

# روش جدید پیش‌بینی نشست آنی شالوده‌های سطحی با استفاده از سختی حداکثر خاک‌ها

عبدالحسین حداد\* (استادیار)

رضا امینی آهی دشتی (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۳)  
دوره ۲، شماره ۲، ص. ۲۱-۱۱

بیشتر روش‌های موجود برای تخمین نشست شالوده‌های سطحی مستقر بر روی خاک‌های غیرچسبنده براساس همبستگی‌های میان نتایج آزمایش‌های برجا، همچون نفوذ استاندارد با مدول یانگ هستند. نشست پیش‌بینی شده براساس نتایج این‌گونه آزمایش‌ها، پراکنده و اغلب غیر واقع‌بینانه است. در این نوشتار سعی شده است با ارائه‌ی یک رویکرد جدید، تخمین نشست شالوده‌های سطحی بر روی خاک‌های غیرچسبنده مورد توجه قرار گیرد، که در آن از مدل رفتاری کشسانی - غیرخطی و مشخصات دینامیکی خاک‌ها استفاده شده است. نتایج این روش با مقادیر نشست حاصل از آزمون‌های بارگذاری بر روی صفحه با ابعاد مختلف مقایسه شده است. این روش در مقایسه با روش‌های مبتنی بر همبستگی نتایج آزمایش‌های برجا، نتایجی واقع‌بینانه و نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده از خود نشان می‌دهد. علاوه بر آن، سرعت عمل این روش و هزینه‌ی نسبتاً کم آن، مزیت دیگری است که آن را نسبت به سایر روش‌های متداول، متمایز ساخته است.

واژگان کلیدی: نشست آنی، شالوده‌های سطحی، خاک‌های دانه‌بی، سرعت موج برشی، سختی بیشینه.

ahadad@semnan.ac.ir  
rezaamini2424@gmail.com

## ۱. مقدمه

دانه‌بی برای آزمایش مقاومت بسیار دشوار و تقریباً غیرممکن است. دست‌خوردگی نمونه‌ی خاک بر روی ویژگی‌های مکانیکی آن تأثیر گذاشته است و نمی‌توان تصویر واقعی از رفتار خاک را تبیین کرد. از این رو مشخصات مکانیکی خاک‌های دانه‌بی اغلب از طریق آزمون‌های صحرایی درجا مثل نفوذ استاندارد (SPT) و نفوذ مخروط (CPT) برآورد می‌شود. رایج‌ترین روش‌های پیش‌بینی نشست، که در کتاب‌های علمی ارائه شده و بسیار متداول‌اند، عبارت‌اند از روش‌های: ترزاقی و پک (۱۹۴۸)، اشمرتمن و همکاران (۱۹۷۸)، برلند و باردیج (۱۹۸۵).<sup>[۱]</sup> این روش‌ها با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط، تغییرشکل لایه‌ی خاکی ناشی از بار وارده را برآورد می‌کنند. تاکنون پژوهشگران متعددی با مطالعه بر روی نتایج آزمون‌های نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط، روابط همبستگی میان سختی خاک و پارامترهای مقاومتی خاک ارائه کرده‌اند.<sup>[۲]</sup>

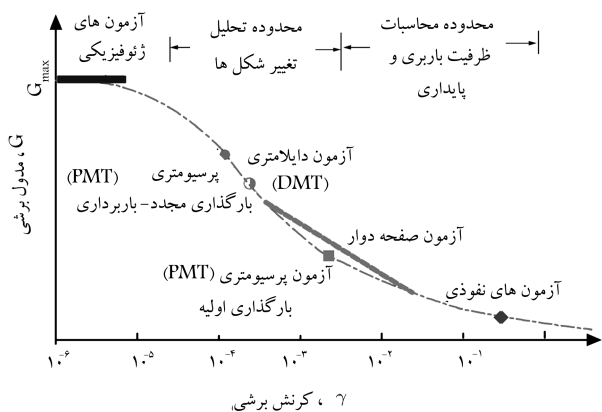
سختی خاک، مهم‌ترین مؤلفه‌ی مکانیکی خاک در پیش‌بینی نشست آنی شالوده‌هاست. عوامل مؤثر در سختی عبارت‌اند از: تاریخچه‌ی تنش، درجه‌ی اشباع، چگالی نسبی، سمتاسیون خاک و...<sup>[۳]</sup> رفتار خاک تحت اثر بارهای وارده اغلب غیرخطی است و اندازه‌ی سختی خاک با تغییرات سطح تنش و کرنش ایجاد شده در محیط تغییر می‌یابد. آزمون‌های نفوذی، سختی خاک را در کرنش‌های بزرگ و به‌طور غیرمستقیم بر پایه‌ی روابط همبستگی اندازه‌گیری می‌کنند.<sup>[۴]</sup> پیش‌بینی نشست بر مبنای نتایج این‌گونه آزمون‌ها اغلب مشجر به نتایجی پراکنده و غیرواقع‌بینانه شده است، که این امر تأثیر مستقیم در طراحی شالوده‌ها دارد. لذا، ارائه‌ی روشی که بتواند

نیاز روزافزون جوامع بشری به توسعه‌ی شهرسازی، گسترش زیرساخت‌های عمرانی و ایشیه‌ی فنی مثل ساختمان‌ها و پل‌ها موجب شده است تا استفاده از روش‌های نوین در مهندسی ژئوتکنیک به سرعت جایگزین روش‌های قبلی شوند. مهندس ژئوتکنیک با مطالعه بر روی پارامترهای مکانیکی خاک و سنگ و تبیین رفتار بستر تحت بارهای وارده، شالوده‌های متناسب با ساخت‌گاه موردنظر را طراحی می‌کند. شالوده‌های سطحی به‌منزله‌ی ساده‌ترین نوع شالوده‌ها، در حقیقت، پایین‌ترین بخش هر سازه است که وزن آن را به خاک زیرین یا بستر سنگی منتقل می‌کند. طراحی ژئوتکنیکی شالوده‌ها با محاسبه‌ی ظرفیت باربری مجاز و براساس کنترل دو معیار گسیختگی برشی در خاک و بیشینه‌ی میزان نشست قابل قبول شالوده انجام می‌گیرد. در رابطه با برآورد نشست آنی پی‌ها، از روش‌ها و روابط متعددی می‌توان بهره جست که در اغلب آنها سختی خاک ( $E$ )، عرض شالوده ( $B$ ) و فشار وارده از پی ( $q$ ) تعیین‌کننده و مؤثرند.<sup>[۱]</sup> نشست شالوده‌های سطحی، ناشی از سه نوع رفتار بستر است: نشست آنی یا کشسان، نشست تحکیمی اولیه و نشست تحکیمی ثانویه.

پیش‌بینی میزان نشست خاک، مستلزم ارزیابی دقیق مؤلفه‌های مکانیکی خاک و انتخاب روش حل تحلیلی مناسب برای مدل‌سازی رفتار خاک است.<sup>[۱]</sup> با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک دست‌نخورده می‌توان مؤلفه‌های مقاومت برشی خاک‌ها را تعیین کرد. به دست‌آوردن نمونه‌های دست‌نخورده از مصالح

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۱/۷/۲۵، پذیرش ۱۳۹۱/۹/۲۷.



شکل ۱. تغییرات مدول برشی با افزایش سطح کرنش برشی و آزمون‌های صحرایی متناظر با آن [۶].

جدول ۱. نمونه‌هایی از کاهش سختی برای مصالح مختلف [۱۲].

مصالح	$E_{0.1}/E_0$	$E_{0.01}/E_0$	$E_{0.001}/E_0$
خاک آهکی	۰/۴۲	۰/۸۷ - ۰/۹۳	گسیخته شده
رس لندن	۰/۳۵ - ۰/۵۸	۰/۸۳ - ۰/۹۷	۰/۲۰ - ۰/۱۱
رس بسکتر	۰/۳۶ - ۰/۵۵	۰/۷۵ - ۰/۸۱	۰/۲۱ - ۰/۱۱

مقیاس واقعی، مقادیر بسیار کمتری را ارائه می‌کنند [۱۳]. همین امر موجب می‌شود تحلیل‌های نشست مبتنی بر نتایج حاصل از این قبیل آزمون‌ها، منجر به پیش‌بینی تغییر شکل بیشتری در خاک شود. در کرنش‌های بسیار کوچک (کمتر از  $10^{-4}$ ) خاک‌ها سختی بسیار زیادی را از خود نشان می‌دهند. این سختی معیار مهمی در ارزیابی رفتار زمین است و بیشترین مقدار سختی خاک، در مقایسه با سایر مدول‌هاست.

