیق آنها به رفع نقایص روش‌های احتمالاتی در محاسبه همبستگی در فضای سه‌بعدی انجامید.

Zomorodian and Zerang-Sani (2015) به بررسی تأثیر عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر تعیین ظرفیت باربری شالوده‌ی نواری با استفاده از روش مونت کارلو پرداختند. نتایج تحلیل آنها بیانگر کاهش ضریب اطمینان ظرفیت باربری در تحلیل احتمالاتی، در مقایسه با روش قطعی بود.

همچنین تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه تحلیل احتمالاتی تحکیم در خاک‌های ریزدانه انجام شده است که به برخی از آنها اشاره می‌شود. در تحقیق انجام شده توسط Chang (1985)، تحلیل احتمالاتی تحکیم یک‌بعدی با استفاده از روش‌های گشتاور و مونت کارلو انجام شد. (Ronold, 1989) تأثیر

* نویسنده مسئول: malekpour.amir@gmail.com

در عمق خاک و به ازای ضخامت‌های مختلف لایه خاک پرداخته می‌شود. برای اجرای تحلیل احتمالاتی در شرایط غیرماندگار، از راه‌حل عددی معادله دیفرانسیل حاکم بر پدیده تحکیم به عنوان معادله مبنا استفاده می‌شود. از این رو، عملکرد مدل احتمالاتی ارائه شده توسط نویسندگان، با کاربرد توزیع لوگ-نرمال (مناسب برای کمیت‌های دارای مقدار نزدیک به صفر) پارامتر هدایت هیدرولیکی و به ازای تعداد نمونه‌های تصادفی متفاوت (تعداد ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه که از توزیع لوگ-نرمال هدایت هیدرولیکی مربوط به زمینی به وسعت ۸ هکتار در منطقه سراوان گیلان به دست آمده است)، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه هدایت هیدرولیکی پارامتری تصادفی هم نسبت به مکان و هم نسبت به عمق خاک است، در این تحقیق برای افزایش دقت نمونه‌برداری و بدست آوردن توزیع واقعی این کمیت، نمونه‌برداری از نقاط مختلف زمین به فواصل ۵۰ متر و در اعماق مختلف خاک تا عمق حداکثر ۱۶ متر انجام شد.

همچنین با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته تأثیر نسبی عوامل مؤثر بر تحلیل احتمالاتی تحکیم شامل تعداد نمونه در روش مونت‌کارلو، زمان تحکیم و ضخامت و عمق لایه مورد بررسی با یکدیگر مقایسه نگردیده‌اند، در این تحقیق به آنها پرداخته می‌شود. در نهایت، تأثیر عوامل مذکور بر میزان تبعیت توزیع فشار آب منفذی از رابطه ریاضی توزیع نرمال مورد بررسی قرار می‌گیرد. اهمیت این موضوع در آن است که تطابق مناسب یکی از توزیع‌های احتمالاتی رایج بر پارامتر مورد بررسی (در اینجا فشار آب منفذی)، رابطه‌ای ریاضی برای تحلیل احتمالاتی آن کمیت در اختیار مهندسين قرار می‌دهد.

تحلیل عدم قطعیت در ژئوتکنیک

در انجام تجزیه و تحلیل‌های ژئوتکنیکی، عوامل ایجاد عدم قطعیت متفاوتی وجود دارند که از جمله آنها می‌توان به مدل ریاضی مورد استفاده، اشتباه انسانی و مقادیر تصادفی و دارای ماهیت متغیر مکانی مربوط به پارامترهای ژئوتکنیکی و عوامل دیگر اشاره نمود. (Nadim (2015 بیان نمود که عدم قطعیت مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی به عنوان مهم‌ترین عامل عدم قطعیت در تحلیل‌های ژئوتکنیکی به شمار می‌آید. از این رو در زمینه تأثیر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی بر پدیده تحکیم نیز تاکنون تحقیقات مختلفی انجام شده است (Lumb, 1966; Hoeksema and Kitanidis, 1985; Fenton and Griffith, 2002). امروزه به دلیل عوامل عدم قطعیت مذکور، تحلیل‌های مبتنی بر قطعیت در ژئوتکنیک جای خود را به روش‌های تحلیل احتمالاتی داده‌اند. از جمله روش‌های تحلیل‌های عدم قطعیت مورد استفاده در ژئوتکنیک می‌توان به روش‌های قابلیت اعتماد

عدم قطعیت اندازه‌گیری بار وارده به خاک بر میزان نشست خاک را بررسی نمود. در تحقیقی دیگر توسط Fenton and Griffiths (2002) تأثیر عدم قطعیت مدول کشسانی خاک بر نشست‌های دیفرانسیلی پی بررسی گردید. (Huang and Griffiths (2009 تئوری تحکیم Biot را با روش اجزای محدود تصادفی ترکیب نموده و رفتار تحکیمی نهشته‌های خاکی دارای خصوصیات متغیر مکانی را به صورت یک‌بعدی و دوبعدی بررسی نمودند. نتایج مطالعه پارامتری انجام شده نشان داد که تأثیر انحراف استاندارد و همبستگی مکانی بر درجه تحکیم، در خاک‌های غیرهمگن متفاوت می‌باشد.

(Houmadi et al. (2012 تحلیل احتمالاتی تحکیم یک-بعدی را با استفاده از روش سطح پاسخ تصادفی و به روش تجمیع (CRSRM¹) انجام دادند. آنها مدول یانگ، نسبت پواسون، هدایت هیدرولیکی و سربار یکنواخت در سطح خاک را به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفتند. آنها همچنین از شاخص Sobol برای تحلیل حساسیت و تعیین مؤثرترین متغیر تصادفی استفاده نمودند. (Sebai and Belkacemi (2016 برای افزایش دقت تحلیل احتمالاتی، ترکیبی از روش احتمالاتی با روش حداقل خطا را برای افزایش دقت برآورد ضریب تحکیم نمونه‌های آزمایشگاهی بکار بردند. (Cheng et al. (2017 با تحلیل احتمالاتی ترکیبی جریان آب و تغییر شکل در خاک، نتیجه گرفتند که نشست در نواحی سطحی لایه خاک دارای عدم قطعیت زیادی می‌باشد.

در میان تحقیقات گذشته، تعدادی از محققین به نقش هدایت هیدرولیکی به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در تحلیل‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر عدم قطعیت اشاره نمودند (Hoeksema and Kitanidis, 1985; Pyrah, 1996). همچنین (Baecher and Christian (2003 با بررسی تعداد زیادی نمونه خاک بیان نمودند که در میان پارامترهای مؤثر بر تحکیم خاک، تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی ۳۰۰ درصد است در حالی که تغییرات ضریب قابلیت فشردگی حجمی خاک ۲۵ تا ۳۰ درصد می‌باشد. (Bari et al. (2013 نقش متغیر تصادفی هدایت هیدرولیکی را بر درجه تحکیم در شرایط کاربرد زهکش‌های قائم پیش‌ساخته مورد بررسی قرار داده و نتایج آماری بدست آمده را تجزیه و تحلیل نمودند.

