



ارزیابی کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد در مسائل استاتیکی در مهندسی ژئوتکنیک

دکتر نادر هاتف، دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه شیراز*

امین کشاورز، دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه شیراز**

پست الکترونیکی: hataf@shirazu.ac.ir

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۱۵۹۹۳، پست الکترونیکی: kshavarz@shirazu.ac.ir**

چکیده

آزمایش نفوذ استاندارد (Standard Penetration Test, SPT) بیشترین استفاده را در روشهای نفوذ دارد. این روش یک روش استاندارد در اغلب نقاط جهان برای محاسبه ظرفیت باربری پی های سطحی و عمیق است. مزیت های مهم روش SPT این است که این روش در تمام انواع خاکها و در سنگ ضعیف قابل استفاده است و نمونه هایی که تهیه می شوند برای رده بندی خاک و سنگ می توانند استفاده شوند. در مسائل غیردینامیکی، آزمایش نفوذ استاندارد امروزه اغلب برای ارزیابی نشست و ظرفیت باربری پی های سطحی، محاسبه تراکم نسبی و زاویه اصطکاک خاکهای درشت دانه، ظرفیت باربری پی های عمیق و مقاومت برشی خاکهای چسبنده به کار می رود. در این مقاله به بررسی برخی از کاربردهای عملی آزمایش نفوذ استاندارد در مسائل استاتیکی پرداخته شده است. برای خاک شیراز رابطه ای برای یافتن مقاومت برشی زهکشی نشده خاکهای چسبنده بر اساس آزمایش نفوذ استاندارد ارائه شده است.

کلید واژه ها: آزمایش نفوذ استاندارد، نشست، ظرفیت باربری، تراکم نسبی، زاویه اصطکاک، مقاومت برشی.

۱- مقدمه

آزمایش نفوذ استاندارد به کلنل Charls R. Gow برمی گردد. او در سال ۱۹۰۲، نمونه گیری به قطر ۲۵ میلیمتر ابداع کرد که توسط چکشی به وزن ۵۰ کیلوگرم در ته گمانه رانده می شد. نمونه گیر استوانه ای شکافدار که در حال حاضر برای آزمایش SPT استفاده می شود عمدتاً کار H. A. Mohr و سپس بخش Gow از شرکت شمع بتنی ریمنند و G. A. Fletcher می باشد [۱]. احتمالاً عبارت آزمایش نفوذ استاندارد برای اولین بار توسط ترزاقی در سال ۱۹۴۷ در مقاله اش که در هفتمین کنفرانس مکانیک خاک و پی در تگزاس ارائه شد، به کار رفت. استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد در طراحی پی های عمیق و سطحی به سرعت پس از انتشار اولین ویرایش

کتاب ترزاقی و پک در سال ۱۹۴۸ وسعت یافت. پس از آن به زودی این آزمایش توسط انجمن مهندسين آمريکا و USBR و ارگانهای خصوصي متعددی به عنوان يک آزمایش استاندارد پذيرفته شد.

۲- عوامل مؤثر در آزمایش SPT

عوامل متعددی روی نتایج این آزمایش موثرند از جمله: پاکيزگی غير کافی گمانه، نشستن قاشقک نمونه گيری روی مصالح دست نخورده، ناتوانی در اعمال بار هیدرواستاتيکی کافی در گمانه، وضع عامل، راندن اضافی نمونه گير، بسته شدن نمونه گير با شن، بسته شدن پوشش، شستن زياد جلوی پوشش، روش حفاری نادرست، استفاده نکردن از سقوط استاندارد چکش، سقوط نکردن وزنه بصورت آزاد، استفاده نکردن از وزنه درست، ضربه زدن وزنه به صورت مرکزی، استفاده نکردن از میله راهنما، استفاده نکردن از نوک خوب در قاشقک نمونه گيری، استفاده از میله های مته سنگینتر از استاندارد، ثبت بدون دقت تعداد ضربات و نفوذ، استفاده از سوراخهای حفاری خیلی بزرگ، نظارت غير کافی، استفاده از پمپ خیلی بلند [۱]. عدد نفوذ N بایستی بر اثر عوامل متعددی همچون فشار سربار، انرژی، چکش و ... اصلاح شود. بعضی از همبستگی های آزمایش بر اساس عدد نفوذ اصلاح شده و بعضی بر اساس عدد اصلاح نشده ارائه شده اند. بهتر است رابطه ساده زیر را برای اصلاح اثر روباره به کار رود [۲]:

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma'_0}} \quad (\sigma'_0 \text{ in tsf or kg/cm}^2) \quad C_N = \sqrt{\frac{95.8}{\sigma'_0}} \quad (\sigma'_0 \text{ in kPa}) \quad (1)$$

$$N_1 = C_N N$$

برای محاسبه ظرفیت باربری و نشست پی ها، اگر تراز آب زیرزمینی بین ته پی تا عمق B (عرض پی) زیر سطح پی باشد، ضریب تصحیح C_w برای اصلاح N بایستی به کار رود [۳].

$$C_w = \frac{1}{2} + \frac{Z}{2(D_f + B)} \quad (2)$$

در این معادله Z ارتفاع تا سطح آب، D_f عمق مدفون پی می باشند. اگر عمق آب زیرزمینی بیش از B از ته پی باشد، $C_w=1$.

۳- تراکم نسبی

بر اساس رابطه مایر هوف (۱۹۵۷) مقاومت نفوذ با مربع تراکم نسبی افزایش می یابد و مستقیماً به فشار سربار مؤثر ماسه وابسته است:

$$N = (17 + 24 \frac{\sigma'_0}{98}) D_r^2 \quad (3)$$

N عدد نفوذ، σ'_0 فشار سربار مؤثر بر حسب کیلو پاسکال و D_r تراکم نسبی است که به صورت یک نسبت بیان می شود.

در تحقیقی که توسط Cubrinovski and Ishihara (1999) روی ماسه ها و شن های ژاپن انجام شد، مشخص شد که رابطه مایر هوف نتایج قابل قبولی برای ماسه های تمیز با $0.35 - 0.45 = e_{max} - e_{min}$ می دهد

در حالی که برای ماسه های درشت تر نتایج پایین دست و برای ماسه های شامل مواد ریزدانه نتایج بالادست خواهد بود. رابطه زیر توسط این محققین پیشنهاد شد [۴]:

$$N = \frac{9D_r^2}{(e_{max} - e_{min})^{1.7}} \left(\frac{\sigma'_0}{98} \right)^{0.5} \quad (۴)$$

که در آن فشار سربار بر حسب کیلو پاسکال و D_r به صورت نسبت بیان می شود. قابل ذکر است که N در این معادله بر اساس حدود ۷۸ درصد انرژی تئوری می باشد. در مواقعی که e_{min} و e_{max} معلوم نباشند یا قابل محاسبه نباشند رابطه زیر را می توان به کار برد:

$$e_{max} - e_{min} = 0.23 + \frac{0.06}{D_{50}} \quad (۵)$$

جدول ۱ نوعی همبستگی N ، N_{60} ، وزن مخصوص، تراکم نسبی و زاویه اصطکاک را برای خاکهای درشت دانه نشان می دهد.

جدول ۱. همبستگی پارامترهای N ، N_{60} ، γ ، D_r و ϕ' برای خاکهای درشت دانه [۳]

N	N_{60}	توصیف	γ (KN/m ³)	D_r (%)	ϕ' (درجه)
0-5	0-3	خیلی شل	11-13	0-15	26-28
5-10	3-9	شل	14-16	16-35	29-34
10-30	9-25	متوسط	17-19	36-65	35-40
30-50	25-45	سفت	20-21	66-85	38-45
>50	>45	خیلی سفت	>21	>86	>45

۴- زاویه اصطکاک خاکهای دانه ای

پک و همکاران (۱۹۷۴) رابطه زیر را بر اساس N اصلاح نشده بیان کرده اند [۵]:

$$\phi' = 53.881 - 27.6034 \exp(-0.0147N) \quad (۶)$$

شکل ۱ توسط Gibbs and Holtz (1957) ارائه شده است که در آن ارتباط N با D_r و زاویه اصطکاک خاکهای دانه ای نشان داده شده است [۶]. جدول ۲ پارامترهای خاک را بر اساس آزمایش SPT نشان می دهد. جدول ۱ ارتباط زاویه اصطکاک را با N نشان می دهد و شکل ۲ ارتباط بین زاویه اصطکاک و $(N_1)_{60}$ را برای ماسه ها نشان می دهد.

جدول ۲. پارامترهای ماسه از آزمایش SPT [۷].