سختی خاک با افزایش سطح کرنش کاهش می‌یابد و این کاهش تابعی از مسیر تنش طی شده است. بررسی‌های انجام شده توسط پژوهشگران متعدد نشان می‌دهد که کرنش خاک در اطراف سازه‌ها، در نتیجه بارهای وارده از روسازه، به طور متوسط در محدوده‌ی کرنش‌های  $10^{-1}$  الی  $10^{-4}$  درصد قرار دارد. [۱۳، ۱۱، ۱۲] جدول ۱، محدوده‌ی کاهش سختی با سطح کرنش، برای سه نوع خاک مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج با استفاده از آزمون‌های سه محوری و اندازه‌گیری کرنش موضعی بر نمونه‌ی خاک‌های اطراف سازه‌های مهم در شهر لندن ارزیابی شده است. سختی بیشینه‌ی که به وسیله‌ی تجهیزات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دست‌نخورده با کیفیت بالا، اندازه‌گیری می‌شود، نزدیک به مقادیر حاصل از آزمون‌های ژئوفیزیکی صحرایی است. اندازه‌گیری ژئوفیزیکی سختی زمین، نقش مهمی در تعیین پارامترهای سختی در محاسبات مهندسی ایفا می‌کند. مطابق جدول ۱ مشاهده می‌شود که سختی در تراز کرنش‌های عملی  $E_{op}$ ، بین  $40\%$  تا  $80\%$  درصد سختی بیشینه  $E_0$  است. [۱۲، ۱۳]

به منظور پیش‌بینی نشست بر مبنای سختی بیشینه، تعیین دو سری پارامتر لازم است: [۱۰]

- پارامترهای سختی در تراز کرنش‌های خیلی کوچک مثل  $G_{max}$  و یا  $E_{max}$ .
- پارامترهای سختی با افزایش کرنش و تغییرات سطح تنش در طول بارگذاری یا باربرداری تغییر می‌کنند. فاکتورهای کنترل‌کننده‌ی سختی خاک تحت بارهای وارده از سوی شالوده‌ها عبارت‌اند از: سطح کرنش، مسیر تنش و تغییر در تنش مؤثر. تغییر در مسیر بارگذاری و تاریخچه‌ی فشارهای وارد بر خاک.

سختی خاک را مستقیماً اندازه‌گیری و با دقت مناسب تخمین نزدیک به واقعیت از نشست آبی شالوده‌ها بر اساس سختی واقعی خاک‌ها ارائه کند، بسیار حائز اهمیت است و یکی از نتایج مهم آن طراحی اقتصادی و ایمن شالوده‌هاست. [۷-۹]

از میان روش‌های تعیین سختی برجای خاک، روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌یی با اندازه‌گیری سرعت موج برشی توده‌ی خاک، امکان تعیین سختی برجای خاک را مستقیماً فراهم می‌کنند (رابطه‌ی ۱):

$$G_{MAX} = \rho T \cdot V_S^2 \quad (1)$$

در این رابطه،  $\rho T$  جرم واحد حجم محیط،  $V_S$  سرعت موج برشی و  $G_{max}$  سختی بیشینه‌ی برجای خاک هستند. سختی اندازه‌گیری شده توسط آزمون‌های ژئوفیزیکی لرزه‌یی، بیشترین سختی خاک هستند و سختی بیشینه یا سختی دینامیکی یا  $G_0$  یا  $G_{max}$  نامیده می‌شود.

روش‌های ژئوفیزیکی مبتنی بر گسترش امواج سطحی می‌توانند بدون ایجاد اغتشاش و دست‌خوردگی در توده‌ی خاک، سختی بیشینه‌ی برجای خاک را اندازه‌گیری کند. این روش‌ها، سختی خاک را در کرنش‌های بسیار کوچک ( $10^{-4}$  یا  $10^{-6}$ ) ارزیابی می‌کنند. [۱۰]

در این نوشتار، با اندازه‌گیری سرعت موج برشی درجا و تعیین مدول برشی بیشینه، بر اساس تئوری کشسانی روشی به منظور تعیین دقیق نشست شالوده‌های سطحی ارائه شده است. در رابطه‌ی پیشنهادی در این نوشتار، سختی بیشینه‌ی لایه‌های خاک با توجه به سطح فشار وارده از سوی شالوده اصلاح می‌شود. نشست آبی با استفاده از تئوری کشسانی بر حسب عرض پی، میدان تنش و سختی اصلاح شده به دست می‌آید.

به منظور بررسی صحت روش ارائه‌شده، نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی آزمون‌های بارگذاری در چهار ساختگاه مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. انطباق مناسب بین نتایج آزمون بارگذاری و پیش‌بینی نشست، دقت بالای روش مذکور را نمایش می‌دهد. به‌طور کلی پیش‌بینی‌ها بر اساس پارامترهای اندازه‌گیری لرزه‌یی به مقدار نشست اندازه‌گیری شده تحت بارهای سرویس شالوده‌ها نزدیک‌تر است.

## ۲. مبانی نظری

گسترش روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌یی و دقت بالای آن در ارائه‌ی مشخصات مکانیکی خاک، توجه بسیاری از پژوهشگران مهندسی ژئوتکنیک را در چند سال اخیر به خود معطوف ساخته است. این روش‌ها به علت پایه‌ی فیزیکی قوی خود، دارای دقت و صحت بالایی در ارائه‌ی نتایج نسبت به روش‌های متداول صحرایی هستند. روش ژئوفیزیکی لرزه‌یی سطحی می‌تواند پروفیل سختی - عمق در بخش‌های سطحی و کم عمق بستر را، بدون نیاز به حفارگمانه و ایجاد دست‌خوردگی در توده‌ی خاک، ارائه کند. این روش، سختی بیشینه‌ی توده‌ی خاک را محاسبه می‌کند، که در اندازه‌گیری و محاسبه‌ی دقیق نشست پی‌ها بسیار حائز اهمیت است. [۱۱، ۱۲]

آزمون‌های صحرایی تعیین سرعت موج برشی، مدول برشی خاک را کرنش‌های کوچک اندازه‌گیری می‌کنند. سختی کرنش کوچک بیشترین مقدار سختی خاک یا سنگ را نشان می‌دهد. شکل ۱، محدوده‌ی کرنش‌های برشی مرتبط با آزمایش‌های برجا را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدول خاک به دست‌آمده از آزمایش‌های متداول صحرایی و آزمایشگاهی (به‌جز آزمون‌های ژئوفیزیکی) در مقایسه با مدول حاصل از تحلیل معکوس مبتنی بر آزمایش‌های با

به صورت منحنی ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این منحنی در محدوده‌ی مجاز تغییرات سختی قرار دارد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، معادله‌ی پیشنهادی اصلاح سختی، در محدوده‌ی کرنش‌های عملی شالوده‌ها  $0.1\%$  تا  $1\%$  درصد، در کران پایین محدوده‌ی تغییرات سختی بر حسب کرنش قرار دارد.

### ۲.۳. پیش‌بینی نشست آنی شالوده‌ی سطحی بر حسب سختی بیشینه

گام‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی نشست بر حسب سختی بیشینه به این شرح است: **گام اول:** ارزیابی مقادیر میانگین سختی کرنش کوچک ( $G_{max}$ ) زیر شالوده تا عمق دو برابر عرض شالوده. اندازه‌گیری سختی کرنش کوچک و یا سختی بیشینه از طریق روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌یی مانند روش امواج سطحی پیوسته صورت می‌پذیرد.

**گام دوم:** تعیین اندازه سختی بیشینه  $E_{max}$  از مدول برشی بیشینه  $E_{max} = 2(1 + \nu)G_{max}$ .

**گام سوم:** اصلاح سختی بیشینه بر اساس سطح فشار و کرنش وارده در عمق  $B$  (قطر شالوده) زیر شالوده بر حسب معادله‌ی ۲.

**گام چهارم:** تعیین تنش‌های قائم در عمق  $B$  زیر شالوده با استفاده از روابط توزیع تنش بوزینسک و تئوری کشسانی و محاسبه‌ی اندازه‌ی کرنش در مرکز لایه‌ی خاک.

**گام پنجم:** نشست شالوده از ضرب کرنش محاسبه‌شده در لایه‌ی خاکی به ضخامت  $2B$  حاصل می‌شود.

در ادامه، روند فرمول‌بندی رابطه‌ی پیش‌بینی نشست ارائه شده است. کرنش در وسط هر لایه‌ی خاک با استفاده از تئوری کشسانی تعیین می‌شود (معادله‌ی ۳):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \left( \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \right) \quad (3)$$

که در آن،  $\varepsilon$  کرنش محوری،  $\sigma_x$ ،  $\sigma_y$  و  $\sigma_z$  تنش در سه جهت عمود بر هم،  $\nu$  نسبت پواسون و  $E$  مدول یا ننگ لایه‌ی خاک است. در شرایط بارگذاری تقارن محوری تنش‌های افقی با یکدیگر برابرند،  $\sigma_x = \sigma_y$ . مقدار آن  $\sigma_z$  خواهد بود.  $k_0$  ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون است.

برای خاک دانه‌ی عادی تحکیم‌یافته مقدار نسبت پواسون برابر با  $0.3$  و ضریب فشار جانبی خاک حدود  $0.5$  فرض شد، از این رو معادله‌ی ۳ به صورت معادله‌ی ۴ خلاصه می‌شود:

$$\varepsilon = 0.17 \frac{\sigma_z}{E} \quad (4)$$

ارتباط میان کرنش برشی و کرنش محوری در رابطه‌ی ۵ ارائه شده است: [۱۴]

$$\gamma_\lambda = (1 + \nu)\varepsilon_\lambda \quad (5)$$

با توجه به روابط ۲ و ۵، رابطه‌ی ۶ نتیجه می‌شود:

$$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{0.1725}{\sqrt{\varepsilon_\lambda}(1 + \nu)} \quad (6)$$

با توجه به رابطه‌ی ۶ و جای‌گذاری اندازه‌ی نسبت پواسون ( $0.3$ )، رابطه‌ی ۷ حاصل می‌شود:

$$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{E}{E_{MAX}} = \frac{0.1636}{\sqrt{\varepsilon_\lambda}} \quad (7)$$

### ۳. روش جدید پیش‌بینی نشست بر مبنای سختی بیشینه

به منظور ارزیابی نشست شالوده‌ها لازم است مدول برشی بیشینه‌ی متناسب با سطح کرنش کاهش یابد. منحنی‌های مختلفی برای کاهش مدول برشی بر حسب کرنش یا تنش ارائه شده است. شکل ۱، نمونه‌ی از این منحنی‌ها را نمایش می‌دهد.