در تحقیق حاضر، تأثیر عدم قطعیت هدایت هیدرولیکی بر تغییرات زمانی تحکیم خاک در شرایط کاربرد روش مونت‌کارلو با تعداد متفاوت نمونه‌های هدایت هیدرولیکی در نقاط مختلف

ژئوتکنیکی کوچک و نزدیک به صفر باشد استفاده از توزیع لوگ-نرمال مناسب تر است. زیرا کاربرد توزیع نرمال در محدوده میانگین‌های نزدیک به صفر باعث ایجاد اعداد منفی در شاخه چپ توزیع نرمال می‌شود که از نظر فیزیکی غیرقابل توجیه است (Pohl, 2011). از آنجائی که پارامتر هدایت هیدرولیکی به ویژه در خاک‌های ریزدانه دارای مقادیر بسیار کم می‌باشد، از این رو در تحقیق حاضر از توزیع لوگ-نرمال برای تعیین تابع چگالی احتمال هدایت هیدرولیکی در منطقه مورد مطالعه استفاده گردید (رابطه ۱).

$$PDF(k) = \frac{1}{k \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln k - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن μ و σ به ترتیب انحراف معیار استاندارد و میانگین پارامتر هدایت هیدرولیکی به دست آمده از نمونه‌ها می‌باشند. همچنین توزیع لوگ-نرمال احتمال تجمعی مربوط به پارامتر هدایت هیدرولیکی از رابطه (۲) به دست آمد.

$$CDF(k) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln k - \mu}{\sqrt{2} \sigma} \right] \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در رابطه (۲)، erf تابع انتگرالی خطا می‌باشد و برای هر متغیر دلخواه x از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (\text{رابطه ۳})$$

پس از تعیین تابع چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی پارامتر هدایت هیدرولیکی (روابط ۱ و ۲) معادله مبنای مورد استفاده در روش مونت کارلو با استفاده از حل عددی تفاضل محدود معادله دیفرانسیل تحکیم یک‌بعدی (رابطه ۴) به دست آمد (روابط ۵ و ۶).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{u_{i-1}^n - 2u_i^n + u_{i+1}^n}{\Delta z^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که u ، z ، t و c_v به ترتیب فشار آب منفذی، عمق خاک، زمان و ضریب تحکیم خاک (که تابعی از هدایت هیدرولیکی است) می‌باشند (Das, 2013). با برقراری تساوی روابط (۵) و (۶)، رابطه (۷) به عنوان رابطه مبنای مورد استفاده در تحلیل احتمالاتی مونت کارلو به دست می‌آید.

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \frac{c_v \cdot \Delta t}{\Delta z^2} (u_{i-1}^n - 2u_i^n + u_{i+1}^n) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که بالانویس n و $n+1$ به ترتیب نشان‌دهنده مقدار فشار

مرتبه اول ($FORM^1$)، گشتاور دوم مرتبه اول ($FOSM^2$)، گشتاور دوم مرتبه دوم ($SOSM^2$)، تقریب نقطه‌ای (PEM^A) و روش مونت کارلو (MCM^M) اشاره نمود. در میان آنها، روش مونت کارلو دارای ویژگی‌هایی همچون دقت بالا، سهولت اجرای مناسب و حجم محاسبات زیاد می‌باشد که با توجه به قدرت و سرعت بالای پردازش رایانه‌های نوین، امروزه استفاده از این روش رواج بیشتری یافته است. بدین منظور در تحقیق حاضر، از روش مونت کارلو در تحلیل احتمالاتی پدیده تحکیم خاک استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

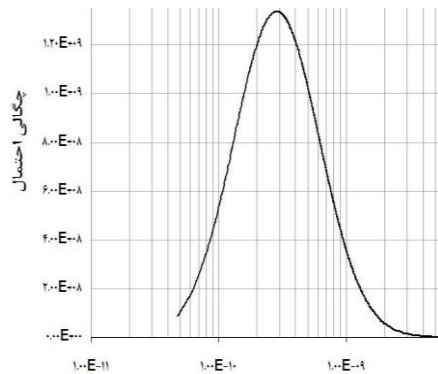
در این تحقیق، یک برنامه رایانه‌ای در محیط MATLAB توسعه داده شد و نقش عدم قطعیت پارامتر هدایت هیدرولیکی به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر بر پدیده تحکیم با روش مونت کارلو و با کاربرد توزیع احتمالاتی هدایت هیدرولیکی (مربوط به نمونه‌های خاک برداشت شده از زمینی به وسعت ۸ هکتار در منطقه سراوان گیلان) مورد مطالعه قرار گرفت. مراحل اجرای روش مونت کارلو در مدل توسعه داده شده به این صورت بود که ابتدا توزیع لوگ-نرمال پارامتر هدایت هیدرولیکی تعیین گردید. سپس حل عددی معادله دیفرانسیل حاکم بر تحکیم خاک (رابطه ۲) به روش تفاضل محدود به دست آمده و به عنوان معادله مبنای روش مونت کارلو بکار گرفته شد. با کاربرد مقادیر تصادفی پارامتر هدایت هیدرولیکی (۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی با استفاده از تابع $\operatorname{lognrnd}$ در MATLAB) و قرار دادن در معادله مبنای، در نهایت توزیع‌های احتمالاتی وابسته به زمان مربوط به پارامتر فشار آب منفذی شامل تابع توزیع چگالی احتمال (PDF^1) و توزیع احتمالاتی تجمعی (CDF^2) به دست آمد که جزئیات مدل ارائه شده در ادامه بیان می‌گردد.

کاربرد روش مونت کارلو در شرایط تحکیم غیرماندگار بر مبنای حل عددی معادله حاکم

تاکنون تحقیقات مختلف نشان داده است که در تحلیل احتمالاتی پارامترهای ژئوتکنیکی، می‌توان از توزیع‌های نرمال و لوگ-نرمال متغیر تصادفی استفاده نمود (Zhai and Benson, 2006; Wang et al., 2015). در شرایطی که مقادیر پارامترهای

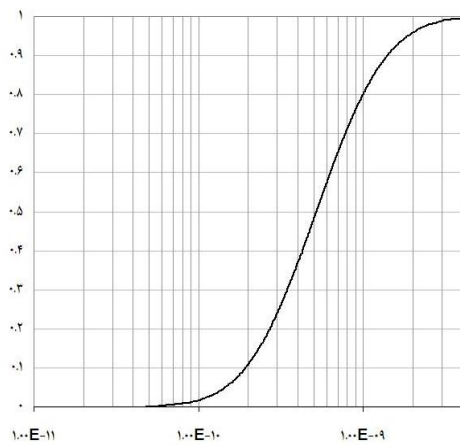
1. First Order Reliability Method
2. First Order Second Moment
3. Second Order Second Moment
4. Point Estimate Method
5. Monte-Carlo Method
6. Probability Density Function (PDF)
7. Cumulative Distribution Function (CDF)

منفذی اولیه در تحلیل‌ها برابر ۴۰۰ کیلو پاسکال (حداکثر مقدار بارگذاری در آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های خاک بر اساس حداکثر بار طراحی در زمین مورد بررسی برای احداث سوله فلزی) در نظر گرفته شد. همچنین به ازای فواصل زمانی Δt برابر ۳ روز تا مدت ۱۵ روز تغییرات زمانی فشار آب منفذی بررسی شد تا در نهایت توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی در هر گام زمانی تعیین گردد. شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب توابع لوگ-نرمال چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی پارامتر هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.



هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)

ب



هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)

الف

شکل ۱. الف) چگالی احتمال (PDF) هدایت هیدرولیکی در ناحیه مورد مطالعه ب) احتمال تجمعی (CDF) هدایت هیدرولیکی در ناحیه مورد مطالعه

که در اینجا i شماره ترتیب فشار آب منفذی در مرتب-سازی صعودی داده‌ها می‌باشد. n تعداد داده‌ها که در این تحقیق برابر ۱۰۰ و ۱۰۰۰ داده تصادفی در نظر گرفته شد. همچنین SS مجموع مربعات مقادیر فشار آب منفذی در توزیع حاصل می‌باشد. اگر در محدوده خطای ۰/۰۵، مقدار D به دست آمده طبق جدول دی‌آگوستینو (Di-Agostino and Massaro, 2013) در محدوده ۰/۲۵۸۷ تا ۰/۲۸۶۰ قرار گیرد، توزیع حاصل به خوبی از توزیع نرمال تبعیت می‌کند. به طور کلی، هر چه این کمیت افزایش یافته و به محدوده بیان‌شده نزدیک‌تر شود توزیع مورد نظر به توزیع نرمال نزدیک‌تر می‌باشد.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج تحلیل احتمالاتی غیرماندگار (وابسته به زمان) پدیده تحکیم با روش مونت کارلو به ازای تعداد ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی هدایت هیدرولیکی که از توزیع لوگ-نرمال این پارامتر بدست آمده است، ارائه می‌گردد. نتایج بررسی‌ها در

آب منفذی اولیه و فشار آب منفذی در زمان Δt می‌باشند. پایین‌نویس i و $i+1$ به ترتیب نشان‌دهنده فشار آب منفذی در نقطه مورد نظر، نقطه‌ای با عمق بیشتر و نقطه‌ای با عمق کمتر می‌باشند که موقعیت مکانی آنها توسط Δz تعیین می‌شود. در این تحقیق، با استفاده از سه مقدار Δz مختلف ۱، ۲ و ۴ متر تحلیل احتمالاتی تحکیم در نیمرخ‌های خاک با ضخامت‌های مختلف ۴، ۸ و ۱۶ متر بررسی گردید. به این منظور، در هر نیمرخ خاک با فاصله Δz و در ۴ نقطه تحلیل احتمالاتی انجام شد که نتایج بررسی‌ها در نقطه ۲ (به عمق Δz) و نقطه ۳ (به عمق $2\Delta z$) در بخش نتایج و بحث ارائه می‌شود. فشار آب

در انتها، به منظور بررسی میزان نزدیکی توزیع‌های احتمالاتی فشار آب منفذی به توزیع نرمال، به ازای نمونه‌های ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نقطه‌ای، آزمون آماری دی‌آگوستینو^۱ (D) که یکی از قوی‌ترین روش‌ها در تعیین نیکویی برازش توزیع نرمال به داده‌های آماری است مورد استفاده قرار گرفت. روش مذکور نسبت به روش شاپیرو-ویلک که توسط محققینی همچون Gui *et al.* (2000) بکار گرفته شد، دارای این مزیت است که نسبت به وجود داده‌های تکراری در میان اطلاعات آماری حساسیت ندارد. بنابراین در تحقیق حاضر از روش دی‌آگوستینو استفاده گردید. روابط (۸) و (۹) بیان‌گر ضابطه آزمون دی‌آگوستینو می‌باشند.

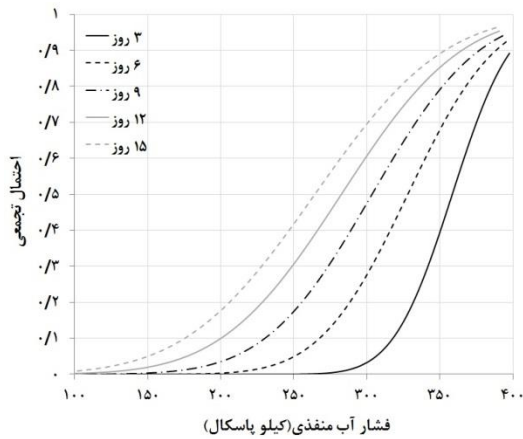
$$T = \sum (i - \frac{n+1}{2}) u_i \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$D = \frac{T}{\sqrt{n^3 \times SS}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

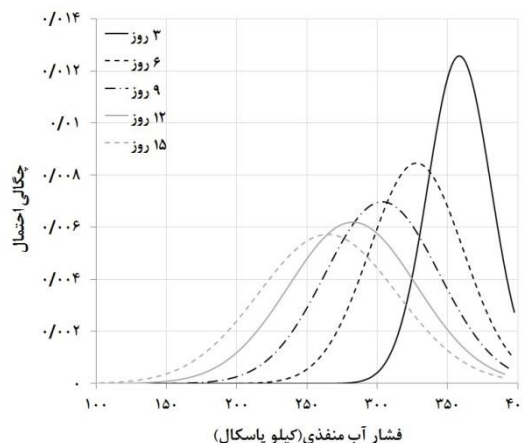
1. D'Agostino test

هیدرولیکی نشان می‌دهد.

با مقایسه فشار آب منفذی دارای بیش‌ترین فراوانی (بیش‌ترین چگالی احتمال) طی بازه زمانی ۳ تا ۱۵ روز، نتیجه می‌شود که فشار آب منفذی به میزان ۲۸ درصد کاهش می‌یابد و درجه تحکیم طی این بازه زمانی برابر ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.



الف



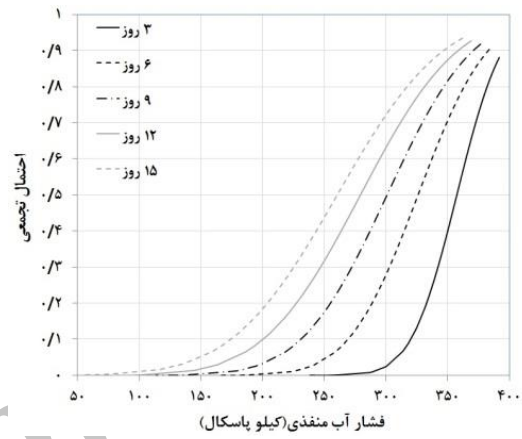
ب

شکل ۲. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه‌ی خاک ۴ متری در نقطه ۲ عمق $\Delta z = 1m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی

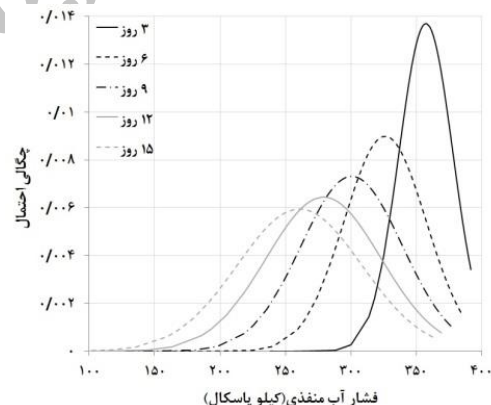
علاوه بر این، با مقایسه شکل‌های (۲. الف) و (۳. الف) پس از گذشت ۱۵ روز با سطح احتمال ۸۰ درصد، فشار آب منفذی دارای مقادیر کمتر از ۳۲۳ کیلو پاسکال خواهد بود. از سوی دیگر، نتایج شکل‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهند که با افزایش تعداد نمونه‌های تصادفی هدایت هیدرولیکی از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ نقطه تغییر چندانی در منحنی‌های احتمالاتی به وجود نمی‌آید. شکل (۴) منحنی‌های چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی فشار آب منفذی در لایه‌ی خاک به عمق ۴ متر در نقطه ۳ (به فاصله $2\Delta z$ برابر ۲ متر از سطح خاک) را به ازای ۱۰۰

نقطه ۲ (به فاصله Δz از سطح خاک) و نقطه ۳ (به فاصله $2\Delta z$ از سطح خاک) و مقادیر Δz ، ۱، ۲ و ۴ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شکل (۲) منحنی‌های چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی فشار آب منفذی لایه‌ی خاک به عمق ۴ متر در نقطه ۲ (به فاصله Δz برابر ۱ متر از سطح خاک) را به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی به دست آمده از توزیع احتمال پارامتر هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد.