پارامترها	تراکم نسبی ماسه		
	شل	متوسط	متراکم
N (اصلاح نشده)	4-10	10-30	30-50
زاویه اصطکاک (درجه)	30	34	39
مدول افقی خشک یا مرطوب ماسه k (KN/mm ³)	2.2E-6	6.6E-6	1.76E-5
مدول غوطه ور ماسه k (KN/mm ³)	1.26E-6	4.4E-6	1.07E-5

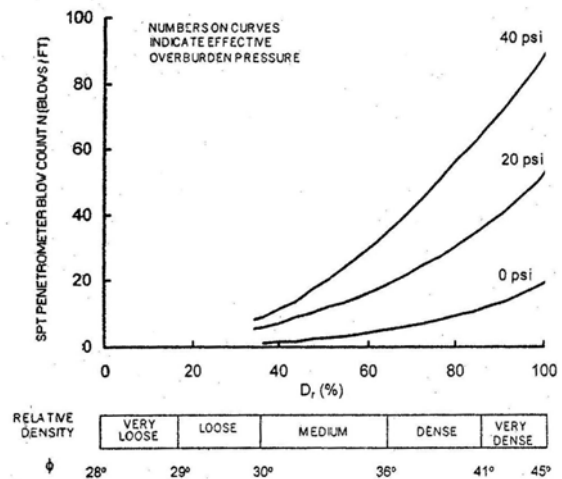
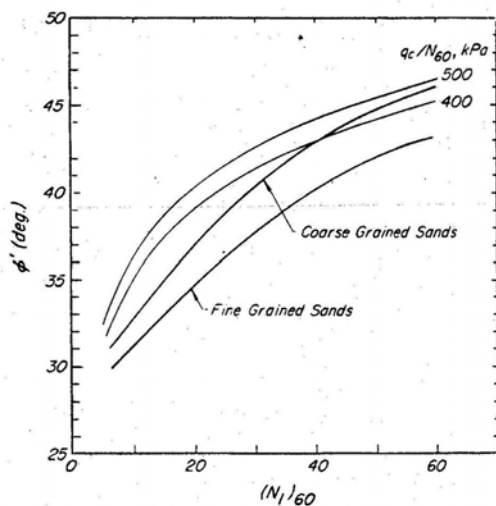
۵- ظرفیت باربری و نشست پی های سطحی

دستیابی به نمونه های دست نخورده در خاکهای درشت دانه برای آزمایش در آزمایشگاه مشکل است. بنابراین ظرفیت باربری مجاز و نشست پی ها در خاکهای درشت دانه اغلب بر اساس روش های تجربی و آزمایشات صحرائی انجام می شود. یک روش عمومی و مفید استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد است. مایهوف (۱۹۵۸) در کانادا برای ماسه رابطه محافظه کارانه زیر را بین ظرفیت باربری مجاز q_a و عدد نفوذ N در ماکزیمم نشست ۲۵ میلیمتر پیشنهاد کرده است:

$$q_a = NK_d / 80 \quad (MPa) \quad B \leq 1.2 \text{ m}$$

$$q_a = NK_d \left(1 + \frac{B}{3}\right)^2 / 120 \quad (MPa) \quad B > 1.2 \text{ m} \quad (7)$$

B عرض ناحیه بارگذاری بر حسب متر و K_d فاکتور عمق است که برای $D \leq B$ برابر $1 + D/(3B)$ می باشد. مایهوف در سال ۱۹۶۵ پیشنهاد کرد که بار مجاز محاسبه شده توسط رابطه بالا بدون تجاوز ماکزیمم نشست از ۲۵ میلیمتر، ۵۰ درصد افزایش یابد.



شکل ۱. ارتباط زاویه اصطکاک، فشار سربار، دانسیته نسبی و عدد N [۶]

شکل ۲. ارتباط تجربی بین زاویه اصطکاک ماسه ها و $(N_1)_{60}$ [۸]

