



هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران
دانشگاه صنعتی شاهرود، شهریور ۱۳۹۰



ارزیابی پتانسیل روانگرایی با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ سنج دینامیکی

مرتضی هاشمی

دانشجو دکتری زمین شناسی مهندسیف دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، تهران

محمد رضا نیکودل

استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، تهران

ناصر حافظی مقدس

دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

ماشالله خامه‌چیان

دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، تهران

چکیده

بمنظور بررسی قابلیت آزمایش نفوذ سنج دینامیکی (DCP) در ارزیابی پتانسیل روانگرایی، شش آزمایش نفوذسنجی دینامیکی تا عمق ۱۰ متر در بخش‌های مختلف سواحل استان گیلان انجام پذیرفت. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های DCP، شاخص LPI برای هر یک از گمانه‌های آزمایش محاسبه گردید و پتانسیل روانگرایی هر گمانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، نتایج حاصل از آزمایش‌های DCP با نتایج حاصل از آزمایش‌های SPT مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت مزایا و معایب آزمایش DCP در ارزیابی و تعیین پتانسیل روانگرایی ارائه گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که آزمایش DCP توانایی بسیار خوبی در تعیین و ارزیابی پتانسیل روانگرایی دارد.

کلمات کلیدی: آزمایش نفوذ سنج دینامیکی (DCP)، پتانسیل روانگرایی

Liquefaction potential assessment using dynamic cone penetrometer test results

Morteza Hashemi

Tarbiatmodares University, basic science faculty, Tehran

Mohammadreza Nikoudel

Tarbiatmodares University, basic science faculty, Tehran

Naser Hafezi Moghaddas

Industrial University of Shahroud, earth science faculty, Shahroud

Mashaallah Khamehchian

Tarbiatmodares University, basic science faculty, Tehran

Abstract:

In this research for assessment the capability of Dynamic Cone Penetrometer test to evaluate liquefaction potential, six dynamic penetration tests with 10 meter in depth were done in various

locations of coastal area of Guilan Province. Based on tests results, the Liquefaction Potential Index (LPI) were calculated and the liquefaction potential were evaluated for each location. Then the results of DCP tests were compared with results of SPT tests. Finally the advantages and disadvantages of DCP test for evaluation of liquefaction potential were given. The results of this research show that the DCP test is capable for assessment of liquefaction potential.

Keywords: Dynamic Cone Penetrometer test, Liquefaction potential.

۱ مقدمه

روانگرایی پدیده‌ای است که در خاک‌های دانه‌ای و منفصل ماسه‌ای تا سیلتی در شرایط اشباع ایجاد می‌گردد. با اعمال بارهای دینامیکی بر توده‌های اشباع مستعد روانگرایی، فشار آب منفذی بالا رفته و موجب کاهش مقاومت برشی خاک می‌گردد، تا آنجا که خاک رفتار سیال پیدا کرده و روانگونه می‌شود. این پدیده در نهایت تولید نشست کرده و می‌تواند به گسیختگی توده خاک منجر گردد (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله، ۱۳۷۸).

روش‌های متعددی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی توسعه یافته‌اند که اغلب آن‌ها از روش ساده سید و ادريس (Seed and Idriss) توسعه یافته‌اند. در روش سید و ادريس که در سال ۱۹۷۱ ارائه شد، از مقادیر N آزمایش نفوذ استاندارد برای تعیین دانسیته خاک استفاده می‌شود (Lenz and Baise, 2007). روش‌های ساده شده، پتانسیل روانگرایی را در مکان و عمق مشخصی از خاک تخمین می‌زند، بنابراین روش‌ها به گونه‌ای توسعه یافتند که پتانسیل روانگرایی را در تمام طول گمانه مورد ارزیابی قرار می‌دادند. برای این منظور، پتانسیل روانگرایی (LPI)^۱ برای فراهم ساختن و تلفیق پتانسیل روانگرایی در تمام طول گمانه، توسط ایویساکي و همکاران توسعه یافت (Iwasaki et al., 1982, Cited by Lenz and Baise, 2007). LPI، پارامترهای عمق، ضخامت و ضریب اطمینان خاک مستعد روانگرایی را در یک پارامتر ترکیب می‌کند (Toprak and Holzer, 2003).

از سال ۱۹۷۱ تا کنون ویرایش‌های متعددی از روش ساده سید و ادريس ارائه گردیده و این روش برای استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، آزمایش نفوذ بکر (Becker Penetration Test, BPT) و آزمایش سرعت موج برشی نیز سازگار شده است (Youd and Idriss, 2001; Andrus et al., 2004; Lenz and Baise, 2007). مزایا و معایب استفاده از هر یک از این روش‌ها در تعیین پتانسیل روانگرایی، در جدول ۱ ارائه شده است.

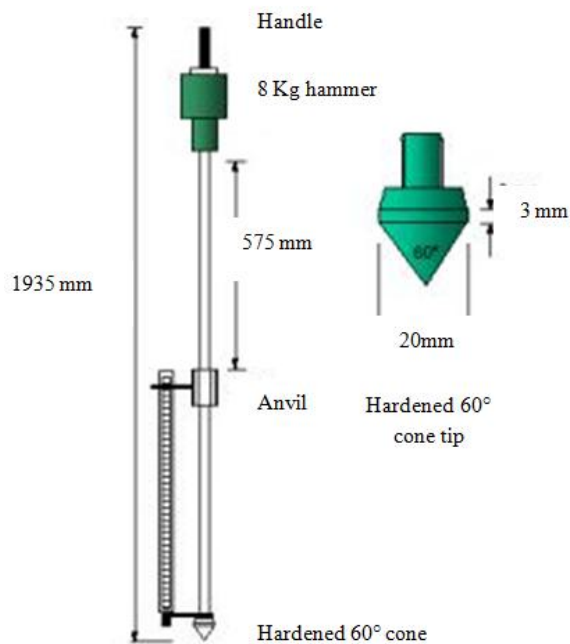
کاشگر دینامیکی DCP یکی از انواع نفوذسنج‌ها برای انجام آزمایش نفوذسنجی است که کارایی بسیار خوب این نفوذسنج در تعیین پارامترهای مهندسی خاک‌های ماسه‌ای تا اعماق ۱۰ متر به اثبات رسیده است (محمدی، ۱۳۸۷). در این تحقیق قابلیت و کارایی این ابزار برای تعیین پتانسیل روانگرایی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در این تحقیق، شش آزمایش نفوذسنجی تا عمق ۱۰ متر در بخش‌های مختلف سواحل استان گیلان انجام پذیرفته و پتانسیل روانگرایی و شاخص LPI برای هر یک از گمانه‌های آزمایش DCP محاسبه گردیده است. در نهایت برای ارزیابی قابل اعتماد بودن نتایج حاصل، این نتایج با نتایج حاصل از آزمایش‌های متناظر SPT در هر محل، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