الف



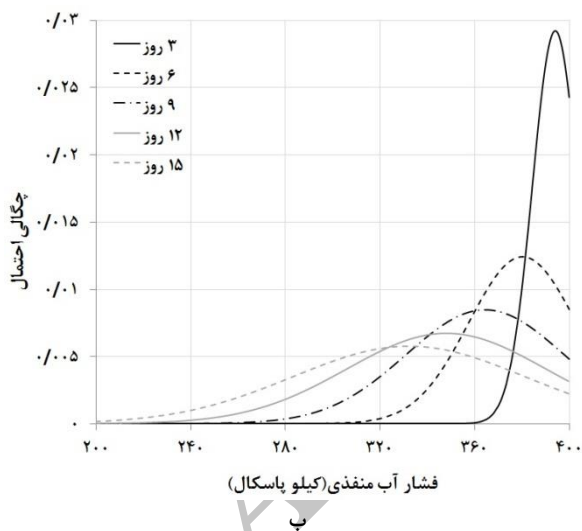
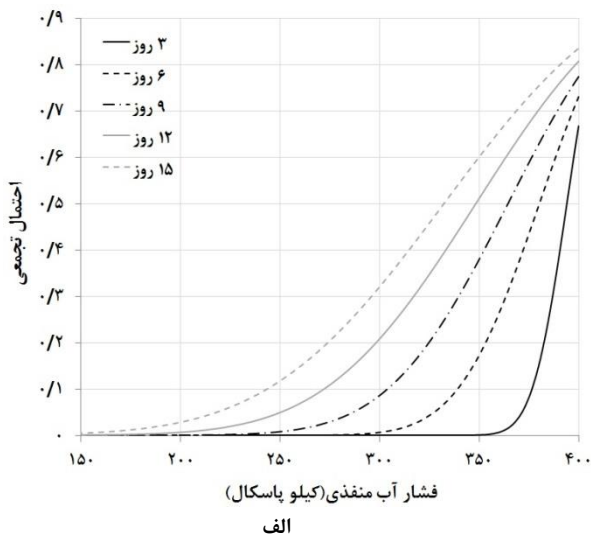
ب

شکل ۳. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه‌ی خاک ۴ متری در نقطه ۲ عمق $\Delta z = 1m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان منحنی‌های چگالی احتمال به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی دارای قله کوتاه‌تر و پهنای بیشتر می‌باشند (شکل ۲. ب). این مسئله نشان‌دهنده افزایش عدم قطعیت در تعیین مقادیر فشار آب منفذی با گذشت زمان می‌باشد.

شکل (۳) منحنی‌های چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی فشار آب منفذی لایه‌ی خاک به عمق ۴ متر در نقطه ۲ (به فاصله Δz برابر ۱ متر از سطح خاک) را به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی به دست آمده از توزیع احتمال پارامتر هدایت

مقادیر کمتر از ۳۸۷ کیلوپاسکال خواهد بود. در مقایسه با شکل (۲) مشاهده می‌شود که در لایه خاک ۴ متری در عمق $2\Delta z$ فشار آب منفذی به اندازه ۶۴ کیلو پاسکال بیشتر از نقطه‌ای به عمق Δz می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش سرعت تحکیم با افزایش عمق خاک می‌باشد.

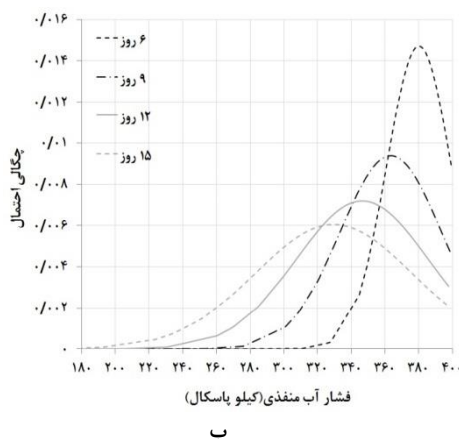
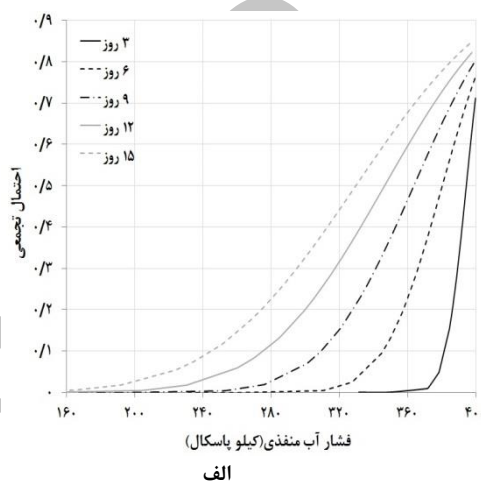


شکل ۵. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۴ متری در نقطه ۳ به عمق $2\Delta z = 2m$ الف (احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی

در شکل‌های (۶) و (۷)، تحلیل احتمالاتی تحکیم خاک در لایه‌ی خاک به ضخامت ۸ متر و در نقطه‌ای با عمق Δz برابر ۲ متر به ترتیب برای تعداد نمونه‌های ۱۰۰ و ۱۰۰۰ انجام شد. به این ترتیب با مقایسه شکل‌های (۴) و (۵) در یک عمق معین (۲ متر)، تأثیر ضخامت متفاوت لایه خاک بر تحکیم مورد بررسی قرار گرفت.

در مقایسه شکل‌های (۶. ب) و (۷. ب)، کماکان روند افزایش عدم قطعیت با گذشت زمان (منحنی‌های چگالی احتمال (ملازم) به ازای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی مشابه شکل‌های

نمونه تصادفی به دست آمده از توزیع احتمال پارامتر هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد. در اینجا نیز با گذشت زمان منحنی‌های چگالی احتمال به ازای ۱۰۰ نمونه تصادفی دارای قله ملایم و پهنای بیشتر می‌باشند (شکل ۴. ب). این مسئله کماکان نشان‌دهنده افزایش عدم قطعیت در تعیین مقادیر فشار آب منفذی با گذشت زمان می‌باشد. نتایج مقایسه مقادیر فشار آب منفذی دارای بیش‌ترین فراوانی (چگالی احتمال) طی بازه ۳ تا ۱۵ روز، نشان‌دهنده کاهش فشار آب منفذی به میزان ۱۵ درصد و در نتیجه افزایش تحکیم به میزان ۱۵ درصد می‌باشد.