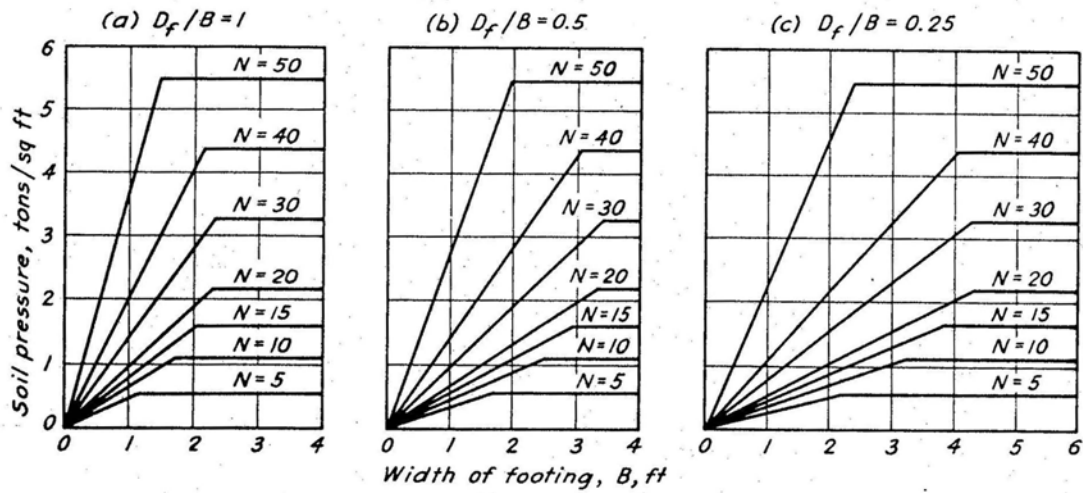
پک و همکاران (۱۹۷۴) منحنی های شکل ۳ را ارائه کردند که در آنها ارتباط عدد نفوذ N با ظرفیت باربری و عرض پی (B) و عمق پی (D_f) نشان داده شده است [۵].

باولز (۱۹۹۶) با توجه به مجموع مشاهدات صحرائی و نظرات محققین، معادلات مایهوف را برای افزایش تقریباً ۵۰ درصدی ظرفیت باربری مجاز به صورت شکل ۴ تعدیل کرده است [۹]:

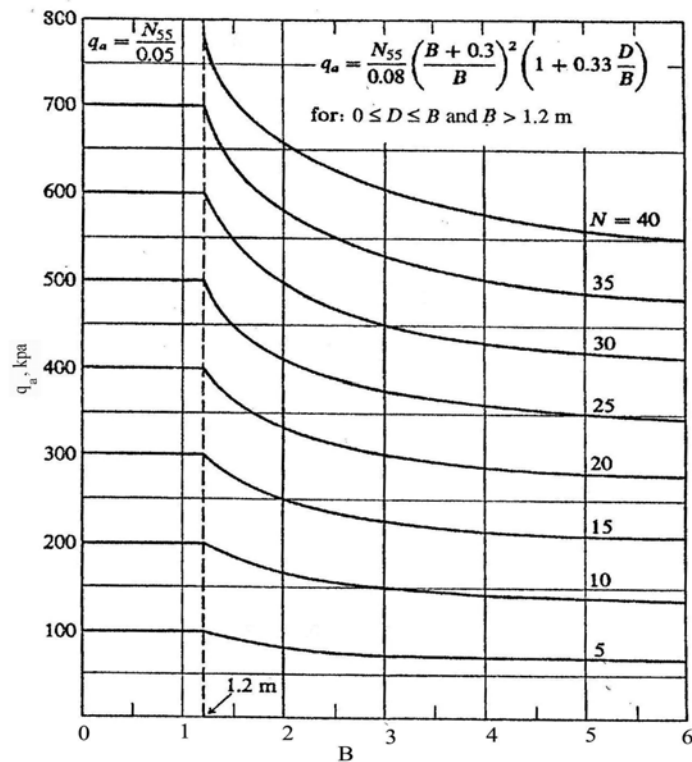
ظرفیت باربری مجاز پی های سطحی برای هر مقدار نشست را می توان از رابطه زیر حساب کرد [۳]:

$$q_a = 0.41 N_{cor} \rho_a \quad (KPa) \quad (8)$$

ρ_a نشست مجاز (میلیمتر) و $N_{cor} = C_N C_w N$ ، C_N فاکتور اصلاح سربار و C_w فاکتور اصلاح سطح آب زیرزمینی می باشد.



شکل ۳. ظرفیت باربری پی های سطحی روی ماسه [۵].



شکل ۴. ظرفیت باربری مجاز برای پی های با بار سطحی با نشست تقریبی ۲۵ میلیمتر [۹].