### ۱.۳. اصلاح سختی بیشینه بر حسب کرنش برشی

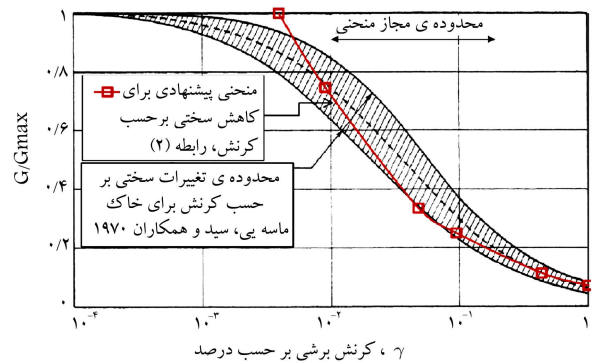
اندازه‌ی سختی بیشینه، بسیار بزرگ است و نمی‌توان آن را مستقیماً در ارزیابی نشست شالوده‌ها استفاده کرد. از این رو باید سختی بیشینه را متناسب با سطح تنش یا کرنش وارده اصلاح کرد. [۷] از این رو استفاده از این مقدار سختی در برآورد تغییرشکل‌ها منجر به نتایج واقعی نخواهد شد. لذا باید سختی اندازه‌گیری‌شده در کرنش‌های کوچک را بر حسب سطح تنش و یا کرنش ایجادشده در خاک اصلاح کرد. تاکنون روش‌های متعددی برای اصلاح سختی بر اساس سطح تنش و یا کرنش ایجادشده در خاک ارائه شده است. لازم است در ارائه‌ی روابط و یا الگوها برای اصلاح سختی به این موارد دقت کرد: [۷،۶]

۱. غیرخطی بودن تنش - کرنش خاک را با کمینه‌ی تعداد ثابت‌های مصالح، بدون کاهش دقت، بیان کند؛
۲. ثابت‌های مصالح دارای تعبیری فیزیکی باشند؛
۳. مؤلفه‌های الگو به آسانی به دست آیند.

روابط متعددی برای اصلاح مدول سختی بر حسب کرنش و سایر پارامترها، از جمله تنش مؤثر، نشانه‌ی خمیری (PI) و... ارائه شده است. به این منظور داده‌های آزمایشگاهی تغییرات سختی خاک در کرنش‌های مختلف، از مقالات و گزارش‌های علمی اخیر [۱۵،۱۴،۱۱،۷] گردآوری شد. مدول برشی نرمالیزه بر حسب کرنش، تحت بارگذاری استاتیکی کاهش بیشتری نسبت به بارگذاری سیکلی دارد. [۱۶] از این رو کران پایین منحنی تغییرات سختی بر حسب کرنش شکل ۲ جهت تخمین سختی اصلاح‌شده در نظر گرفته شد. به این منظور رابطه‌ی کاهش مدول بر حسب کرنش برشی برای خاک‌های دانه‌ی عادی تحکیم‌یافته ارائه شده است (رابطه‌ی ۲):

$$\frac{G}{G_{MAX}} = \frac{0.725}{\sqrt{\gamma_\lambda}} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $G$  مدول برشی و  $\gamma_\lambda$  کرنش برشی بر حسب درصد است. محققان، [۱۵] محدوده‌ی تغییرات سختی برشی بر حسب کرنش برشی را برای خاک‌های دانه‌ی به صورت شکل ۲ پیشنهاد کردند. در این شکل، معادله‌ی پیشنهادی ۲ توسط مؤلفان



شکل ۲. محدوده‌ی تغییرات منحنی معادله‌ی پیشنهادی ۲ در نمودار سید و همکاران.

با توجه به روابط ۴ و ۷، کرنش در وسط هر لایه بر حسب درصد، به صورت رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon\% = \left( \frac{110.1\sigma_z}{E_{MAX}} \right)^2 \quad (8)$$

بر اساس رابطه‌ی بوزینسک، اضافه‌ی تنش قائم ( $\sigma_z$ ) در عمقی برابر قطر شالوده‌ی دایره‌ی بی ( $B$ ) و در زیر مرکز سطح دایره برابر است با (رابطه‌ی ۹):

$$\sigma_z = q \left[ 1 - \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{B}{z} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right] = 0.285q \quad (9)$$

که در این رابطه،  $q$  شدت سربار زیر شالوده است. با توجه به روابط ۸ و ۹، رابطه‌ی ۱۰ حاصل می‌شود:

$$\varepsilon\% = \left( \frac{313.75q}{E_{MAX}} \right)^2 \quad (10)$$

در این رابطه،  $E_{MAX}$  متوسط مقادیر مدول یانگ بیشینه تا عمق ۲B زیر شالوده است. با ضرب کرنش ( $\varepsilon\%$ ) در لایه‌ی بی با ضخامت دو برابر قطر شالوده و تقسیم آن بر ۱۰۰، نشست شالوده پیش‌بینی می‌شود. مقدار نشست شالوده‌ی دایره‌ی بی با قطر  $B$  مستقر بر روی خاک دانه‌ی بی بر حسب سختی بیشینه برابر است با (رابطه‌ی ۱۱):

$$S = \left( \frac{313.75q}{E_{MAX}} \right)^2 \cdot \frac{B}{50} \quad (11)$$

در این رابطه،  $B$  قطر شالوده بر حسب متر،  $q$  بر حسب کیلوپاسکال،  $E_{MAX}$  بر حسب کیلوپاسکال و  $S$  نشست شالوده بر حسب متر هستند.

#### ۴. آزمون‌های بارگذاری و امواج سطحی در محل

به منظور بررسی صحت روش جدید تخمین نشست بر مبنای سختی بیشینه در این نوشتار، نتایج آزمون‌های ژئوفیزیکی لرزه‌ی و آزمون بارگذاری بر روی ۹ شالوده با ابعاد متفاوت و در ۴ ساخت‌گاه مختلف، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. ۴ ساخت‌گاه عبارت‌اند از:

۱. سایت پردیس دانشگاه سمنان، [۷-۹، ۱۷]

۲. سایت دانشگاه آوم تگزاس، [۱۸]

۳. سایت شهر دویلین، [۱۹]

۴. سایت انیستیتو ژئوتکنیک بولنج سوئد، [۲۰]

مشخصات ژئوتکنیکی ۴ ساخت‌گاه فوق و نتایج آزمون‌های امواج سطحی و بارگذاری در محل، در ادامه ارائه شده است.

#### ۱.۴. مشخصات ژئوتکنیکی بستر پردیس دانشگاه سمنان

محل مورد مطالعه در ساخت‌گاه پردیس دانشگاه سمنان، بر روی بستری از مصالح شن و ماسه‌ی سیمانته قرار داشته است. خاک محل از سطح زمین تا عمق ۲ متری از نوع شن بد دانه‌بندی‌شده با تراکم متوسط و در عمق ۲ متری یک لایه با ضخامت یک متر از ماسه‌ی خوب دانه‌بندی‌شده با تراکم متوسط به رنگ قهوه‌ی تیره مشاهده شد. از تراز ۳ تا ۵ متری لایه‌ی بی از شن سیمانته‌شده همراه با ماسه و

سیلت با تراکم متوسط و از عمق ۵ متری به بعد خاک ماسه‌ی خوب دانه‌بندی‌شده با تراکم متوسط گزارش شده است. تراز آب زیرزمینی در حین حفاری مشاهده نشده و وزن مخصوص خاک حدود ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

سرعت موج برشی درجا، با استفاده از آزمون صحرایی جدید امواج سطحی پیوسته اندازه‌گیری شد. این روش ضمن حفظ شرایط دست‌نخورده‌ی در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و مصالح، قابلیت تعیین سختی کلی توده‌های خاک و یا سنگ را دارد. روش امواج سطحی پیوسته، یک روش شناسایی ژئوفیزیکی نوین برای ارزیابی ساختار سختی زیر سطحی با استفاده از لرزاننده و تعدادی گیرنده است. سیستم امواج سطحی با ایجاد ضربه بر روی سطح زمین با استفاده از لرزاننده الکترومکانیکی و دریافت پاسخ زمین با استفاده از گیرنده‌های خاصی (ژئوفون‌ها)، سرعت امواج رابلی زمین را اندازه‌گیری می‌کند. این روش بر اساس تحلیل طیفی داده‌های دریافتی ژئوفون‌ها، سرعت امواج رابلی را اندازه‌گیری می‌کند. اندازه‌ی سرعت امواج رابلی حدود ۰/۹۳، اندازه‌ی سرعت امواج برشی است و سرعت امواج برشی و امواج رابلی با تابعی از نسبت پواسون خاک، با یکدیگر رابطه دارند. [۱۱، ۲۱] در شکل ۳، لاگ گمانه، نتایج آزمون نفوذ استاندارد، و اندازه‌ی سرعت موج برشی در محل مشاهده می‌شود.