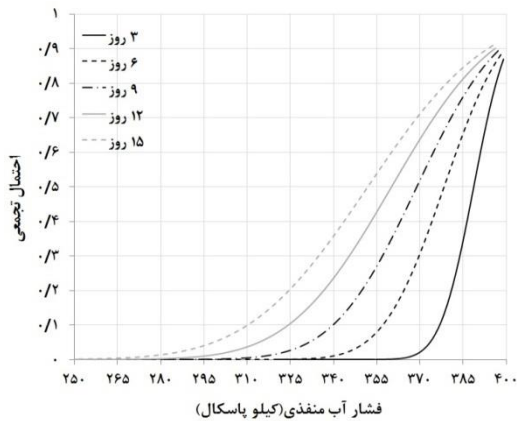


شکل ۴. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۴ متری در نقطه ۳ به عمق $2\Delta z = 2m$ الف (احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی

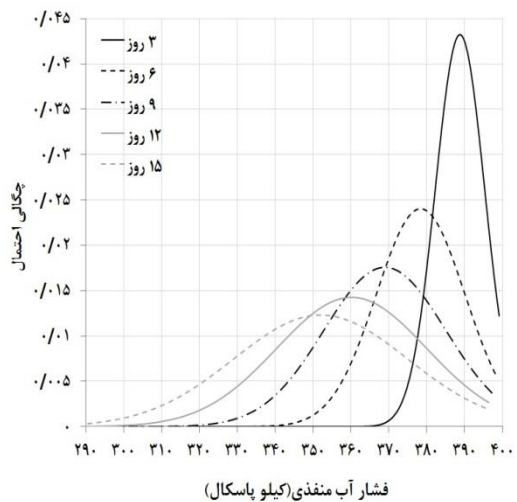
شکل (۵) منحنی‌های چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی فشار آب منفذی در لایه‌ی خاک به عمق ۴ متر در نقطه ۳ (به فاصله $2\Delta z$ برابر ۲ متر از سطح خاک) را به ازای ۱۰۰۰ نمونه تصادفی به دست آمده از توزیع احتمال پارامتر هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهد.

مقایسه شکل‌های (۴. الف) و (۵. الف) نشان می‌دهد پس از گذشت ۱۵ روز با احتمال ۸۰ درصد فشار آب منفذی دارای

۱۰۰۰ نقطه، تغییر چندانی در فشار آب منفذی دارای بیشترین فراوانی (چگالی احتمال) مشاهده نمی‌گردد.



الف

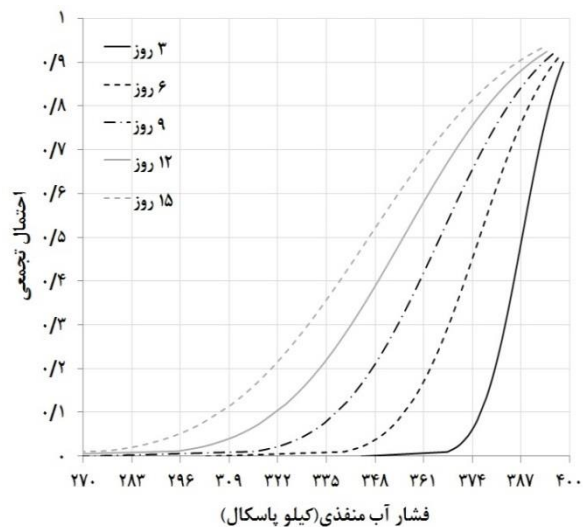


ب

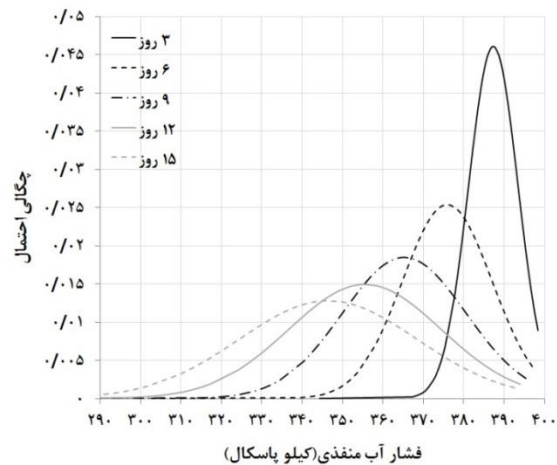
شکل ۷. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۸ متری در نقطه ۲ به عمق $\Delta z = 2m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی

در شکل‌های (۸) و (۹)، نتایج تحلیل احتمالاتی تحکیم خاک در لایه‌ی خاک به ضخامت ۸ متر و در نقطه‌ای با عمق $2\Delta z$ (عمق ۴ متر) به ترتیب به ازای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه در روش مونت کارلو ارائه شده است. منحنی‌های چگالی احتمال در شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهند که در لایه‌ی خاک به ضخامت ۸ متر در عمق ۴ متری، طی بازه زمانی ۱۵ روز فشار آب منفذی به میزان ۲/۵ درصد کاهش می‌یابد که در مقایسه با منحنی‌های چگالی احتمال در عمق ۲ متر (شکل‌های ۶ و ۷) تقریباً ۷/۵ درصد کاهش درجه تحکیم را نشان می‌دهد. به طور کلی، مقایسه نتایج شکل‌های (۲) تا (۹) نشان می‌دهد که با افزایش دو پارامتر عمق لایه خاک و عمق نقطه مورد بررسی طی بازه زمانی ۱۵ روز میزان تحکیم بدون تأثیر از تعداد نمونه هدایت هیدرولیکی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با

(۲) تا (۵) مشاهده می‌شود. همچنین با مقایسه فشار آب منفذی دارای بیش‌ترین فراوانی (چگالی احتمال) طی بازه زمانی ۳ تا ۱۵ روز، مشاهده گردید که فشار آب منفذی به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (درجه تحکیم ۱۰ درصد افزایش می‌یابد). در مقایسه با نتایج شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌گردد که طی بازه زمانی مورد بررسی به ازای سطح احتمال معین با افزایش ضخامت لایه خاک به میزان دو برابر (از ۴ متر به ۸ متر)، درجه تحکیم خاک ۵ درصد کاهش می‌یابد (از ۱۵ به ۱۰ درصد).



الف



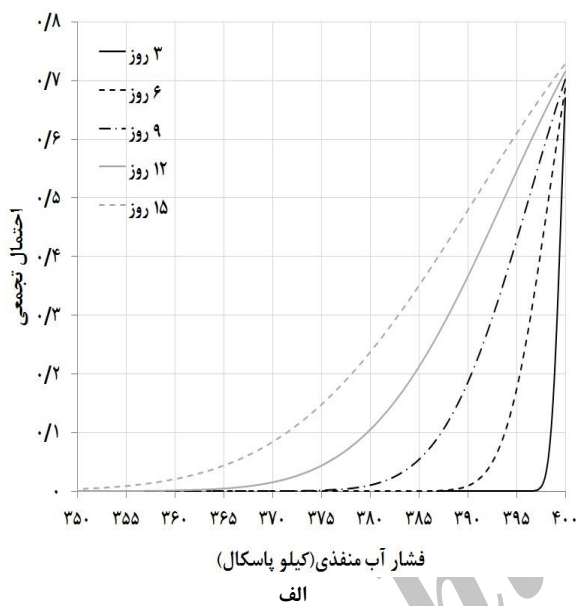
ب

شکل ۶. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۸ متری در نقطه ۲ به عمق $\Delta z = 2m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی

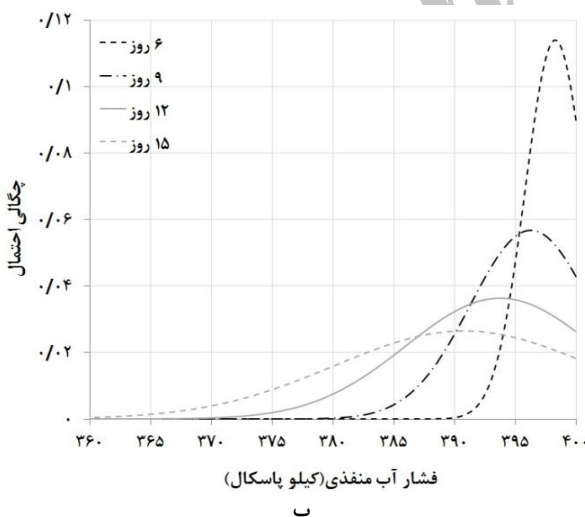
همچنین با بررسی شکل‌های (۶) و (۷) پس از گذشت ۱۵ روز با سطح احتمال ۸۰ درصد، فشار آب منفذی دارای مقادیر کمتر از ۳۸۰ کیلو پاسکال خواهد بود. علاوه بر این، مقایسه شکل‌های (۶) و (۷) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد نمونه‌های تصادفی هدایت هیدرولیکی از ۱۰۰ به

توزیع احتمال پارامتر هدایت هیدرولیکی نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در سطح احتمال ۸۰ درصد، فشار آب منفذی بعد از ۱۵ روز دارای مقادیر کمتر از ۳۹۵ کیلو پاسکال خواهد بود.