¹ Liquefaction Potential Index

در آزمایش نفوذسنجی با استفاده از کاوشگر دینامیکی DCP، جسمی شبیه مخروط یا شکلی دیگر در اثر فشار یا ضربه، در داخل خاک نفوذ می‌کند و مقاومت آن در مقابل نفوذ به مشخصات خاک ارتباط داده می‌شود. به طور کلی خانواده نفوذسنج‌ها یا کاوشگرهای دینامیکی از سه قسمت اصلی شامل چکش، مخروط نفوذ و میله‌های رابط تشکیل شده‌اند (شکل ۱) و بر خلاف آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، معمولاً نیاز به حفر گمانه نمی‌باشد. نتیجه هر آزمایش به صورت عددی بدون بعد ارائه می‌شود که عبارت از تعداد ضربه لازم برای مقدار نفوذ مشخصی می‌باشد. نتایج حاصل از انجام آزمایش با در نظر گرفتن تاثیر نیروی اصطکاک بین میله‌های رابط و خاک و همچنین تاثیر تنش موثر سربار، اصلاح می‌شوند. در کاوشگر دینامیکی DCP، از شاخص نفوذ (Dynamic Penetration Index) با واحد میلی‌متر بر ضربه (mm/blow) استفاده می‌شود و تغییرات این شاخص (DPI) در مقابل عمق رسم می‌شود (محمدی ۱۳۸۷ و Mohammadi et al., 2008).

جدول ۱- مزایا و معایب انواع آزمایش‌های صحرایی برای تعیین پتانسیل روانگرایی (Youd and Idriss, 2001)

نوع آزمایش				ویژگی‌ها
BPT	Vs	CPT	SPT	
به طور پراکنده	محدود	فراوان	فراوان	سابقه استفاده از این ابزار در سایت‌های روانگرا شده
تا حدی زهکشی شده، کرنش زیاد	کرنش کم	زهکشی شده، کرنش کم	تا حدی زهکشی شده، کرنش زیاد	نوع رفتار تنش-کرنش موثر بر آزمایش
ضعیف	خوب	بسیار خوب	ضعیف تا خوب	کنترل کیفیت و تکرار پذیری
متوسط	متوسط	بسیار خوب	خوب در آزمایش‌های با فاصله کم	ردیابی تغییرپذیری نهشته‌های خاک
اصولاً برای خاک‌های شنی	تمامی خاک‌ها	خاک‌های فاقد شن	خاک‌های فاقد شن	انواع خاکی که آزمایش در آن قابل استفاده است
خیر	خیر	خیر	بلی	قابلیت نمونه‌گیری
شاخص	خصوصیت مهندسی	شاخص	شاخص	آزمایش شاخص را تعیین می‌کند یا خصوصیت مهندسی؟



شکل ۱- قسمت‌های مختلف یک نفوذ سنج دینامیکی (DCP)

۳ روش کار

ارزیابی پتانسیل روانگرایی نیازمند تخمین و محاسبه دو متغیر به شرح زیر است (Youd and Idriss, 2001):

- ۱) پارامتر CSR (Cyclic Stress Ratio) که مربوط به تنش‌های وارد به خاک که از زلزله ناشی می‌شوند.
- ۲) پارامتر CRR (Cyclic Resistance Ratio) که مربوط به مقاومت خاک در برابر روانگرایی. این پارامتر با لفظ بیان می‌شود.

۱-۳ محاسبه CSR

در این تحقیق برای محاسبه CSR از رابطه (۱) استفاده شده است (Youd and Idriss 2001):

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{vo}) = 0.65 (a_{max}/g) (\sigma_{vo}/\sigma'_{vo}) r_d \quad (1)$$

در رابطه (۱) a_{max} معادل حداکثر شتاب افقی در سطح زمین که به وسیله زلزله ایجاد می‌شود، g معادل شتاب ثقل زمین، σ_{vo} و σ'_{vo} به ترتیب معادل تنش سربار عمودی کل و موثر و نهایتاً r_d معادل ضریب کاهش تنش است. r_d در این تحقیق با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است (Youd and Idriss 2001):

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad (2)$$

در رابطه (۲) z معادل عمق با واحد متر است.

در این تحقیق برای تعیین حداکثر شتاب افقی زمین (a_{max}) از مطالعات پهنه‌بندی شتاب زلزله در استان گیلان (نوگل سادات، ۱۳۷۱) استفاده گردیده که در آن زلزله‌هایی با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد لحاظ شده است.

۲-۳ محاسبه CRR

تعیین CRR (مقاومت خاک در مقابل تنش‌های تناوبی) مهمترین بخش از فعالیت‌ها در ارزیابی پتانسیل روانگرایی است. مناسبترین روش برای تعیین CRR، اخذ نمونه دست نخورده از خاک و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی آن است. اما متأسفانه به دلیل اینکه امکان برقراری وضعیت تنش‌های برجا در آزمایشگاه به سادگی امکان‌پذیر نیست و نیز نمونه‌های اخذ شده با دستخوردگی زیادی همراهند، بنابراین انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی برای تعیین CRR مشکلات و هزینه‌های فراوانی را به دنبال دارد. از اینرو برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از آزمایش‌های صحرایی نظیر آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، آزمایش نفوذ بکر (BPT) و آزمایش سرعت موج برشی مرسوم و متداول شده است (Youd and Idriss, 2001).