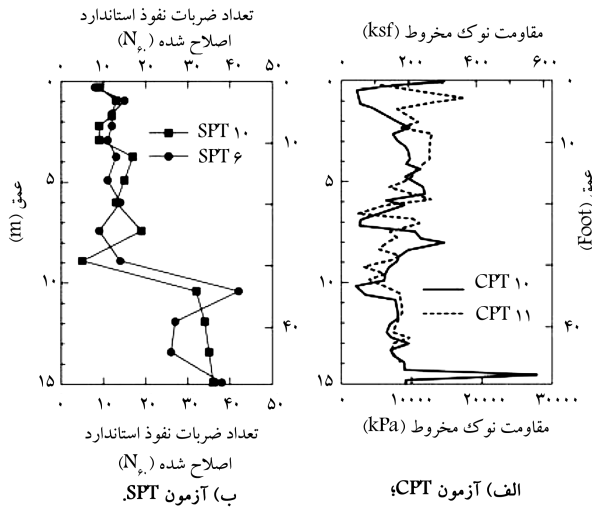
در سایت دانشگاه سمنان دو آزمون بارگذاری به روش ASTM D۱۱۹۴ [۲۲] بر روی صفحه‌های فولادی با قطرهای ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر انجام شد. بارها به صورت مرحله‌ی و از طریق قراردادن جک بارگذاری در زیر محور کامیون با بار اعمال شد. بیشینه‌ی بار وارده با توجه به وزن کامیون حدود ۱۴۵۰۰ کیلوگرم محدود شده بود. هر مرحله‌ی بارگذاری شامل افزایش بار در مدت ۱۰ الی ۲۰ ثانیه، سپس مرحله‌ی ساکن حدود ۴ دقیقه که بارگذاری متوقف شده بود دو عدد نفوذسنج که با میله‌هایی به تیر مرجع متصل بودند، برای تعیین نشست صفحه‌ی مستقر بر روی خاک مورد استفاده قرار گرفت. در شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب آزمون امواج سطحی پیوسته و آزمون بارگذاری صفحه در سایت دانشگاه سمنان مشاهده می‌شود.

#### ۲.۴. مشخصات ژئوتکنیکی بستر دانشگاه آوم تگزاس

خاک سایت از نوع دانه‌ی بی و غیرجسبیده بوده است. محققان [۲۳]، مجموعه‌ی آزمایش‌هایی به منظور بررسی مشخصات ژئوتکنیکی در سایت دانشگاه تگزاس انجام دادند. سطح آب زیرزمینی در عمق ۴/۹ متری قرار داشت، درصد رطوبت ماسه‌ی نزدیک سطح زمین در زمان آزمایش‌ها در محدوده‌ی ۱۲-۱۴

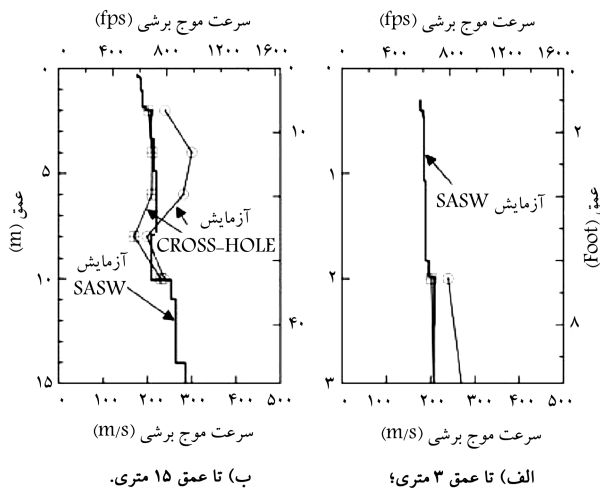
Boring log		موقعیت: پردیس دانشگاه سمنان		کل عمق گمانه: ۱۰ متر سطح آبی مشاهده نگردید.	
عمق (متر)	مشخصات لایه‌های خاک	جرم واحد حجم (gr/cm <sup>3</sup> )	N (SPT)	V <sub>s</sub> (m/s) سرعت موج برشی ۱۰۰ ۲۰۰ ۳۰۰	
۰-۱	قهوه‌ی تیره، تراکم متوسط، شن بد دانه بندی شده به همراه ماسه (GP)	۱/۸۰	۴۰		
۱-۳	قهوه‌ی تیره، تراکم متوسط، ماسه خوب دانه بندی شده به همراه شن (SW)		۵۰		
۳-۴	قهوه‌ی تیره، تراکم متوسط، شن بد دانه بندی شده به همراه ماسه و سیلت (GP-GM)		۴۵		
۴-۱۰	قهوه‌ی تیره، تراکم متوسط، شن بد دانه بندی شده به همراه شن (SW)		۱۹		

شکل ۳. لاگ گمانه‌ی آزمون نفوذ استاندارد و نتایج آزمون امواج سطحی پیوسته در محل.



شکل ۴. آزمون امواج سطحی پیوسته در پردیس دانشگاه سمنان.

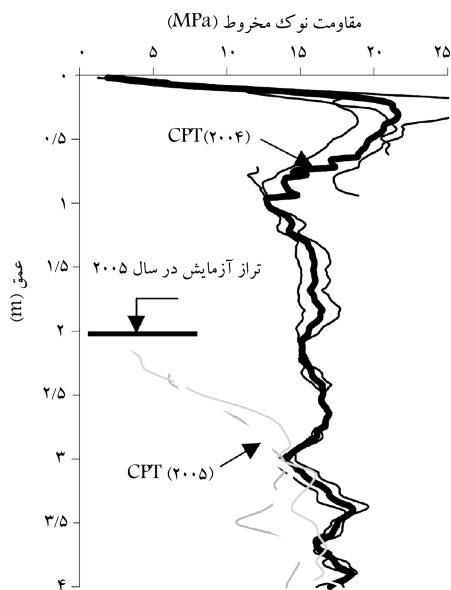
شکل ۶. نتایج آزمون نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط در سایت دانشگاه تگزاس. [۱۸]



شکل ۷. سرعت امواج برشی در سایت دانشگاه تگزاس. [۱۸]



شکل ۵. آزمون بارگذاری صفحه در پردیس دانشگاه سمنان.



شکل ۸. نتایج آزمون نفوذ مخروط در سایت حومه‌ی شهر دوبلین. [۱۹]

درصد بود و وزن مخصوص خاک حدود ۱۹/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب ارزیابی شد.

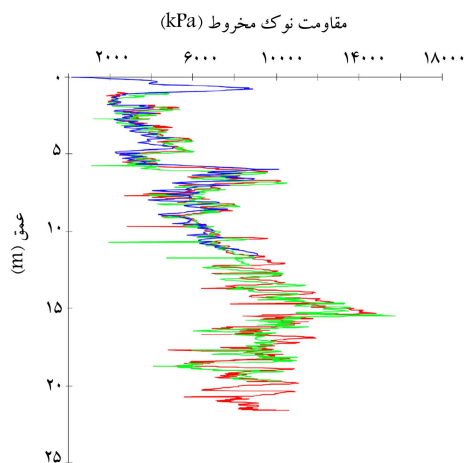
شکل‌های ۶ و ۷، نتایج آزمون‌های نفوذی و اندازه‌ی سرعت موج برشی با استفاده از روش امواج سطحی در سایت دانشگاه آوم تگزاس را نمایش می‌دهند.

در سایت دانشگاه تگزاس دو شالوده‌ی بتنی دایره‌یی با ابعاد ۹۱ و ۴۶ سانتی‌متر و یک صفحه‌ی فولادی با قطر ۲۵ سانتی‌متر بارگذاری شدند. نشست‌های متناظر با فشار وارده روی هر دو شالوده‌ی بتنی و صفحه‌ی فولادی اندازه‌گیری شد.

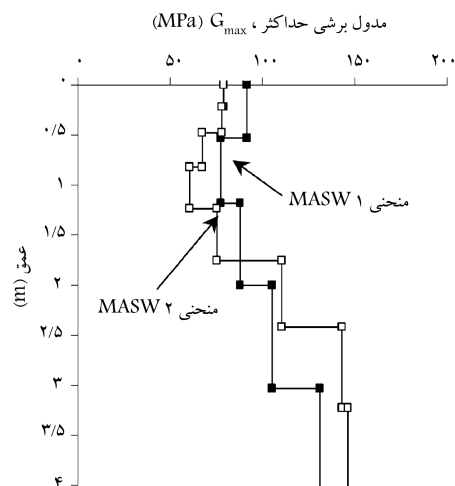
### ۳.۴. مشخصات ژئوتکنیکی بستر سایت شهر دوبلین

ساخت‌گاه مورد مطالعه، در ۲۵ کیلومتری جنوب غربی حومه‌ی شهر دوبلین ایرلند واقع شده است. خاک منطقه از نوع ماسه‌ی ریزدانه تا ماسه‌ی درشت‌دانه متغیر است.