در مقایسه با لایه‌های خاک به عمق ۴ و ۸ متر (شکل‌های ۴ تا ۹) مشاهده می‌گردد که با افزایش عمق لایه‌ی خاک تحت تحکیم به ۱۶ متر، درجه تحکیم به کمتر از ۱/۲۵ درصد می‌رسد. این مسئله نشان‌دهنده تأثیر زیاد عمق لایه‌ی زه‌کشی‌شونده بر سرعت فرایند تحکیم می‌باشد.



الف) فشار آب منفذی (کیلو پاسکال)

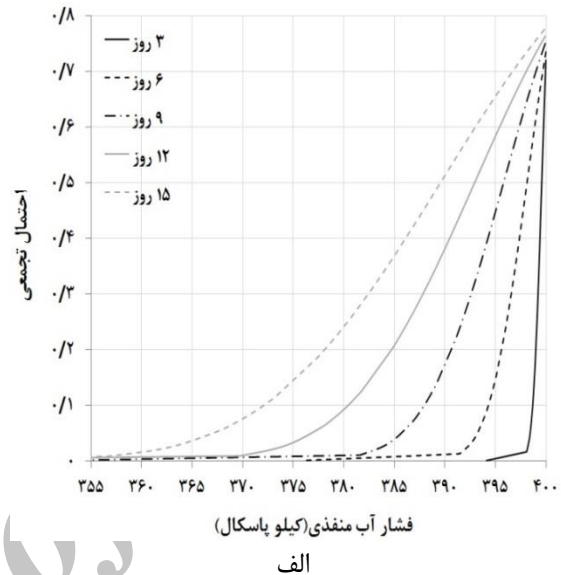


ب

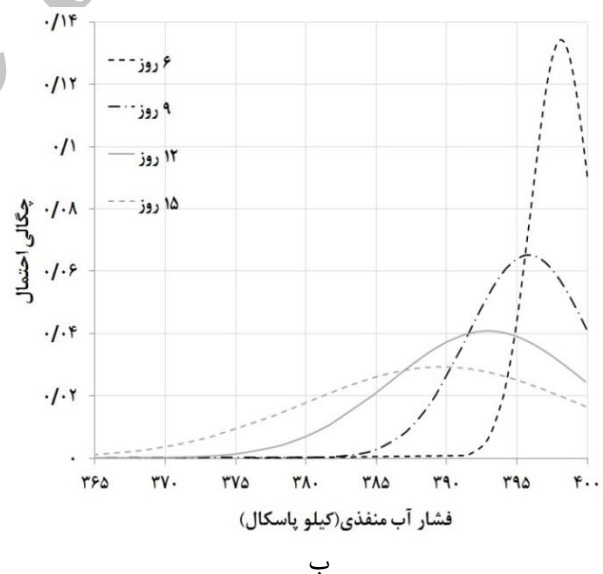
شکل ۹. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۸ متری در نقطه ۳ به عمق $2\Delta z = 4m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، نتایج تحلیل احتمالاتی تحکیم خاک در لایه‌ی خاک به ضخامت ۱۶ متر و در نقطه‌ای

بررسی منحنی‌های احتمال تجمعی در شکل‌های (۶) و (۷) نتیجه می‌شود که احتمال کاهش فشار آب منفذی به مقادیر کمتر از ۳۸۰ کیلو پاسکال، از سطح احتمال ۸۰ درصد در عمق ۲ متر (در شکل‌های ۶ و ۷) به سطح احتمال ۲۴ درصد در عمق ۴ متر (در شکل‌های ۸ و ۹) تنزل می‌یابد.



الف) فشار آب منفذی (کیلو پاسکال)



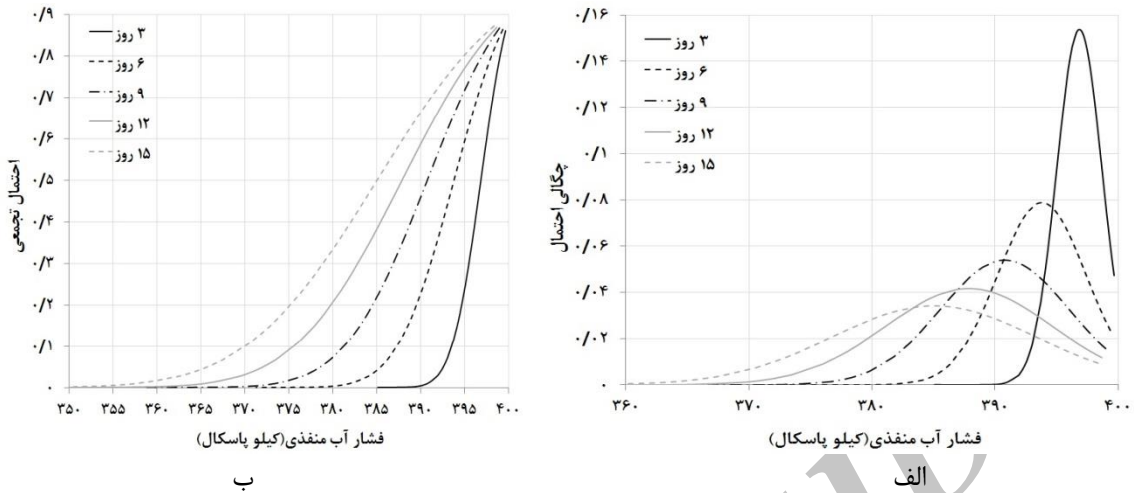
ب

شکل ۸. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۸ متری در نقطه ۳ به عمق $2\Delta z = 4m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی

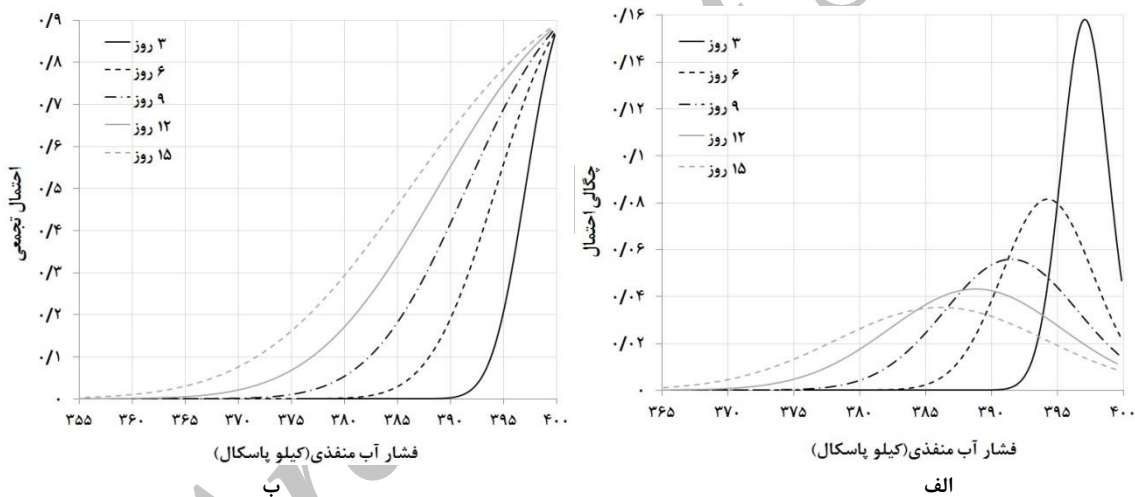
این مسئله مؤید کاهش چشم‌گیر سرعت تحکیم در عمق ۴ متر نسبت به عمق ۲ متر می‌باشد.