در این تحقیق مقادیر CRR یک بار بر اساس نتایج آزمایش DCP و یک بار بر اساس نتایج آزمایش SPT تعیین شده است. در تمامی موارد بزرگترین زلزله محتمل با بزرگای ۷/۵ در نظر گرفته شده است. برای تعیین مقادیر CRR بر اساس نتایج آزمایش SPT از نمودار شکل ۲ استفاده شده است. در این نمودار مقادیر مختلف CRR در مقابل اعداد نفوذ استاندارد (N_{60}) پلات شده‌اند (Youd and Idriss, 2001). مقادیر CRR برای خاک‌های که حاوی مقادیر ۵، ۱۵ و ۳۵ درصد ریزدانه‌اند با استفاده از نمودار شکل ۲ قابل تعیین است. در این تحقیق برای لحاظ کردن تاثیر بخش ریزدانه خاک در خاک‌های حاوی مقادیر ریزدانه بین ۳۵ تا ۵۰ درصد، در ابتدا مقادیر N اصلاح شده با استفاده از رابطه (۳) (Youd and Idriss, 2001) محاسبه شده‌اند (مقادیر معادل N برای خاک حاوی ۵ درصد ریزدانه به دست می‌آید) و سپس با استفاده از نمودار شکل ۲، مقادیر CRR تعیین شده است. علیرغم امکان بررسی پتانسیل روانگرایی در خاک‌های حاوی بیش از ۵۰ درصد ریزدانه (Boulanger and Idriss, 2006; Prakash and Puri, 2010) به دلیل در اختیار نبودن داده‌های مورد نیاز، این خاک‌ها غیر روانگرا در نظر گرفته شده‌اند.

$$N_{60cs} = \alpha + \beta N_{60} \quad (۳)$$

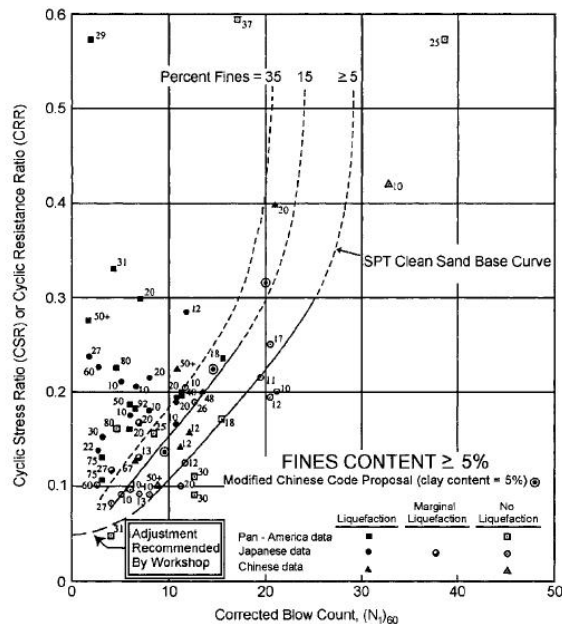
در رابطه (۳) برای خاک‌های حاوی مقادیر ریزدانه بیش از ۳۵ درصد $\alpha=5$ و $\beta=1.2$ در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین مقادیر CRR بر اساس نتایج آزمایش DCP، در ابتدا مقادیر DCP به مقادیر SPT معادل تبدیل شده و ادامه کار مشابه با روش تعیین مقادیر CRR بر اساس نتایج آزمایش SPT و با استفاده از نمودار شکل ۲، انجام شده است.

Card et al. (1990) (نقل از محمدی ۱۳۸۷) همبستگی بین نتایج آزمایش DCP و SPT را به صورت رابطه (۴) ارائه کرده‌اند:

$$N_{30}=1.4N_{SPT} \quad (۴)$$

که N_{30} عبارت از مجموع ضربات برای نفوذ ۳۰ سانتی متر در آزمایش DCP می‌باشد. اما بررسی‌های انجام شده توسط هاشمی و همکاران (۱۳۸۹) نشان می‌دهد که اعمال ضریب 1.3 به جای ضریب 1.4 در رابطه Card et al.، نتایج بهتری را برای ماسه انزلی ارائه می‌دهد. در این تحقیق برای تبدیل مقادیر DCP به مقادیر SPT معادل از رابطه (۵) استفاده شده است.

$$N_{30} = 1.3 N_{SPT} \quad (5)$$



شکل ۲- منحنی SPT ماسه تمیز برای زلزله‌های با بزرگای ۷/۵ بر اساس داده‌های تاریخچه روانگرایی (Youd and Idriss, 2001).

۳-۳ محاسبه شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI)

در ارزیابی پتانسیل روانگرایی، ضریب اطمینان (F_L) روانگرایی مطابق با رابطه (۶) از تقسیم CRR بر CSR به دست می‌آید. اما F_L محاسبه شده، به تنهایی ابزار مناسبی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی نیست و نمی‌توان شدت روانگرایی و شدت آسیب ناشی از آن که به اینیه فنی وارد می‌شود را صرفاً بر اساس F_L تعیین نمود (Sonmez, 2003).

$$F_L = CRR/CSR \quad (6)$$

Iwasaki et al. (1982) به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی یک سایت، استفاده از شاخص پتانسیل روانگرایی (Liquefaction Potential Index) را پیشنهاد نمودند. این شاخص ترکیبی است از ضخامت لایه روانگرا، ضخامت لایه غیر روانگرا و مقدار ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی (F_L) (Toprak and Holzer, 2003; Sonmez 2003; Papathanassiou, 2008). رده‌بندی پتانسیل روانگرایی بر اساس LPI که توسط ایواساکی و همکاران ارائه شده است، در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

جدول ۲- رده بندی پتانسیل روانگرایی بر اساس LPI (Iwasaki et al., 1982)

پتانسیل روانگرایی	شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI)
بسیار کم	LPI=0
کم	$0 < LPI \leq 5$
زیاد	$5 < LPI \leq 15$
بسیار زیاد	$15 < LPI$

Sonmez (2003) معتقد است که در رده بندی ارائه شده توسط ایواساکی و همکاران، مناطق غیر روانگرا و مناطق دارای پتانسیل متوسط روانگرایی لحاظ نشده اند. همچنین او معتقد است به دلیل وجود عدم قطعیت ها در شرایط زمین شناسی و داده های مورد استفاده، باید از ضریب اطمینان (F_L) $1/2$ به جای ضریب اطمینان ۱ برای شرایط حدی وقوع روانگرایی در محاسبات استفاده کرد. از اینرو Sonmez (2003) با در نظر گرفتن ضریب اطمینان (F_L) $1/2$ برای شرایط حدی وقوع روانگرایی در محاسبات، رده بندی ایواساکی و همکاران را اصلاح نمود (جدول ۳).

در این تحقیق برای محاسبه LPI بر اساس نتایج SPT، از روش اصلاح شده توسط Sonmez (2003) استفاده شده است. در این روش LPI بر اساس رابطه (۷) محاسبه می شود:

$$\int_0^{20} F(z) W(z) dz \quad (۷)$$

در رابطه (۷) :

$$\begin{aligned} F(z) &= 0 && \text{for } F_L \geq 1.2 \\ F(z) &= 2 \times 10^6 e^{-18.427 F_L} && \text{for } 1.2 > F_L > 0.95 \\ F(z) &= 1 - F_L && \text{for } F_L \leq 0.95 \\ W(z) &= 10 - 0.5z && z = \text{عمق به متر} \end{aligned}$$

همچنین برای محاسبه LPI بر اساس نتایج DCP، به دلیل پیوسته بودن این آزمایش از رابطه (۸) استفاده شده است (Luna and Frost, 1998. Cited by Lenz and Baise, 2007):

$$\square F(z) W(z) H_z \quad (۸)$$

در رابطه (۸) مقادیر $F(z)$ و $W(z)$ مشابه رابطه (۷) و بر اساس روش Sonmez (2003) محاسبه می شوند. همچنین H_z معادل ضخامت به متر که به ازاء آن اعداد N محاسبه می شوند. در آزمایش DCP، این مقدار معادل $0/3$ یا همان ۳۰ سانتی متر نفوذ مخروط آزمایش است.