نتایج آزمون CPT و اندازه‌ی مدول برشی بیشینه، که با استفاده از روش امواج سطحی اندازه‌گیری شده است، در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. در سایت



شکل ۱۰. نتایج آزمون نفوذ مخروط در سایت انستیتو ژئوتکنیک سوئد. [۲۰]



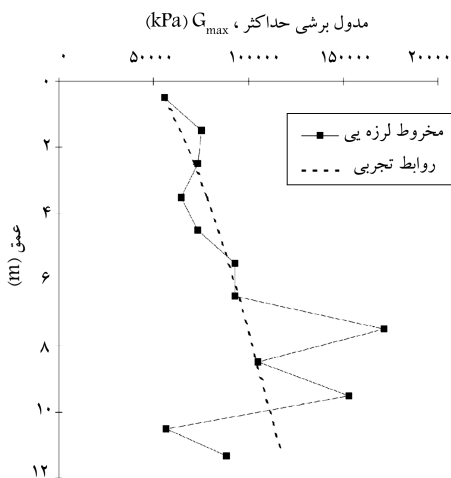
شکل ۹. نتایج آزمون امواج سطحی در سایت حومه‌ی شهر دوبلین. [۱۹]

دوبلین ایرلند، صفحه‌ی مربعی‌شکل با ابعاد ۴۰ سانتی‌متر بارگذاری شده و نتایج فشار - نشست آن ارائه شد.

#### ۴.۴. مشخصات ژئوتکنیکی بستر سایت انستیتو ژئوتکنیک سوئد

ساختمان‌گاه در ۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر بورلنج در مرکز سوئد واقع شده است. بر مبنای مشاهده‌ی بصری نمونه‌ها و نتایج آزمون سونداژ، پروفیل خاک محل تا عمق زیادی از نوع سیلتی است. در تراز ۵ متری زیر سطح زمین، جنس لایه‌های خاک از نوع رسی بسیار سفت هستند. تراز آب زیرزمینی در عمق ۱۱ متری زیر سطح زمین قرار داشت.

شکل ۱۰، نتایج آزمون CPT را نمایش می‌دهد. پروفیل سختی بیشینه‌ی برجای خاک، که از مقادیر سرعت امواج برشی در محل و چگالی حجمی ارزیابی شده است، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در سایت بورلنج سوئد، ۳ شالوده‌ی مربعی‌شکل با ابعاد ۰٫۵، ۱ و ۲ متری بارگذاری شده‌اند.



شکل ۱۱. پروفیل سختی بیشینه‌ی بر حسب عمق در سایت انستیتو ژئوتکنیک سوئد. [۲۰]

فشار وارده‌ی خالص در تراز شالوده است. روش اشترمن از مدول یانگ ( $E$ ) برای پیش‌بینی نشست استفاده می‌کند.

مین و پلوس [۲۵] تکنیکی برای محاسبه‌ی ضرایب تأثیر جابجایی برای محاسبه‌ی نشست کشسان در خاک‌های همگن و ناهمگن با ضخامت محدود تا نامحدود ارائه کردند. اثر صلبیت شالوده و عمق مدفون‌شدگی با استفاده از ضرایب تقریبی عنوان شد. بر اساس این فرضیه رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$S_{footing} = \frac{q_{net} B' I_G I_F I_E (1 - \nu^2)}{E_s} \quad (13)$$

که در آن،  $B'$  قطر معادل شالوده‌ی مستطیلی،  $\nu$  نسبت پواسون خاک،  $E_s$  مدول یانگ خاک،  $I_G$  ضریب تأثیر جابجایی،  $I_E$  ضریب تأثیر نشست برای در نظر گرفتن عمق مدفون‌شدگی و  $I_F$  ضریب تأثیر صلبیت هستند.

در این مطالعه، به منظور پیش‌بینی نشست بر حسب روش‌های اشترمن و مین و پلوس از همبستگی با نتایج آزمون‌های نفوذ مخروط و نفوذ استاندارد استفاده شده است. از این رواز همبستگی پیشنهادی بر حسب اندازه‌ی مقاومت نوک مخروط،  $E_s = 2 - 3.75 q_c$ ، برای خاک ماسه‌بی عادی تحکیم‌یافته استفاده شده است. [۲۳، ۲۴]

همچنین بر مبنای نتایج آزمون نفوذ استاندارد از همبستگی‌های پیشنهادی بین  $E$

#### ۵. بررسی صحت روش جدید پیش‌بینی نشست

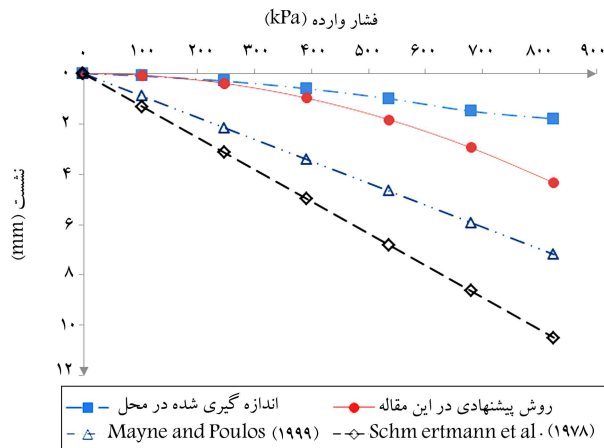
به منظور بررسی صحت روش پیشنهادی در این نوشتار، نتایج منحنی‌های فشار - نشست پیش‌بینی‌شده بر حسب سختی بیشینه‌ی اصلاح‌شده با نتایج آزمون‌های بارگذاری مقایسه شدند. همچنین با استفاده از روش‌های پیش‌بینی نشست اشترمن و همکاران [۲۴] و مین و پلوس [۲۵] بر حسب نتایج آزمون نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط، منحنی‌های فشار - نشست ۹ شالوده‌ی مختلف پیش‌بینی شد و با منحنی‌های حاصل از نتایج آزمون بارگذاری و روش سختی بیشینه‌ی اصلاح‌شده مورد مقایسه قرار گرفت.

اشترمن [۲۴] یک روش نیمه تجربی ساده بر اساس تحلیل کشسان و تحلیل اجزاء محدود، به منظور برآورد نشست شالوده بر روی خاک‌های دانه‌بی، ارائه کرد (رابطه‌ی ۱۲):

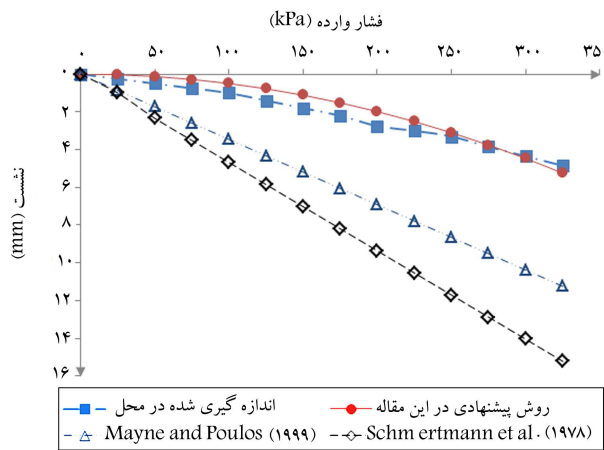
$$\delta_{footing} = C_1 C_2 q_{net} \sum_{z=0}^{z=B} \frac{I_z dz}{E} \quad (12)$$

که در این رابطه،  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب ضرایب عمق و زمان،  $I_z$  ضریب تأثیر و  $q_{net}$

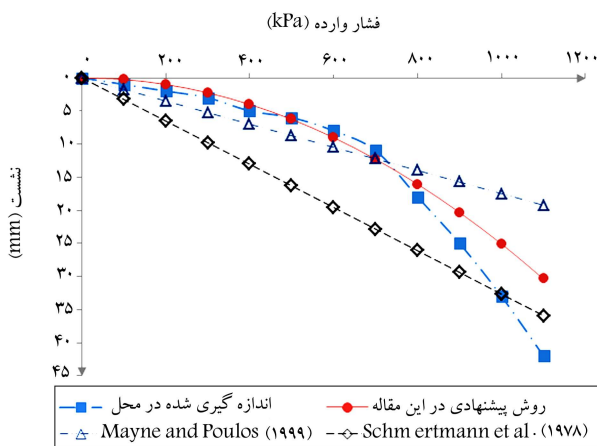




شکل ۱۳. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی صفحه‌ی دایره‌ی ۳۰ سانتی متری در سایت دانشگاه سمنان.



شکل ۱۴. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی شالوده‌ی بتنی دایره‌ی ۹۱ سانتی متری در سایت دانشگاه نگراس.



شکل ۱۵. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی شالوده‌ی بتنی دایره‌ی ۴۶ سانتی متری در سایت دانشگاه نگراس.