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) منحنی‌های چگالی احتمال و توزیع احتمال تجمعی فشار آب منفذی لایه‌ی خاک به عمق ۱۶ متر در نقطه ۲ (به فاصله Δz برابر ۴ متر از سطح خاک) را به ترتیب به ازای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی به دست آمده از

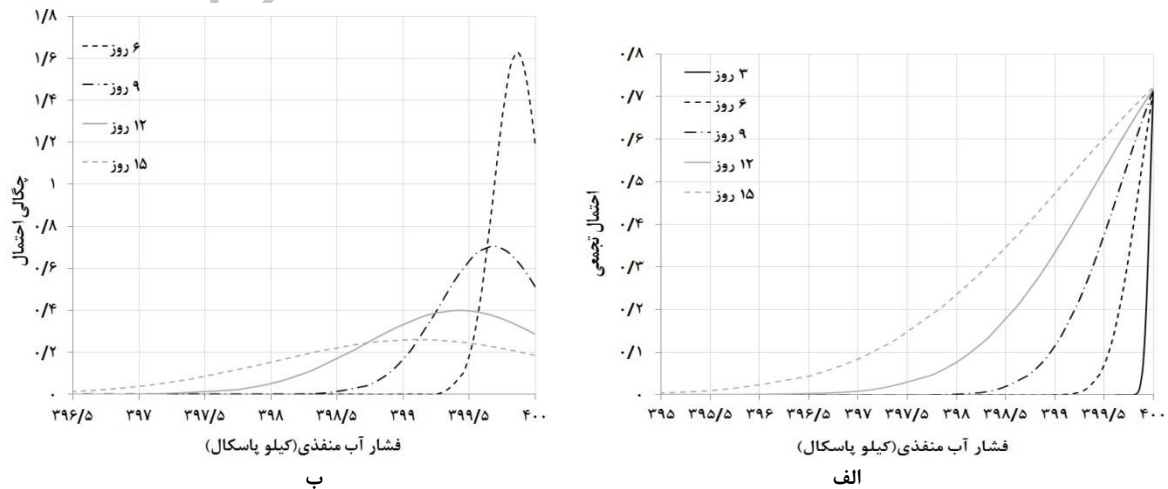
با عمق $2\Delta z$ برابر ۸ متر به ترتیب برای ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه بکار رفته در روش مونت کارلو ارائه شده است.



شکل ۱۰. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۱۶ متری در نقطه ۲ به عمق $\Delta z = 4m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نقطه

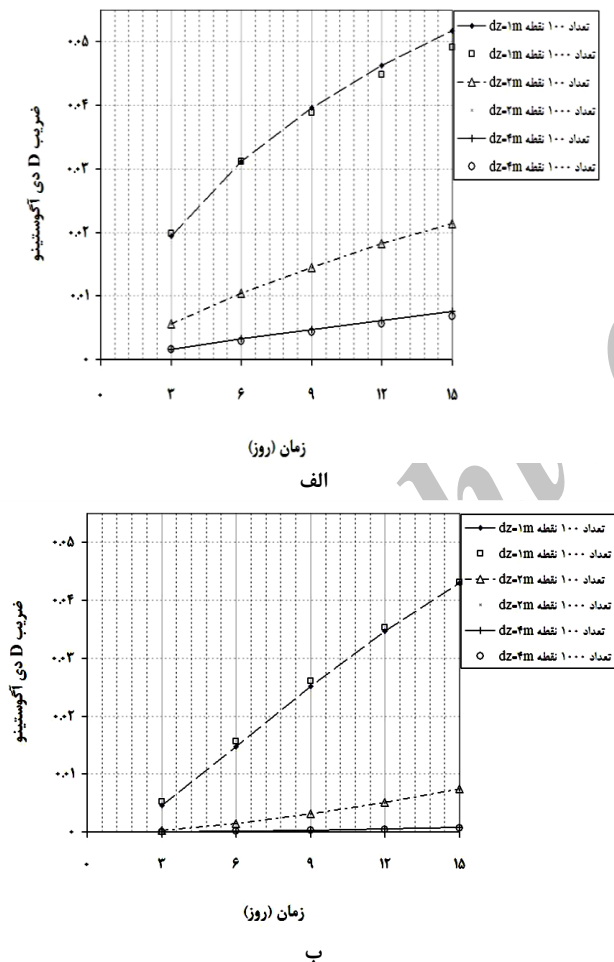


شکل ۱۱. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۱۶ متری در نقطه ۲ به عمق $\Delta z = 4m$ (ج) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی (د) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی



شکل ۱۲. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۱۶ متری در نقطه ۳ به عمق $2\Delta z = 8m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰ نقطه تصادفی

می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد نمونه تصادفی تأثیر چندانی در بهبود ضریب دی‌آگوستینو ایجاد نمی‌شود. شکل (۱۴. ب) نشان می‌دهد که در وسط لایه خاک نسبت به شکل (۱۴. الف) (بالای لایه خاک) بهبود ضریب دی‌آگوستینو با نرخ کمتری نسبت به زمان انجام می‌شود که به دلیل پائین‌تر بودن سرعت تحکیم در مرکز لایه خاک نسبت به نواحی فوقانی می‌باشد. بنابراین در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که افزایش عدم قطعیت و تقرب توزیع فشار آب منفذی به توزیع نرمال در عمق ۱ متر (عمق کم) به طور محسوس بیش از اعماق زیاد است. این نتیجه مطابق با نتیجه بیان شده توسط Cheng *et al.* (2017) می‌باشد.

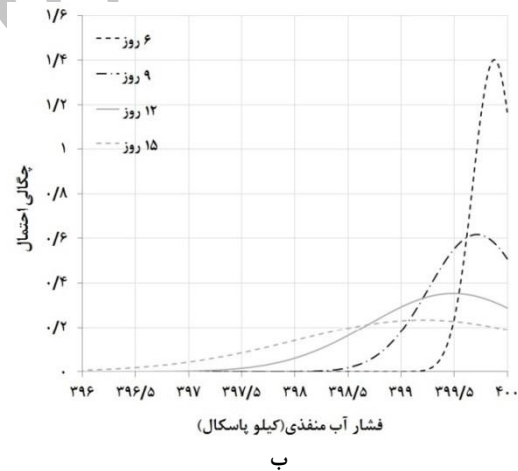
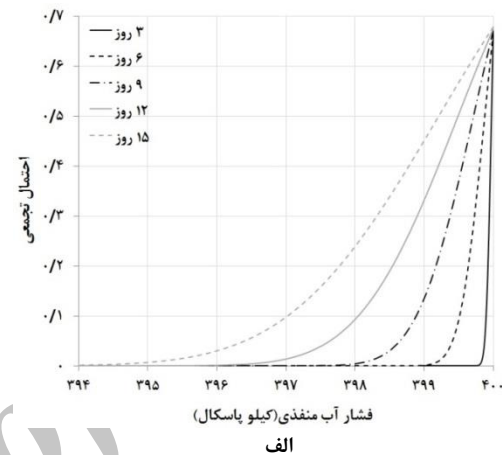


شکل ۱۴. تغییرات زمانی ضریب نیکویی برازش دی‌آگوستینو (الف) در نقطه ۲ در بالای هر لایه خاک (فاصله Δz) (ب) در نقطه ۳ در وسط هر لایه خاک ($2\Delta z$).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر عدم قطعیت پارامتر هدایت هیدرولیکی و تعداد نمونه در روش مونت‌کارلو بر تحلیل احتمالاتی تحکیم خاک در شرایط غیرماندگار، از طریق بررسی تغییرات زمانی

در این شرایط با افزایش عمق لایه خاک مورد بررسی به بیش‌ترین مقدار (۱۶ متر) و در وسط لایه (عمق ۸ متر)، تغییرات فشار آب منفذی به کمتر از ۰/۲ درصد طی ۱۵ روز می‌رسد. در این شرایط در سطح احتمال ۸۰ درصد فشار آب منفذی برابر ۴۰۰ کیلو پاسکال خواهد بود که نشان‌دهنده احتمال زیاد عدم وقوع تحکیم پس از ۱۵ روز در عمق ۸ متر می‌باشد.