در این تحقیق برای رده‌بندی پتانسیل روانگرایی، از رده‌بندی ارائه شده توسط Sonmez (2003) استفاده شده است (جدول ۳).

جدول ۳- رده بندی اصلاح شده پتانسیل روانگرایی بر اساس LPI (Sonmez, 2003)

پتانسیل روانگرایی	شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI)
غیر روانگرا (بر اساس ضریب اطمینان معادل ۱/۲)	LPI=0
کم	$0 < LPI \leq 2$
متوسط	$2 < LPI \leq 5$
زیاد	$5 < LPI \leq 15$
بسیار زیاد	$15 < LPI$

۳-۴ شرح و بحث

در تحقیق حاضر، شش آزمایش نفوذسنجی تا عمق ۱۰ متر در بخش‌های مختلف سواحل استان گیلان شامل یک گمانه در مجاورت رودخانه سیبلی (آستارا)، دو گمانه در شهر انزلی (انزلی ۱ و ۲)، یک گمانه در روستای پهمدان، یک گمانه در روستای ناصرکیاده و یک گمانه در روستای پائین‌رودپشت انجام شده است. سه گمانه آخر در دلتای سفیدرود و در مجاورت رودخانه سفیدرود کهنه واقع شده‌اند و هر سه محل در هنگام زلزله ۱۳۶۹ منجیل دچار روانگرایی شده‌اند. در محل انجام آزمایش‌ها اطلاعات ژئوتکنیک مانند لاگ گمانه و نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) از قبل موجود بوده است (وزارت راه و ترابری ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸؛ Yegian et al., 1990 a and b). در ادامه آزمایش‌های انجام شده و نتایج آن به تفکیک محل آزمایش تشریح می‌شوند.

۳-۴-۱ رودخانه سیبلی

رودخانه سیبلی در ۱۰ کیلومتری جنوب آستارا واقع شده است. در این محل، آزمایش در مجاورت رودخانه و بر روی آبرفت‌های رودخانه‌ای که عموماً شامل خاک‌های ماسه‌ای می‌شوند، انجام شده است. بر اساس مطالعات نوگل سادات (۱۳۷۱) حداکثر شتاب افقی زمین در این محل برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد، معادل 0.42g است. شکل ۲، لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های DCP و SPT در این محل را نشان می‌دهد.

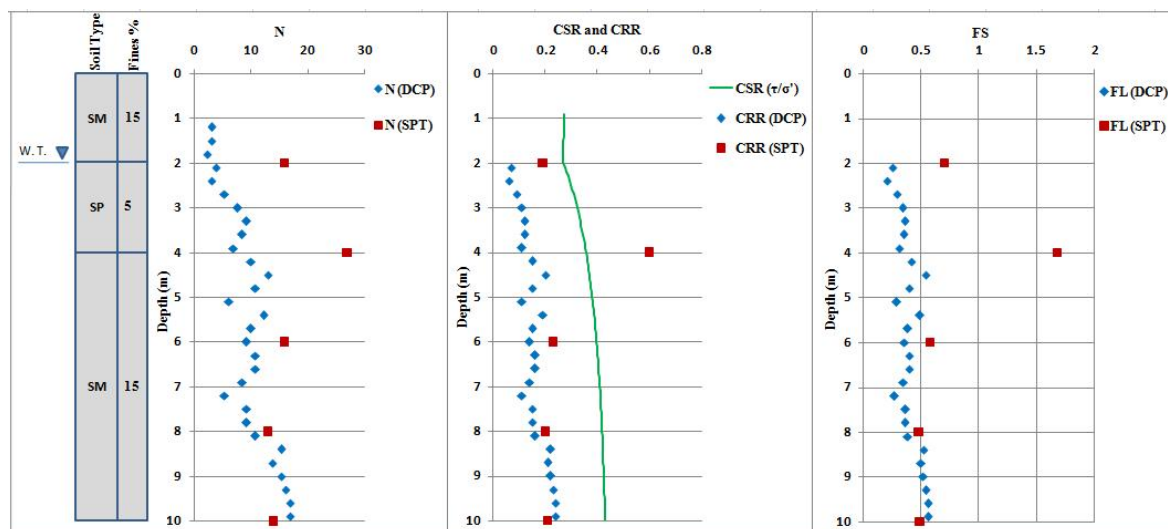
در بخش اول شکل ۲، اعداد نفوذ استاندارد (N) برای آزمایش‌های DCP و SPT نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، اعداد N آزمایش DCP بین ۳ تا ۱۷ در تغییر است در صورتیکه اعداد N آزمایش SPT بین ۱۰ تا ۲۷ در تغییر است. ۳ مورد از ۵ مورد اعداد N آزمایش SPT همخوانی خوبی با نتایج حاصل از آزمایش DCP دارند. در بخش میانی شکل ۲، تغییرات CSR و تغییرات CRR نشان داده شده است. همانگونه که

در این بخش مشاهده می‌شود، به استثنای (SPT) CRR در عمق ۴ متر، تمامی مقادیر CRR از مقادیر CSR متناظر کمتر است، بنابراین مقادیر ضریب اطمینان (F_L) در هر دو مورد آزمایش DCP و SPT (به استثنای عمق ۴ متر) کمتر از ۱ است. شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI) بر اساس نتایج آزمایش DCP معادل ۳۵ و بر اساس نتایج آزمایش SPT معادل ۲۴ است. بر اساس نتایج هر دو آزمایش و مطابق با جدول ۳، پتانسیل روانگرایی در این نقطه بسیار زیاد است.