و  $N_{60}$  برای ماسه‌ی سیلتی مورد استفاده قرار گرفت (رابطه‌ی ۱۴):<sup>[۲۶]</sup>

$$E = 50000\sqrt{OCR} + 12000N_{60} \quad (14)$$

که در آن،  $E$  بر حسب psf است،  $OCR$  نسبت پیش‌تحکیمی و  $N_{60}$  مقاومت نفوذ استاندارد اصلاح شده با ۶۰٪ انرژی چکش است. همچنین از همبستگی پیشنهادی برای ماسه‌ی عادی تحکیم‌یافته بر حسب نتایج آزمون نفوذ استاندارد استفاده شده است (رابطه‌ی ۱۵):<sup>[۲۳]</sup>

$$E(kpa) = 500(N_{60} + 15) \quad (15)$$

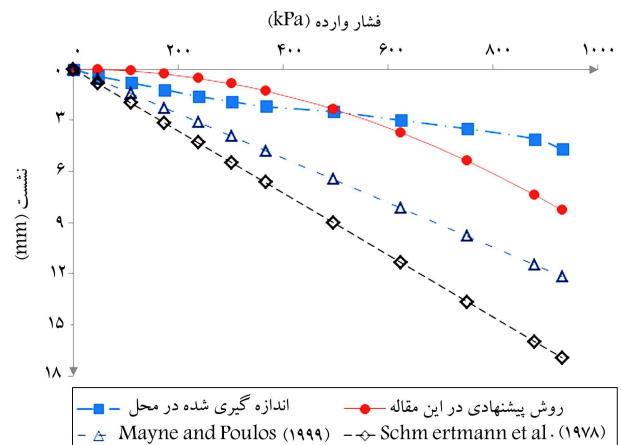
### ۱.۵. مقایسه‌ی میان منحنی‌های فشار- نشست اندازه‌گیری شده و

#### پیش‌بینی شده

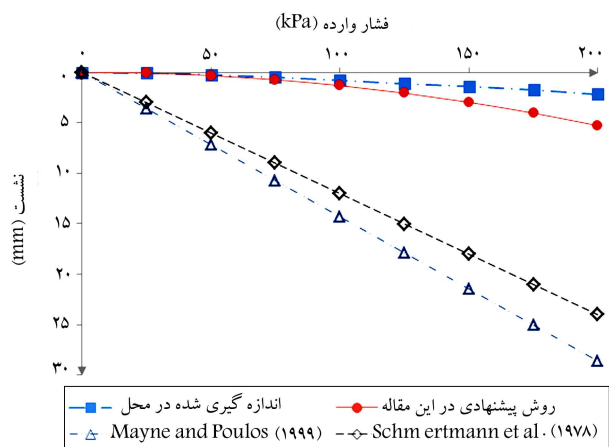
نشست پیش‌بینی شده با استفاده از روش پیشنهادی در این نوشتار و روش‌های اشمرتن<sup>[۲۴]</sup> و مین و پلوس<sup>[۲۵]</sup> برحسب تعداد ضربات آزمون نفوذ استاندارد و مقاومت نوک مخروط با نشست اندازه‌گیری شده مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. این مقایسه به صورت نمودارهای فشار- نشست با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده‌اند. در شکل‌های ۱۲ الی ۲۰، منحنی‌های مقایسه‌ی فشار- نشست ۹ شالوده‌ی مختلف با ابعاد و اندازه‌های متفاوت مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

### ۶. بررسی نتایج

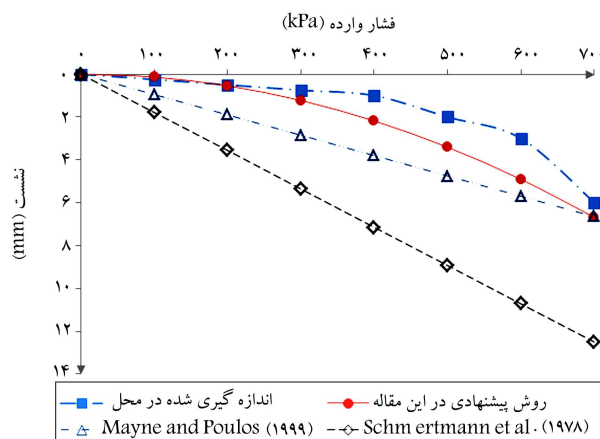
تئوری کشسانی، روش مناسبی به منظور پیش‌بینی نشست آنی است. در این پژوهش، خاک زیر شالوده به صورت نیم فضای همگن و همسان با مصالح کشسان غیرخطی و فشار وارده به خاک به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. اساسی‌ترین پارامتر در پیش‌بینی نشست شالوده‌های سطحی، اندازه‌گیری سختی یا مدول یانگ خاک است. مدول یانگ خاک ثابت نیست و با تغییر سطح تنش و یا کرنش تغییر می‌کند. لذا ارزیابی مدول یانگ مناسب در سطح تنش وارده، اهمیت زیادی دارد. مدول یانگ نمی‌تواند مستقیماً اندازه‌گیری شود. روش‌های متداول بر اساس روابط تجربی، مدول یانگ خاک را از تعداد ضربات آزمون نفوذ استاندارد و یا مقاومت نوک مخروط تعیین می‌کنند. این روابط تجربی هستند و به همین دلیل نمی‌توانند



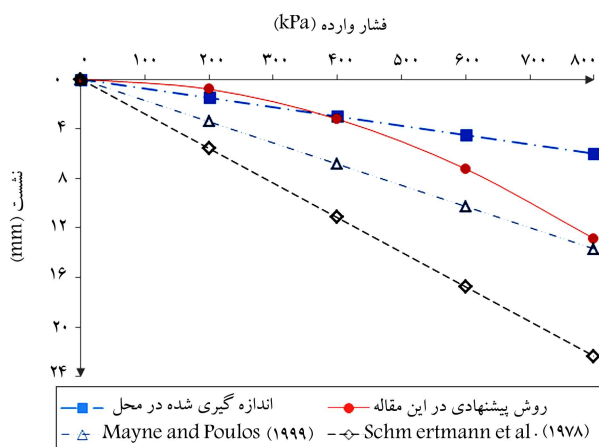
شکل ۱۶. منحنی بار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی صفحه‌ی دایره‌ی ۴۵ سانتی متری در سایت دانشگاه سمنان.



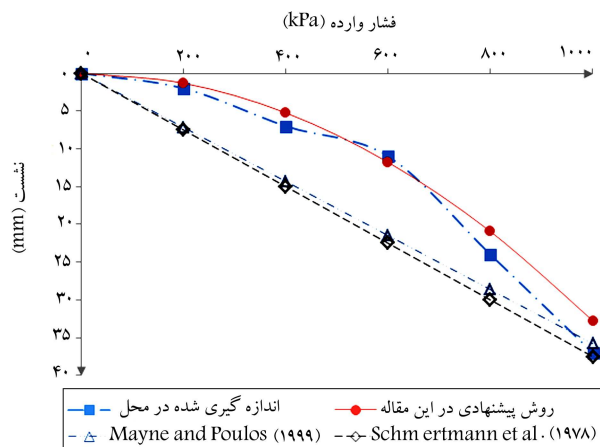
شکل ۱۵. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بزرگ‌ترین سطحی مربعی با ابعاد ۲ متری آنستیتو ژئوتکنیک بولرنج سوئد.



شکل ۱۶. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بزرگ‌ترین دایره‌بی ۲۵ سانتی متری در سایت دانشگاه تگزاس.



شکل ۱۹. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بزرگ‌ترین سطحی مربعی ۴۰ سانتی متری در سایت دولین ایرلند.



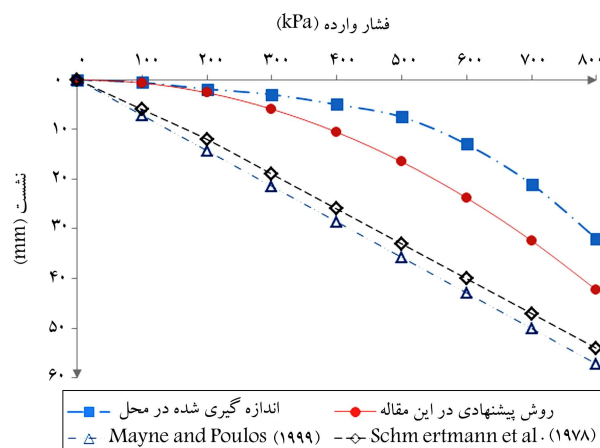
شکل ۱۷. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بزرگ‌ترین سطحی مربعی با ابعاد ۰/۵ متری آنستیتو ژئوتکنیک بولرنج سوئد.

مدول یانگ مناسبی برای ارزیابی نشست شالوده‌ی سطحی در سطوح مختلف تنش ارائه کنند. همچنین به علت اینکه نمونه‌گیری از خاک‌های دانه‌ی به صورت دست‌نخورده مشکل است، امکان آزمایش بر روی نمونه‌ی دست‌نخورده در آزمایشگاه بسیار مشکل است.

روش‌های تجربی به علت پیش‌بینی محافظه‌کارانه‌ی نشست شالوده‌ها، موجب طراحی‌های غیراقتصادی شالوده‌ها می‌شوند. با پیشرفت‌های دو دهه‌ی گذشته در روش‌های ژئوفیزیکی، مشخصات واقعی خاک‌ها به صورت درجا قابل اندازه‌گیری هستند سرعت امواج برشی ( $V_s$ ) شرایط واقعی خاک را بسیار مؤثرتر و قابل اعتمادتر از پارامترهای مقاومت برشی آزمایشگاهی یا درجا ارائه می‌کند.

سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده‌ی درجا به عنوان یک شاخص درجای اساسی، شرایط واقعی خاک را بسیار مؤثرتر و قابل اعتمادتر از پارامترهای مقاومت برشی آزمایشگاهی یا درجا ارائه می‌کند. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری سرعت موج برشی در محل وجود دارد. سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده‌ی درجا تصویر مناسبی از خاک را منعکس می‌کند که عبارت‌اند از: نسبت تخلخل، تنش محصورکنندگی مؤثر، تاریخچه‌ی تنش، مقاومت‌های برشی و فشاری و غیره.