Burland and Burbrige (1985) یک آنالیز آماری نشست برای ۲۰۰ پی واقع در ماسه و شن انجام

دادند. ایشان رابطه زیر را برای محاسبه نشست پی های سطحی در ماسه تحکیم یافته عادی در پایان اجرا پیشنهاد کردند [۱۰]:

$$\rho = f_s f_1 \sigma_a B^{0.7} I_c \quad (9)$$

$$f_s = \text{Shape factor} = \left(\frac{1.25L/B}{L/B + 0.25} \right)^2 \quad (10)$$

$$f_1 = (H_0 / z_1) (z - H_0 / z_1)$$

ρ نشست بر حسب میلیمتر می باشد و f_1 ضریب تصحیحی است که اگر ضخامت لایه ماسه (H_0) زیر پی کمتر از عمق نفوذ Z_1 باشد، اعمال می شود. Z عمق بر حسب متر از سطح زمین است. σ_a تنش عمودی اعمالی توسط پی یا ظرفیت باربری مجاز (کیلو پاسکال)، B و L به ترتیب عرض و طول پی بر حسب متر می باشند و

$$I_c = \text{Compressibility index} = \frac{1.71}{N^{1.4}} \quad (11)$$

N عدد SPT اصلاح نشده است. عمق نفوذ عمقی است زیر پی که روی نشست و ظرفیت باربری مؤثر است. اگر N با عمق افزایش یابد یا N تقریباً ثابت باشد، عمق نفوذ $Z_1 = B^{0.763}$ فرض می شود. گر N با عمق کاهش یابد عمق نفوذ $Z_1 = 2B$ خواهد بود. اگر ماسه بیش تحکیم یافته باشد:

$$\rho = f_1 f_s \left(\sigma_a - \frac{2}{3} \sigma'_{zc} \right) B^{0.7} I_c \quad \text{if } \sigma_a > \sigma'_{zc} \quad (12)$$

$$\rho = q B^{0.7} \frac{I_c}{3} \quad \text{if } \sigma_a < \sigma'_{zc}$$

σ'_{zc} تنش بیش تحکیمی می باشد. از آزمایش نفوذ استاندارد برای محاسبه مدول الاستیسیته خاک (E_s) می توان استفاده کرد. روابط متعددی برای محاسبه مدول الاستیسیته ارائه شده است [۹].

۶- مقاومت برشی خاکهای چسبنده

ترزاقی و همکاران (۱۹۹۶) جدول زیر را برای محاسبه q_u پیشنهاد کرده اند [۸]:

	خیلی نرم	نرم	متوسط	سفت	خیلی سفت	سخت
N_{60}	< 2	2-4	4-8	8-15	15-30	> 30
q_u (kPa)	< 25	25-50	50-100	100-200	200-400	> 400

جدول ۳ نیز ارتباط عدد نفوذ را با S_u برای خاکهای ریزدانه اشباع نشان می دهد.

Ajayi and Balogun (1988) بر اساس آزمایشات مختلف و برازش داده ها رابطه زیر را پیشنهاد کرده اند [۱۱]:

$$S_u = 1.39 N + 74.2 \quad (\text{kPa}) \quad (13)$$

Tavares (1988) بر اساس آزمایشات متعدد روی نوعی رس در برزیل نتایج زیر را ارائه کرده اند [۱۲]:

N	C_u (kPa)
$N \leq 10$	8N
$10 < N \leq 20$	7N
$20 < N \leq 30$	6N
$30 < N \leq 40$	5N

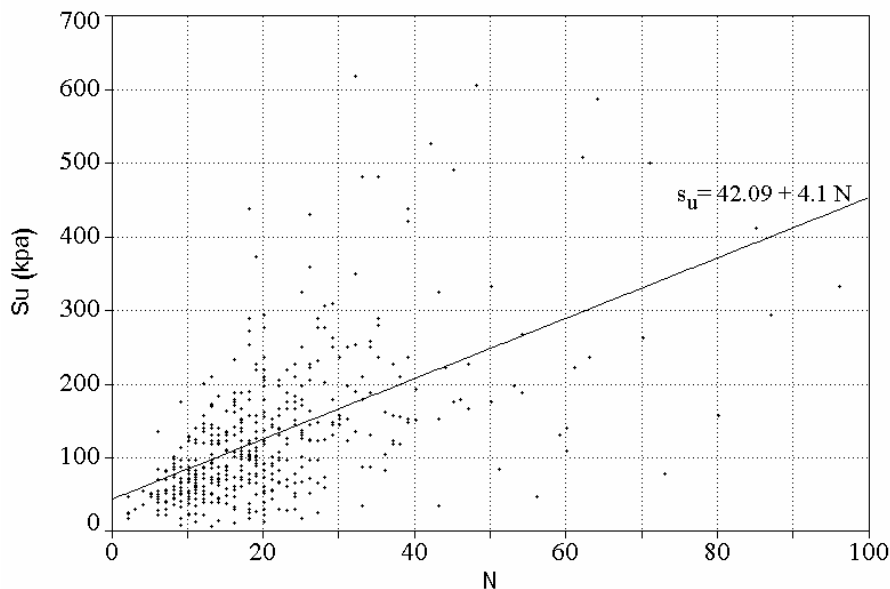
جدول ۳. ارتباط N_{60} و S_u برای خاکهای ریزدانه اشباع [۳].