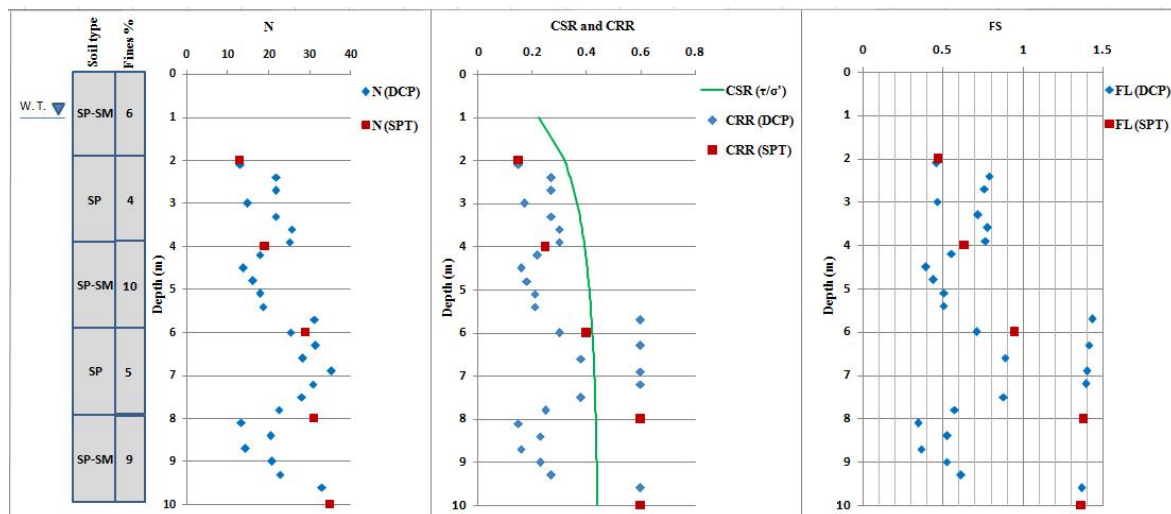
۳-۴-۲ شهر انزلی ۱

گمانه دوم در شهر انزلی و در نزدیکی تالاب انزلی واقع شده است. بر اساس مطالعات نوگل سادات (۱۳۷۱) حداکثر شتاب افقی زمین در این محل برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد، معادل 0.35g است. شکل ۳، لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های DCP و SPT در این محل را نشان می‌دهد.

در بخش اول شکل ۳، اعداد نفوذ استاندارد (N) برای آزمایش‌های DCP و SPT نشان داده شده است. اعداد N آزمایش DCP بین ۱۰ تا ۳۳ و اعداد N آزمایش SPT بین ۱۰ تا ۳۵ در تغییر است. در این گمانه، اعداد نفوذ استاندارد (N) هر دو آزمایش همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. نکته قابل توجه، تغییرات اعداد نفوذ استاندارد (N) در فواصل بین آزمایش‌های SPT است که آزمایش DCP به خوبی آنرا پوشش می‌دهد. در بخش میانی شکل ۳، در عمق کمتر از ۶ متر، مقادیر CRR هر دو آزمایش از مقادیر CSR متناظر کمترند و در عمق بیش از ۶ متر، مقادیر (SPT) CRR بیش از مقادیر CSR متناظر و مقادیر (DCP) CRR بیشتر و یا کمتر از مقادیر CSR متناظر هستند. همانگونه که انتظار می‌رود، تا عمق ۶ متر F_L هر دو آزمایش کمتر از ۱ و در عمق بیش از ۶ متر، F_L (SPT) بیشتر از ۱ و F_L (DCP) در بخش‌هایی بیشتر از ۱ و در بخش‌هایی کمتر از ۱ است. شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI) بر اساس نتایج آزمایش DCP معادل ۲۱ و بر اساس نتایج آزمایش SPT معادل ۱۷ است. بر اساس نتایج هر دو آزمایش و مطابق با جدول ۳، پتانسیل روانگرایی در این نقطه بسیار زیاد است.



شکل ۲- لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های SPT و CPT در مجاورت رودخانه سیبلی (آستارا)



شکل ۳- لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های SPT و CPT در شهر انزلی ۱

۳-۴-۳ شهر انزلی ۲

همانند گمانه اول، گمانه دوم در شهر انزلی نیز در نزدیکی تالاب انزلی واقع شده است. بر اساس مطالعات نوگل سادات (۱۳۷۱) حداکثر شتاب افقی زمین در این محل برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد، معادل 0.35g است. شکل ۴، لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های DCP و SPT در این محل را نشان می‌دهد.

در بخش اول شکل ۴، اعداد نفوذ استاندارد (N) برای آزمایش‌های DCP و SPT نشان داده شده است. اعداد N آزمایش DCP بین ۸ تا ۳۰ و اعداد N آزمایش SPT بین ۱۶ تا ۳۲ در تغییر است. در این گمانه، اعداد نفوذ استاندارد (N) دو آزمایش تا عمق ۵ متر، همخوانی خوبی با یکدیگر دارند اما در عمق بیش از ۵ متر اختلاف آن‌ها افزایش می‌یابد. تا عمق ۴ متر، مقادیر CRR (SPT) کمتر از مقادیر CSR متناظر و در عمق بیش از ۴ متر بیشتر از آن است. مقادیر CRR (DCP) تا عمق ۴ متر کمتر از مقادیر CSR متناظر، در عمق ۴ تا ۵ متر بیشتر و در عمق بیشتر از ۵ متر، کمتر از مقادیر CSR متناظر هستند. بر اساس مقادیر CSR و CRR و همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، F_L (SPT) تا عمق ۴ متر کمتر از ۱ و در عمق بیش از ۴ متر، بیشتر از ۱ است. F_L (DCP) تا عمق ۴ متر کمتر از ۱، بین ۴ تا ۵ متر بیشتر از ۱ و در عمق بیش از ۵ متر کمتر از ۱ است. شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI) بر اساس نتایج آزمایش DCP معادل ۲۳ و بر اساس نتایج آزمایش SPT معادل ۱۰ است. مطابق با جدول ۳، پتانسیل روانگرایی در این نقطه بر اساس نتایج آزمایش DCP بسیار زیاد و بر اساس نتایج آزمایش SPT زیاد است.