شکل ۱۳. توزیع احتمال فشار آب منفذی در لایه خاک ۱۶ متری در نقطه ۳ به عمق $2\Delta z = 8m$ (الف) احتمال تجمعی (CDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی (ب) چگالی احتمال (PDF) به ازای ۱۰۰۰ نقطه تصادفی

در انتها برای تعیین اثر عمق لایه خاک، تعداد نمونه‌های تصادفی خاک و زمان تحکیم، آزمون نیکویی برازش دی‌آگوستینو بر روی توزیع‌های به دست آمده انجام شد تا تأثیر عوامل مذکور بر میزان تقرب توزیع‌های فشار آب منفذی به دست آمده به توزیع نرمال تعیین گردد (شکل ۱۴).

در مقایسه شکل‌های (۱۴. الف) و (۱۴. ب) مشاهده می‌شود که با افزایش زمان، ضریب دی‌آگوستینو افزایش می‌یابد که این مسئله نشان‌دهنده تقرب بیشتر نتایج به توزیع نرمال

بررسی و زمان تحکیم، افزایش تعداد نمونه هدایت هیدرولیکی از ۱۰۰ نقطه به ۱۰۰۰ نقطه، تأثیر کمتری بر توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی دارد.

- بررسی ضریب نیکویی برازش دی‌آگوستینو نشان داد که هرچه ضخامت لایه مورد بررسی در تحکیم کمتر باشد با افزایش زمان تحکیم، توزیع احتمالاتی فشار آب منفذی با نرخ سریع‌تری به توزیع نرمال نزدیک می‌شود.

- بیش‌ترین ضریب نیکویی برازش توزیع نرمال بر فشار آب منفذی در نزدیک به سطح خاک و ۲۳ درصد بیش از مرکز لایه خاک به دست آمد.

در ادامه تحقیقات در این زمینه توصیه می‌شود که چنین مدل احتمالاتی در خاک‌های لایه‌بندی شده مورد بررسی قرار گیرد.

REFERENCES

- Alizadeh, A., (2014). Principles of applied hydrology. *Mashhad Ferdowsi Univ. Press(In Farsi)*.
- Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2003). Reliability and statistics in geotechnical engineering, *John Wiley & Son, West Sussex England*.
- Bari, M.W., Shahin, M.A. and Nikraz, H.R. (2013). Probabilistic analysis of soil consolidation via prefabricated vertical drains. *International Journal of Geomechanics*. 13(6):877-81.
- Chang, C.S. (1985). Uncertainty of One-Dimensional consolidation analysis. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 111(12):1411-24.
- Cheng, Y., Zhang, L.L., Li, J.H., Zhang, L.M., Wang, J.H. and Wang, D.Y. (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.
- Di-Agostino, R.B. and Massaro, J.M. (2013). Goodness of fit tests. Handbook of logistic distribution. *ISBN: 0-8247-8587-8*.
- Fenton, G.A. and Griffiths, D.V. (2002). Probabilistic foundation settlement on spatially random soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 128 (5):381-390.
- Gilbert, R.B. (2015). Important role of uncertainty in forensic geotechnical engineering. *Series of Development in Geotechnical Engineering, Springer*, 493-503.
- Griffiths, D.V and Fenton, G.A. (2009). Probabilistic settlement analysis by stochastic and random finite-element methods. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 135(11):1629-1637.
- Gui, S., Zhang, R., Turner, J.P. and Xue, X. (2000). Probabilistic slope stability analysis with stochastic soil hydraulic conductivity. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 126(1):1-9.
- Hoeksema, R. J. and Kitanidis, P. K. (1985). Analysis of the spatial structure of properties of selected aquifers. *Water Resource Research* 21(4): 563-572.

توزیع احتمال فشار آب منفذی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، برنامه‌ای کامپیوتری در محیط MATLAB توسعه داده شد و حل عددی معادله دیفرانسیل تحکیم به روش تفاضل محدود به عنوان معادله مبنا در روش مونت کارلو استفاده گردید. در مدل احتمالاتی توسعه داده شده، تعداد ۱۰۰ و ۱۰۰۰ نمونه تصادفی حاصل از توزیع لوگ-نرمال پارامتر هدایت هیدرولیکی، به ازای اعماق مختلف و ضخامت‌های مختلف لایه خاک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج ارائه‌شده در بخش نتایج و بحث، مطالب زیر قابل نتیجه‌گیری می‌باشند.

- با ۴ برابر شدن عمق لایه خاک از ۴ متر به ۱۶ متر، بیشترین کاهش فشار آب منفذی محتمل از ۷۵ درصد به ۱ درصد می‌رسد.

- در مقایسه با متغیرهایی همچون عمق، ضخامت لایه مورد

- Houmadi, Y., Ahmed, A. and Soubra, A. H. (2012). Probabilistic analysis of a one-dimensional soil consolidation problem. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 6(1):36-49.
- Huang, J. and Griffiths, D.V. (2009). Probabilistic analysis of coupled soil consolidation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136(3):417-430.
- Lumb, P. (1966). The variability of natural soils. *Canadian Geotech. J.* 3(2): 74-97.
- Nadim, F. (2015). Accounting for uncertainty and variability in geotechnical characterization of offshore sites. *Geotechnical safety and risk, IOS Press. doi: 10.3233/978-1-61499-580-7-23*.
- Pohl, C. (2011). Determination of characteristic soil values by statistical methods. *ISGR Geotechnical Safety and Risk* 427-434.
- Pyrah, I. C. (1996). One -dimensional consolidation of layered soils. *Geotechnique*. 46(3): 555-560.
- Ronold, K.O. (1989). Probabilistic consolidation analysis with model updating. *Journal of Geotechnical Engineering* 115(2):199-210.
- Sebai, S. and Belkacemi, S. (2016). Consolidation coefficient by combined probabilistic and least residuals methods. *Geotechnical Testing Journal* 39(5): 891-897.
- Wang, Y., Zhao, T. and Cao, Z. (2015). Site-specific probability distribution of geotechnical Properties. *Computers and Geotechnics* 70: 159-168.
- Zhai, H. and Benson, C.H. (2006). The log-normal distribution for hydraulic conductivity of compacted clays: two or three parameters ?. *Geotech. Geoenviron. Eng.* 24(5):1149-1162.
- Zomorodian, M. and Zerang-Sani, F. (2015). Investigation of the effect of soil mechanic parameters on bearing capacity of strip footings. *Sharif Civil Eng. J.* 31(1-1): 129-136 (In Farsi)