N_{60}	توصیف	S_u (kPa)
0-2	خیلی نرم	< 10
3-5	نرم	10-25
6-9	متوسط	25-50
10-15	سفت	50-100
15-30	خیلی سفت	100-200
> 30	بی نهایت سفت	> 200

با استفاده از نتایج ۴۸۲ آزمایش نفوذ استاندارد و تک محوری که در نواحی مختلف شیراز انجام شده، بین مقاومت برشی زهکشی نشده خاکهای چسبنده و عدد SPT رابطه ای خطی به صورت زیر بدست آمد. خاک شیراز اغلب خاک رسی لای دار می باشد. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$S_u = 42.09 + 4.1 N \quad (\text{kPa}) \quad (14)$$

این معادله همبستگی خوبی با معادله Ajayi and Balogun (1988) ندارد اما با نتایج کار Tavares (1988) همبستگی خوبی دارد.



شکل ۵. همبستگی S_u و عدد N برای خاک شیراز

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به برخی از کاربردهای عملی آزمایش نفوذ استاندارد در مهندسی ژئوتکنیک پرداخته شده است. همبستگی های آزمایش نفوذ استاندارد با تراکم نسبی و زاویه اصطکاک خاکهای درشت دانه، ظرفیت باربری و نشست پی های سطحی و مقاومت برشی خاکهای چسبنده بررسی شده است. با استفاده از نتایج ۴۸۲ آزمایش نفوذ استاندارد در خاک شیراز، رابطه ای خطی بین S_u و عدد نفوذ استاندارد بدست آمده است که در عمل می توان از آن استفاده کرد.

۸- سپاسگزاری

از موسسه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز بخاطر همکاری مفید و مؤثرشان تشکر و قدردانی می شود.

۹- مراجع

- [1] Borms Bengt, B., and Flodin, Nils. "History of soil penetration testing." Penetration Testing, ISOPT-1, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, 1988, pp. 157-220.
- [2] Liao, S. S. C., and Whitman, R.V. "Overburden correction factors for SPT in sand." ASCE J. of Geot. Eng., Vol. 112, No. 3, 1986, pp. 373-377.
- [3] Budhu, M. Soil mechanics and foundations, 2000, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [4] Cubrinovski, M., and Ishihara, K. "Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils." Soils and Foundations, Vol. 39, No. 5, 1999, pp. 61-71.
- [5] Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T.H. Foundation engineering, 1974, John Wiley & Sons, Inc. USA.
- [6] Gibbs, H. J., and Holtz, W. G. "Research on determining the density of sands by spoon penetration testing." Proc. 4th Int. conf. on soil mechanics and Foundation Eng., London, England. Vol. 1, 1957, pp. 35-39.
- [7] Terzaghi, K. "Evaluation of coefficients of subgrade reaction." Geotechnique, Vol. 5., No. 4., 1955, pp. 197-326.
- [8] Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G., Soil mechanics in engineering practice, 1996, John-Wiley & Sons, USA.
- [9] Bowles, J. E. Foundation analysis and design, 1996, McGraw-Hill, 5th Edition.
- [10] Burland, J. B., and Burbrige, M. C., "Settlement of foundations on sand and gravel." Proc. Inst. Civil Eng. Part 1, 78, 1985, pp.1325-1381.
- [11] Ajayi, L.A., and Balogun, L.A. "Penetration testing in tropical lateritic and residual soils – Nigerian experience." Penetration Testing, ISOPT-1, Balkema, Rotterdam. Vol. 1, 1988, pp. 315-328.
- [12] Tavares, A. X. "Bearing capacity of footings on Guabirota clay based on SPT N-value." Penetration Testing, ISOPT-1, Balkema, Rotterdam. Vol. 1, 1988, pp. 375-379.