۳-۴-۴ روستای پهمدان

روستای پهمدان در ۱۰ کیلومتری شرق شهر آستانه‌اشرفیه و در مجاورت رودخانه سفیدرود کهنه واقع شده است. این روستا که بر روی نهشته‌های خاکریزهای طبیعی (Natural levee deposits) سفیدرود کهنه قرار

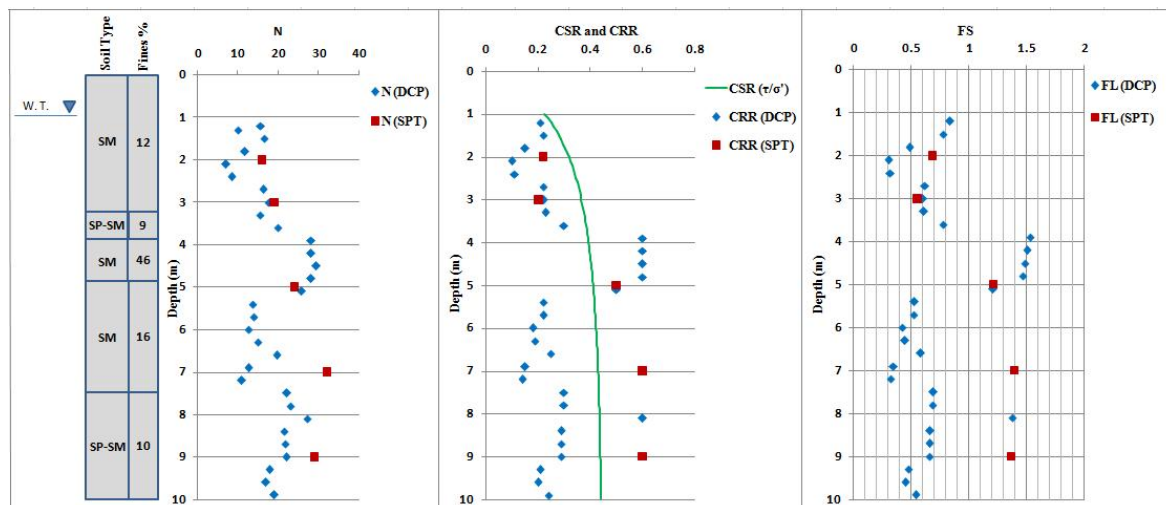
گرفته است، در اثر پدیده روانگرایی ناشی از زلزله ۱۳۶۹ منجیل دچار خسارت شد (Yegian et al., 1990 a and b; Ishihara et al., 1992). بر اساس مطالعات نوگل سادات (۱۳۷۱) حداکثر شتاب افقی زمین در این محل برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد، معادل 0.4g است. شکل ۵، لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های DCP و SPT در این محل را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، اعداد نفوذ استاندارد (N) برای آزمایش‌های DCP و SPT در این گمانه همخوانی خوبی با یکدیگر دارند. اعداد N آزمایش DCP بین ۳ تا ۱۵ و اعداد N آزمایش SPT بین ۴ تا ۱۷ در تغییر است. در مجموع، مقادیر کم N نشان دهنده مقاومت کم خاک در این محل است. در تمام طول گمانه مقادیر CRR هر دو آزمایش از مقادیر CSR متناظر بسیار کمترند، بنابراین ضریب اطمینان (F_L) در تمام طول گمانه برای هر دو آزمایش مقداری کم و کمتر از ۰/۵ است. شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI) بر اساس نتایج آزمایش DCP معادل ۴۵ و بر اساس نتایج آزمایش SPT معادل ۴۴ است. بر اساس نتایج هر دو آزمایش و مطابق با جدول ۳، پتانسیل روانگرایی در این نقطه بسیار زیاد است. روانگرایی ناشی از زلزله ۱۳۶۹ منجیل که در محل این گمانه رخ داده است، نتایج فوق را تایید می‌نماید.

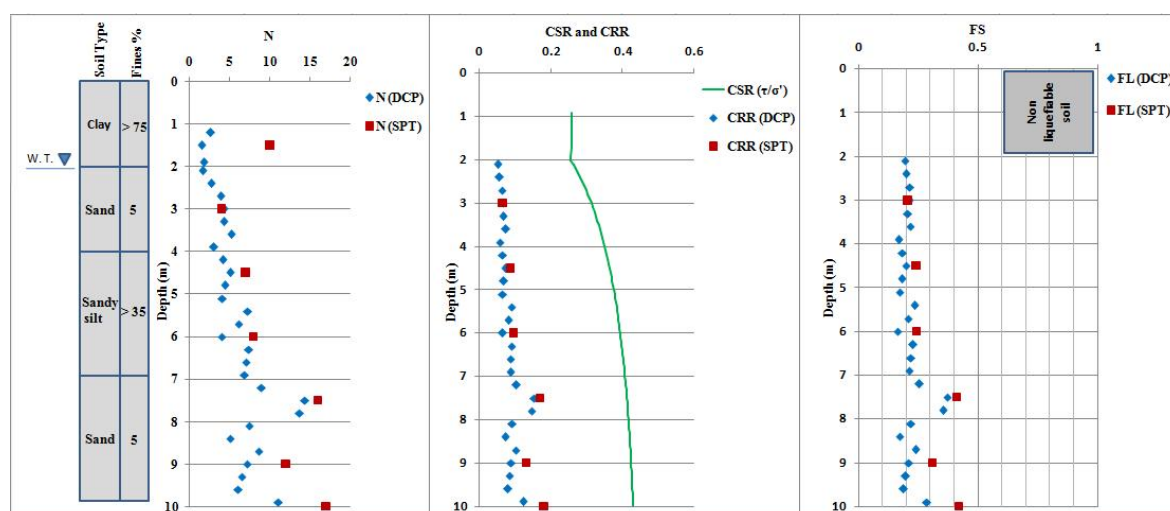
۳-۴-۵ روستای ناصرکیاده

روستای ناصرکیاده در ۱۷ کیلومتری شمال شرق شهر آستانه اشرفیه و در مجاورت رودخانه سفیدرود کهنه واقع شده است. این روستا نیز که بر روی نهشته‌های خاکریزهای طبیعی (Natural levee deposits) سفیدرود کهنه قرار گرفته است، در اثر پدیده روانگرایی ناشی از زلزله ۱۳۶۹ منجیل دچار خسارت شد (Yegian et al., 1990 a and b; Ishihara et al., 1992). بر اساس مطالعات نوگل سادات (۱۳۷۱) حداکثر شتاب افقی زمین در این محل برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد، معادل 0.4g است. شکل ۶، لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های DCP و SPT در این محل را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، اعداد نفوذ استاندارد (N) برای آزمایش‌های DCP و SPT در این گمانه همخوانی خوبی با یکدیگر دارند (به استثنای عمق ۱۰ متر). اعداد N آزمایش DCP بین ۲ تا ۱۶ و اعداد N آزمایش SPT بین ۴ تا ۱۰ در تغییر است. نکته قابل توجه، تغییرات اعداد نفوذ استاندارد (N) در فواصل بین آزمایش‌های SPT است که آزمایش DCP به خوبی آنرا پوشش می‌دهد. این گمانه تا عمق ۶ متر متشکل از سیلت است که در این تحقیق غیرروانگرا در نظر گرفته شده است. در عمق بیش از ۶ متر، مقادیر CRR هر دو آزمایش از مقادیر CSR متناظر بسیار کمترند، بنابراین ضریب اطمینان (F_L) در این عمق برای هر دو آزمایش مقداری کم و کمتر از ۰/۷ است. شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI) بر اساس نتایج آزمایش DCP معادل ۱۳ و بر اساس نتایج آزمایش SPT معادل ۱۶ است. مطابق با جدول ۳، پتانسیل روانگرایی در این نقطه بر اساس نتایج آزمایش DCP زیاد و بر اساس نتایج آزمایش SPT بسیار زیاد است.