با اندازه‌گیری سرعت امواج برشی، مدول برشی بیشینه در کرنش‌های خیلی کوچک ( $G_{max}$ ) و مدول یانگ بیشینه ( $E_{max}$ ) معین می‌شوند. آزمایش‌های



شکل ۱۸. منحنی فشار- نشست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بزرگ‌ترین سطحی مربعی با ابعاد ۱ متری آنستیتو ژئوتکنیک بولرنج سوئد.

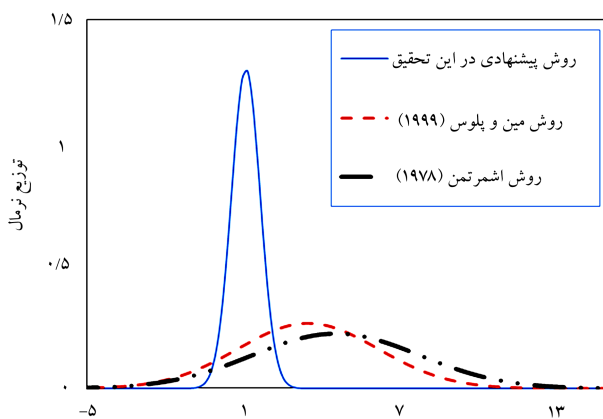


جدول ۲. مقایسه‌ی میانگین نسبت نشست پیش‌بینی شده به اندازه‌گیری شده در فشارهای باربری متداول شالوده‌ها ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال.

موقعیت مکانی آزمون بارگذاری	مرجع آزمایش	ابعاد صفحه و یا شالوده‌ی مورد آزمایش بارگذاری	روش ارائه‌شده در این نوشتار، رابطه‌ی ۱۱	روش مین و پلوس [۲۵]	روش اشمرتمن [۲۴]
پردیس دانشگاه سمنان	[۷]	صفحه‌ی دایره‌یی ۳۰ سانتی‌متری	۱٫۲۰	۷٫۲۸	۱۰٫۶۲
پردیس دانشگاه سمنان	[۷]	صفحه‌ی دایره‌یی ۴۵ سانتی‌متری	۰٫۴۷	۱٫۹۷	۲٫۲۱
سایت دانشگاه آوم تگزاس	[۱۸]	شالوده‌ی بتنی دایره‌یی ۹۱ سانتی‌متری	۰٫۷۵	۲٫۷۶	۳٫۷۳
سایت دانشگاه آوم تگزاس	[۱۸]	شالوده‌ی بتنی دایره‌یی ۴۶ سانتی‌متری	۰٫۵۷	۱٫۶۳	۳٫۰۴
سایت دانشگاه آوم تگزاس	[۱۸]	صفحه‌ی دایره‌یی ۲۵ سانتی‌متری	۱٫۲۷	۳٫۸	۷٫۱۴
سایت برلنج سوئد	[۲۰]	شالوده‌ی مربعی با عرض ۲ متر	۲٫۰۳	۱۵٫۴۳	۱۲٫۹۵
سایت برلنج سوئد	[۲۰]	شالوده‌ی مربعی با عرض ۱ متر	۱٫۷۱	۸٫۳۸	۷٫۱۷
سایت برلنج سوئد	[۲۰]	شالوده‌ی مربعی با عرض ۰٫۵ متر	۰٫۷۰	۲٫۸۱	۲٫۹۵
سایت دوپلین ایرلند	[۱۹]	صفحه‌ی مربعی با عرض ۴۰ سانتی‌متر	۰٫۶۴	۲٫۲۸	۳٫۷۲
میانگین نسبت نشست پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده			۱٫۰۴	۳٫۴۳	۴٫۵۱
انحراف استاندارد			۰٫۵۵	۲٫۷۱	۳٫۲۲

روش‌های متداول پیش‌بینی نشست را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۲، میانگین نسبت‌های نشست پیش‌بینی شده بر حسب نشست اندازه‌گیری شده در فشارهای متداول شالوده‌ها مشاهده می‌شود. نتایج مندرج در جدول ۲ نشان می‌دهند که پیش‌بینی نشست بر مبنای روش ارائه‌شده در این پژوهش و برای داده‌های حاصل از آزمایش‌های صحرایی در ۴ سایت مورد بررسی به مراتب از دقت و اعتمادپذیری بیشتری نسبت به پیش‌بینی نشست بر حسب روش‌های اشمرتمن و مین و پلوس برخوردار است. اختلاف نتایج میان نشست محاسبه‌شده با استفاده از روش این پژوهش و مقادیر مشاهده‌شده به‌طور میانگین کمتر از ۱٪ بوده است. این در صورتی است که روش‌های مبتنی بر نتایج آزمون‌های نفوذی، روش اشمرتمن و مین و پلوس، نشست شالوده را با اختلاف بیش از ۱٪ و در برخی موارد بسیار محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. اختلاف مشاهده‌شده در روش‌های اشمرتمن و مین و پلوس به دلیل تخمین سختی خاک بر حسب نتایج آزمون‌های نفوذی است که موجب ایجاد خطای زیادی در پیش‌بینی نشست شالوده‌ها می‌شود.

در شکل ۲۱، منحنی توزیع نرمال نسبت نشست پیش‌بینی شده به اندازه‌گیری شده در روش مین و پلوس و روش پیشنهادی در این پژوهش مشاهده می‌شود. قله‌ی منحنی



شکل ۲۱. منحنی‌های توزیع نرمال نسبت نشست پیش‌بینی شده به نشست اندازه‌گیری شده در روش مین و پلوس و روش پیشنهادی در این پژوهش مشاهده می‌شود. قله‌ی منحنی

شکل ۲۱. منحنی‌های توزیع نرمال نسبت نشست پیش‌بینی شده به اندازه‌گیری شده در فشارهای متداول باربری برای روابط ارائه‌شده.

ژئوفیزیکی سیستم امواج سطحی پیوسته (CSWS) و آنالیز طیفی امواج سطحی (SASW) می‌توانند مشخصات مکانیکی خاک را با دقت بسیار خوب و بدون اغتشاش و دست‌خوردگی در توده‌ی خاک اندازه‌گیری کنند.

آزمون‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی خاک منطبق بر واقعیت، نیازمند تهیه‌ی نمونه‌ی دست‌نخورده از توده‌ی خاک هستند. اثر دست‌خوردگی نمونه در رفتار تنش - کرنش خاک به‌طور قابل توجهی تأثیر می‌گذارد. بررسی‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران [۱۸، ۱۹] نشان داده است، که آزمایش‌های صحرایی، مشخصات دینامیکی خاک‌ها: سرعت امواج برشی و سختی بیشینه‌ی خاک را با دقت و اطمینان بالاتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌کنند.

نتایج حاصل از تحلیل‌های برگشتی و همچنین آزمون‌های بارگذاری شالوده‌ها نشان می‌دهند که رفتار خاک غیرخطی است و با افزایش سطح فشار و کرنش، سختی خاک کاهش قابل ملاحظه‌یی می‌یابد. منحنی‌ها و روابط متعددی برای تغییرات سختی خاک بر حسب کرنش ارائه شده است. اغلب این نمودارها متعلق به شرایط بارگذاری سیکلی است و در بارگذاری استاتیکی چندان مناسب نیست. مدول برشی نرمالیزه بر حسب کرنش، تحت بارگذاری استاتیکی کاهش بیشتری نسبت به بارگذاری سیکلی دارد و با افزایش سطح کرنش سختی خاک در حالت استاتیکی بیشتر تنزل می‌یابد.

در این نوشتار، بر اساس گزارش‌های علمی و نتایج آزمون‌های بارگذاری، رابطه‌یی توانی؛ رابطه‌ی ۲ به منظور کاهش مدول بیشینه بر حسب تابعی از کرنش برشی ارائه شده است. این رابطه، نیمه تجربی است که براساس تلفیق آزمون بارگذاری صفحه و آزمون ژئوفیزیکی امواج سطحی به دست آمده است. همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود، نسبت سختی نرمالیزه با معکوس جذر کرنش ایجادشده در خاک ارتباط دارد. این رابطه، محدود به خاک‌های ماسه‌یی عادی تحکیم‌یافته است و برای انواع دیگر خاک‌ها، نیاز به تحقیق و بررسی بیشتری است.

با ادغام رابطه‌ی کشسانی هوک و با در نظر گرفتن کرنش جانبی و رابطه‌ی ۲، رابطه‌ی ۱۱ به منظور پیش‌بینی نشست ارائه شده است. در رابطه‌ی ۱۱، مقدار نشست با مجذور بار و عرض شالوده رابطه‌ی مستقیم و با مجذور مدول یا ننگ بیشینه، به‌طور عکس ارتباط دارد.

نمودارهای ۱۲ الی ۲۰، بیان‌گر صحت و دقت بالای روش پیش‌بینی نشست بر مبنای سختی بیشینه است و پراکندگی کمتر روش ارائه‌شده در این پژوهش، نسبت به

نرمال، نشان‌دهنده‌ی نسبت نشست‌های ارزیابی‌شده با روش‌های مختلف است. با دقت در این متحنی‌ها می‌توان مشاهده کرد که قله‌ی متحنی نرمال در رابطه‌ی پیشنهادی به عدد ۱ نزدیک است و این می‌تواند تأییدی بر دقت بیشتر رابطه‌ی پیشنهادی نسبت به سایر روابط باشد. این امر بیان‌گر آن است که پیش‌بینی نشست بر مبنای نتایج آزمون‌های ژئوفیزیکی، دقت بالایی دارد و منجر به نتایجی دقیق و نزدیک به واقعیت می‌شود.