شکل ۴- لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های CPT و SPT در شهر انزلی ۲



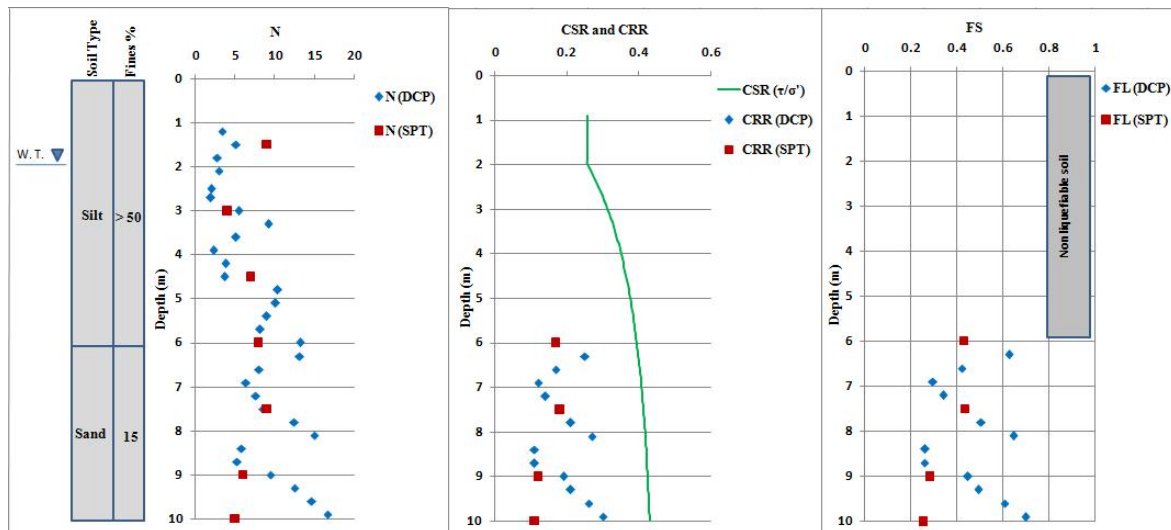
شکل ۵- لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های CPT و SPT در روستای بهمدان

۳-۴-۶ روستای پائین‌رودپشت

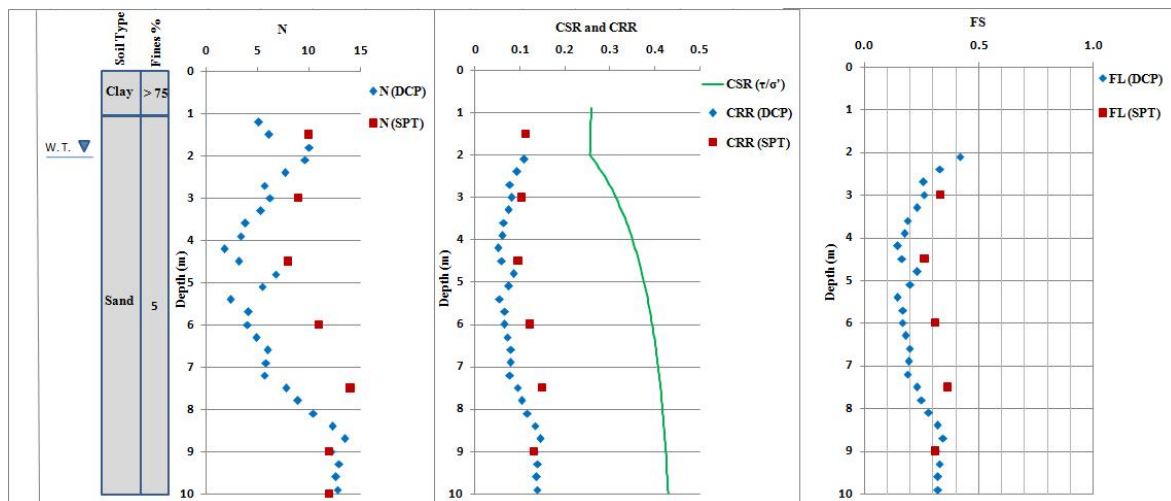
روستای پائین‌رودپشت در ۲۰ کیلومتری شمال شرق شهر آستانه‌اشرفیه و در مجاورت رودخانه سفیدرود کهنه واقع شده است. این روستا نیز که بر روی نهشته‌های خاکریزهای طبیعی (Natural levee deposits) سفیدرود کهنه قرار گرفته است، در اثر پدیده روانگرایی ناشی از زلزله ۱۳۶۹ منجیل دچار خسارت شد (Yegian et al., 1990 a and b; Ishihara et al., 1992). بر اساس مطالعات نوگل سادات (۱۳۷۱) حداکثر شتاب افقی زمین در این محل برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله و احتمال وقوع ۱۰ درصد، معادل $0.4g$ است. شکل ۷، لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های DCP و SPT در این محل را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، اعداد نفوذ استاندارد (N) برای آزمایش‌های DCP و SPT در این گمانه تا حدود زیادی با یکدیگر همخوانی دارند. اعداد N آزمایش DCP بین ۳ تا ۱۴ و اعداد N آزمایش SPT بین

۸ تا ۱۴ در تغییر است. در تمام طول گمانه مقادیر CRR هر دو آزمایش از مقادیر CSR متناظر بسیار کمترند، بنابراین ضریب اطمینان (F_L) در تمام طول گمانه برای هر دو آزمایش مقداری کم و کمتر از ۰/۴ است. شاخص پتانسیل روانگرایی (LPI) بر اساس نتایج آزمایش DCP معادل ۴۳ و بر اساس نتایج آزمایش SPT معادل ۳۸



شکل ۶- لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های SPT و CPT در روستای ناصرکیاده



شکل ۷- لاگ گمانه و نتایج آزمایش‌های SPT و CPT در روستای پائین رودپشت

است. بر اساس نتایج هر دو آزمایش و مطابق با جدول ۳، پتانسیل روانگرایی در این نقطه بسیار زیاد است. روانگرایی ناشی از زلزله ۱۳۶۹ منجیل که در محل این گمانه رخ داده است، نتایج فوق را تایید می‌نماید. بر اساس مطالعات (Yegian et al. 1990 a and b)، روستای پائین‌رودپشت دورترین محل از کانون زلزله ۱۳۶۹ منجیل با فاصله ۸۵ کیلومتر است که دچار روانگرایی شده است. مقدار ۱۰۰ سانتی‌متر نشست ناشی از این روانگرایی در

محل انجام آزمایش به ثبت رسیده است. در جدول ۴ مزایا و معایب استفاده از DCP جهت ارزیابی روانگرایی ارائه شده است.