## ۷. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، ارائه‌ی روشی مبتنی بر رفتار ارتجاعی غیرخطی به منظور برآورد تغییرمکان است. تحقیقات انتشار یافته توسط پژوهشگران متعددی بر این امر تأکید دارند که رفتار خاک تحت بارگذاری‌های مختلف غیرخطی است و تئوری ارتجاعی خطی به خوبی نمی‌تواند رفتار خاک را پیش‌بینی کند. نوآوری و روش پیشنهادی در این نوشتار، با هدف بررسی رفتار غیرخطی خاک و کاربرد آن در برآورد نشست شالوده‌های سطحی است.

اغلب روش‌های متداول پیش‌بینی نشست در خاک‌های دانه‌ی بر اساس همبستگی بین نتایج آزمون نفوذ استاندارد و یا آزمون نفوذ مخروط هستند. این روش‌ها به علت تجربی بودن، اغلب محافظه‌کارانه است و موجب طراحی‌های غیراقتصادی می‌شوند. روش ژئوفیزیکی لرزه‌ی امواج سطحی، شیوه‌ی نوینی در ارزیابی مشخصات مکانیکی خاک بدون ایجاد دست‌خوردگی در توده‌ی خاک است. در روش امواج سطحی، سرعت امواج برشی در لایه‌ها تعیین و با تبدیل آن به مدول برشی بیشینه و یا مدول یا ننگ بیشینه، سختی توده‌ی خاک تعیین می‌شود. در این نوشتار، رابطه‌ی برای کاهش مدول برشی بیشینه بر حسب کرنش برشی

ارائه شده است. رابطه‌ی ارائه‌شده ساده و دارای دقت مناسبی است. قابل ذکر است که رابطه‌ی مذکور برای خاک دانه‌ی عادی تحکیم‌یافته ارائه شده است و فقط برای این نوع خاک توصیه می‌شود. از این رو برای سایر انواع خاک‌ها لازم است، که ضرایب رابطه‌ی ۱۱ اصلاح شود. رابطه‌ی کاهش مدول در کرنش‌های بیشتر از  $0.1\%$ ، مقادیر کاهش مدول را با همبستگی مناسبی ارائه می‌کند. به دلیل آنکه محدوده‌ی کرنش برای پیش‌بینی نشست مقادیر بالاتری را نسبت به مقدار  $0.1\%$  دارد، این تابع برای پیش‌بینی کاهش مدول به منظور پیش‌بینی نشست مناسب است. هدف نهایی این نوشتار، ارائه‌ی رابطه‌ی برای محاسبه‌ی نشست شالوده‌ی سطحی بر حسب مدول یا ننگ بیشینه‌ی اصلاح شده است. رابطه‌ی ارائه‌شده، مقدار نشست شالوده‌ی سطحی را بر حسب بار وارده از طرف پی، عرض شالوده و مدول یا ننگ بیشینه محاسبه می‌کند. خاک به صورت نیم فضای همگن و کشسان غیرخطی فرض شد. به منظور بررسی صحت روش پیشنهادی در این نوشتار، نتایج آزمون‌های بارگذاری بر روی ۹ شالوده در ۴ ساخت‌گاه مختلف، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. انطباق بسیار خوب بین نتایج، نشان از دقت بالای روش ارائه‌شده در این موارد عملی دارد. پیش‌بینی نشست شالوده در خاک‌های دانه‌ی با استفاده از این روش به نشست واقعی نزدیک‌تر است و در مورد ۴ ساخت‌گاه مورد بررسی، مقدار اختلاف نتایج اندازه‌گیری‌شده با مقادیر پیش‌بینی‌شده کمتر از  $1\%$  بوده است. لازم به ذکر است در بررسی‌های انجام‌شده، ابعاد شالوده‌های سطحی به طور متداول  $0.25$  متر و فشار وارده بر زمین به طور میانگین از  $400$  کیلوپاسکال کمتر بوده است. از جمله مزایای این روش آن است که می‌توان با یک بار اندازه‌گیری سرعت موج برشی و برآورد نسبتاً دقیق سختی توده‌ی خاک، نشست شالوده‌های سطحی بر روی خاک‌های دانه‌ی را با دقت مناسبی تعیین کرد. از این رو پیشنهاد می‌شود، بررسی و اعتبارسنجی این روش در سایر ساخت‌گاه‌ها با خاک دانه‌ی و یا خاک‌های چسبیده مورد مطالعه قرار گیرد و قابلیت‌های آن گسترش یابد.

## منابع (References)

1. Malekdoost, M. and Eslami, A. "Application of CPT data for estimating foundation settlement-case histories", *Sharif Journal Civil Engineering*, **1**, pp.75-85 (2011) (In Persian).
2. Sheehan, A.J. "Prediction of shallow footing settlements on cohesionless materials from seismic testing", M.D. Dissertation, Department of civil Engineering, The University of Texas at Austin (2005).
3. Das braja, M. and Sivakugan, N. "Settlements of shallow foundations on granular soil - an overview", *International Journal of Geotechnical Engineering*, DOI 10.3328/IJGE, pp. 19-29 (2007).
4. Das braja, M., Atalar, C. and Shin, E.C. "Developments in elastic settlement estimation procedures for shallow foundations on granular soil", 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus (28-30 May 2009).
5. Tezcan, S.S., Ozdemir, Z. and Keceli, A.D. "Seismic technique to determine the allowable bearing pressure for shallow foundations in soils and rocks", *Journal of acta geophysica*, **57**(2), ISBN 1895-6572, pp.400-412 (2009).
6. Elhakim, A. "Evaluation of shallow foundation displacements using soil small-strain stiffness", PH.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology (2005).
7. Amini Ahidashti, R. "Settlement evaluation of the shallow foundations by using continuous surface wave tests", MSc. Dissertation, Department of civil Engineering, 143 pages, Semnan university, I.R.Iran (2011) (In Persian).
8. Amini Ahidashti, R. and Hadad, A. "The prediction of shallow foundations settlement on cohesionless soils by using shear wave velocity", 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (2012) (In Persian).
9. Hadad, A. and Amini Ahidashti, R. "A new technique to predict the allowable bearing capacity for shallow foundations based on small-strain stiffness", 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechan-

- ics and Geotechnical Engineering, Near East University, Nicosia, North Cyprus (2012).
10. Clayton, C.R.I. "Stiffness at small strain: Research and practice", *Geotechnique*, **61**(1), pp. 5-37 (2011).
  11. Matthews, M.C., Hope, V.S. and Clayton, C.R.I. "The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles", *Proc. Instn. Civ. Engrs, Geotech Engng.*, **119**(2), pp. 84-95 (1996).
  12. Menzies, B. and Matthews, M.C. "The continuous surface wave system: A modern technique for site investigation", Special Lecture: Indian Geot. Conf. Madras (1996).
  13. Simons, N., Menzies, B. and Matthews, M., *A Short Course in Geotechnical Site Investigation*, third Edition, Thomas Telford, ISBN: 07277 2948 9 (2001).
  14. Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B. and Daily III, W.D. "Shear modulus and damping relationships for gravels", *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(5), pp. 396-405 (1998).
  15. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K. "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", Rep. No. EERC, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Calif, pp. 84-14 (1984).
  16. Mayne, P.W. and Schneider, J.A. "Evaluating axial drilled shaft response by seismic cone Foundations & Ground Improvement", *GSP 113, ASCE, Reston/VA*, pp. 655-669 (2001).
  17. Hadad, A. and Amini Ahidashti, R. "Evaluation of the bearing capacity for shallow foundations using continuous surface wave tests", 6th National Conference on Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (2011) (In Persian).
  18. Park, K., Stokoe, K.H. and Olson, R.E. "Settlement of footings in sand using dynamic soil properties", *Soil-Foundation-Structure Interaction - Orense, Chow & Pender (eds) © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60040-8* (2010).
  19. Gavin, K., Adekunle, A. and O'Kelly, B.C. "A field investigation of vertical footing response on sand", *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, **162**(5), pp. 257-267 (2010).
  20. Larsson, R., *Investigations and Load Tests in Silty Soils*, Report 54, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, 257 pages (1997).
  21. Stokoe, K.H., Joh, S.H. and Woods, R.D. "Some contributions of In situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems", International Conference on Site Characterization (ISC-2), Porto, Portugal (19-22 September 2004).
  22. American Society for Testing and Materials; Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footing, ASTM. NO. D 1194 (1994).
  23. Briaud, J.L. and Gibbens, R.M. "Predicted and measured behavior of five spread", *ASCE, Geotechnical Special Publication*, **41**, p.255 (1994).
  24. Schmertmann, J.H. "Static cone to compute static settlement over sand", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **96**(3), pp. 1011-1043 (1970).
  25. Mayne, P.W. and Poulos, H.G. "Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations", *J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, **125**(6), pp. 453-460 (1999).
  26. Coduto, D.P., *Foundation Design, Principles and Practices*, New Jersey, Prentice-Hall (2001).