جدول ۴- مزایا و معایب آزمایش DCP برای تعیین پتانسیل روانگرایی

ویژگی‌ها	آزمایش DCP
سابقه استفاده از این ابزار در سایت‌های روانگرا شده	تا کنون مورد استفاده قرار نگرفته است
نوع رفتار تنش- کرنش موثر بر آزمایش	تا حدی زهکشی شده، کرنش زیاد
کنترل کیفیت و تکرار پذیری	خوب تا بسیار خوب
ردیابی تغییرپذیری نهشته‌های خاک	بسیار خوب
انواع خاکی که آزمایش در آن قابل استفاده است	خاک‌های ماسه‌ای
قابلیت نمونه‌گیری	ندارد
آزمایش شاخص را تعیین می‌کند یا خصوصیت مهندسی؟	شاخص

۴ نتیجه گیری

در تحقیق حاضر برای بررسی قابلیت آزمایش نفوذ سنج دینامیکی (DCP) در ارزیابی پتانسیل روانگرایی، پتانسیل روانگرایی شش محل بر اساس نتایج آزمایش DCP مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از آزمایش SPT مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که آزمایش نفوذ سنج دینامیکی (DCP) ابزار بسیار مناسبی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی است. مزایا و معایب آزمایش DCP در ارزیابی پتانسیل روانگرایی در جدول ۴ خلاصه شده است. اهم نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- نتایج حاصل از آزمایش DCP همخوانی خوبی با نتایج حاصل از آزمایش SPT دارد.
- آزمایش DCP در مقایسه با آزمایش SPT، در مجموع نتایج محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌نماید.
- با توجه به اینکه آزمایش DCP به صورت ممتد انجام می‌شود، تغییرات مقاومت لایه‌های خاک به خوبی ردیابی می‌شوند و لایه‌های نازکی که دارای پتانسیل روانگرایی هستند و اغلب در SPT نادیده گرفته می‌شوند، در آزمایش DCP به خوبی شناسایی می‌شوند.
- از بزرگترین ایرادات آزمایش DCP، عدم توانایی ابزار این آزمایش در نمونه‌گیری از خاک است.
- تمامی شش محلی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، دارای پتانسیل روانگرایی زیادی هستند.

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷۸)، "گزارش نهایی پهنه بندی خطرات ژئوتکنیکی استان لرستان" محمدی، سید داود (۱۳۸۷)، "توسعه کاربرد کاوشگر دینامیکی DCP جهت تعیین پارامترهای مهندسی خاک‌های ماسه‌ای"، دانشگاه تربیت مدرس، رساله دوره دکتری زمین‌شناسی مهندسی به راهنمایی دکتر محمدرضا نیکودل.

نوگل سادات م.، (۱۳۷۰)، "مطالعات جامع زمین‌شناسی گیلان"، استانداری گیلان.

وزارت راه و ترابری، شرکت مادر تخصصی ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور، (۱۳۸۳)، گزارش تحقیقات و مطالعات ژئوتکنیک پل رودخانه سیبلی در مسیر بزرگراه آستارا تالش.

وزارت راه و ترابری، شرکت مادر تخصصی ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور، (۱۳۸۸)، گزارش تحقیقات و مطالعات ژئوتکنیک پل سوسرروگاه در مسیر راه آهن رشت به آستارا.

هاشمی م.، نیکودل م.، حافظی مقدس ن.، خامه‌چیان م.، (۱۳۸۹)، "ارزیابی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ماسه انزلی با استفاده از نفوذ سنج دینامیکی"، چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران و بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین، دانشگاه ارومیه.

Andrus R. D., Piratheepan P., Ellis B. S., Zhang J., Juang H. (2004), "Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-VS relationships", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, pp. 713–721.

Boulanger R. W., Idriss I. M. (2006), "Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 132 (11), pp. 1413–1426.

Ishihara K., Haeri S. M., Moïnfar A. A., Towhata I., Tsunjino S. (1992), "Geotechnical aspects of the June 20, 1990 Manjil Earthquake in Iran", *Soil and Foundations*, 32 (3), pp. 61–78.

Iwasaki T, Tokida K, Tatsuoka F, Watanabe S, Yasuda S, Sato H (1982), "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", *Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle*, vol 3, pp 1319–1330

Lenz Jennifer A., Baise Laurie G. (2007), "Spatial variability of liquefaction potential in regional mapping using CPT and SPT data", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 , pp. 690–702.

Mohammadi S.D., Nikoudel M.R., Rahimi H., Khamehchiyan M., (2008) "Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils", *Engineering Geology*, 101, pp. 195–203.

Prakash S., Puri V. K. (2010), "Recent advances in liquefaction of fine grained soils", fifth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamic and symposium in honor of Professor I.M. Idriss, May 24-29, San Diego, California.

Papathanassiou G. (2008), "LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence", *Engineering Geology*, 96, pp. 94–104.

Sonmez H. (2003), "Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey)", *Environ Geol*, 44 (7), pp. 862–71.

Toprak S., Holzer TL. (2003), "Liquefaction potential index: field assessment", *J Geotech Geoenviron Eng.*, 129(4), pp.315–22.

- Yegian M. K., Ghahraman V. G., Nogole-Sadat M. A. A., Daraie H. (1990 a), "Liquefaction during the 1990 Manjil, Iran, Earthquake, I: Case history data", *Bulletin of the seismological society of America*, 85 (1), pp. 66–82.
- Yegian M. K., Ghahraman V. G., Nogole-Sadat M. A. A., Daraie H. (1990 b), "Liquefaction during the 1990 Manjil, Iran, Earthquake, II: Case history analysis", *Bulletin of the seismological society of America*, 85 (1), pp. 83–92.
- Youd T.L., Idriss I.M. (2001), "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshop on evaluation of Liquefaction resistance of soils", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, 127(10), pp. 817–833.