

Tomasz Godlewski*, Tomasz Szczepański**

NIELINIOWA CHARAKTERYSTYKA SZTYWNOŚCI GRUNTU (G_o) – METODY OZNACZANIA I PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

1. Wstęp

Określanie współpracy konstrukcji z podłożem gruntowym wymaga podania odpowiednio dobranych do danego zagadnienia parametrów współpracy wymaganych w danej metodzie obliczeniowej. W podłożu w przypadku określania wartości modułów odkształcenia bardzo ważne jest rozpatrywanie rzeczywistej pracy konstrukcji tzn. określone moduły powinny być podawane w zakresie naprężeń i odkształceń, w którym mieści się współpraca danej konstrukcji z uwzględnieniem ewentualnych obciążeń dynamicznych [2–4, 12]. W mechanice gruntów dużym krokiem naprzód było w tym zakresie odkrycie silnej nieliniowości modułu odkształcenia w strefie małych odkształceń (10^{-5} – 10^{-2}). Metody badań, które pozwalają na wyznaczenie wartości modułów w tej strefie należą do grupy metod zaawansowanych, wspomaganych pomiarami prędkości fal sejsmicznych (rys. 1). Z uwagi na możliwość uzyskania wyników w warunkach *in situ*, przewagę ilościową mają badania polowe. Wynikami badań są profile sprężystości gruntu tj. rozkład zmienności modułu ściskania (G_{\max}) lub modułu Younga (E_{\max}) z głębokością. Moduły te obliczamy ze wzorów 1 i 2:

$$E_o = 2\rho V_s^2(1 - \nu) \quad (1)$$

$$G_o = \rho V_s^2 \quad (2)$$

gdzie:

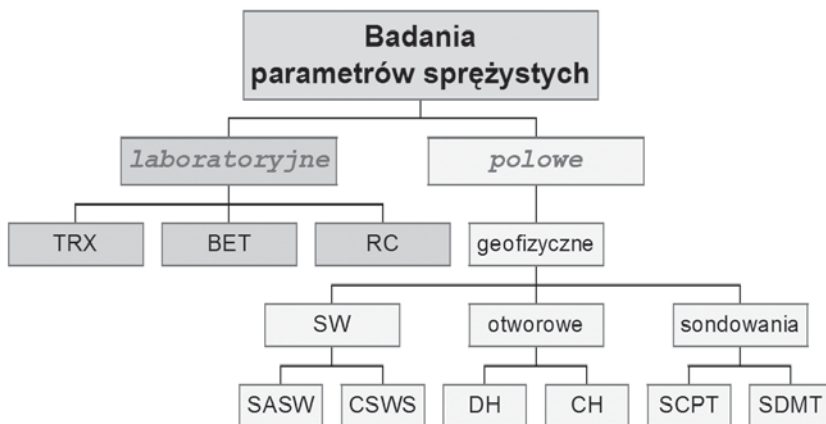
ρ — gęstość objętościowa gruntu,

V_s — prędkość fali poprzecznej,

ν — współczynnik Poissona.

* Zakład Geotechniki i Fundamentowania, Instytut Techniki Budowlanej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa

** Zakład Geologii Inżynierskiej, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa



Rys. 1. Główne metody badań parametrów sprężystych [1]

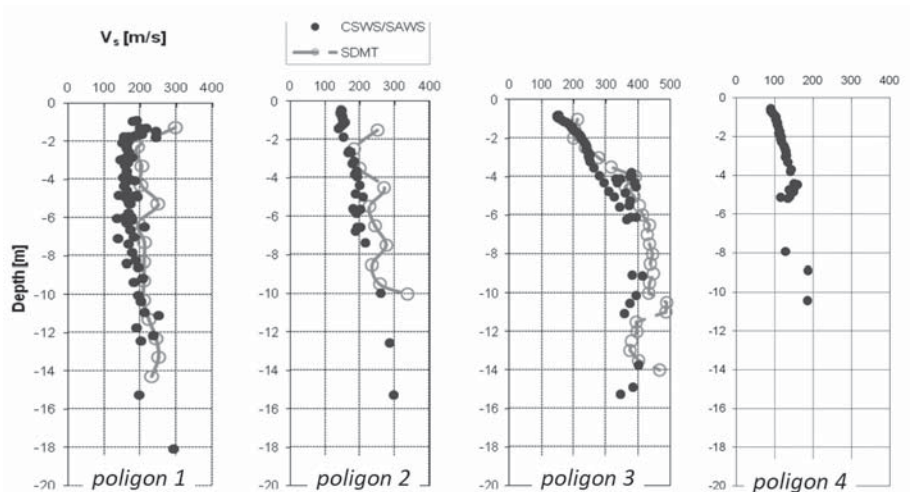
2. Metody polowe wyznaczania modułu G_o w gruntach

W zakresie metod polowych zastosowano geofizykę powierzchniową wykorzystującą falę Rayleigha w konfiguracji CSWS i SAWS oraz dylatometr sejsmiczny SDMT. Szczegóły dotyczące sprzętu, metodologii oraz wykorzystanych technik pomiarowych można znaleźć w publikacjach: [1, 7, 8], dla geofizyki powierzchniowej oraz [6] dla SDMT.

Na poligonach badawczych w Warszawie wykonano pierwsze badania porównawcze, walidujące wyżej opisane metody. Wytypowano grunty o zróżnicowanych właściwościach, litologii i genezie, kierując się opisywaną przez Robertsona (2009) [10] zasadą klasyfikacyjną SBT (Soil Behavior Type). Były to mio-pliocenijskie iły formacji poznańskiej (OC), plejstocenijskie gliny zwałowe zlodowacenia Warty i Odry (OC) oraz młode holocenijskie i późno plejstocenijskie piaski rzeczne (NC), a także holocenijskie mady (NC). Na podstawie wyników badań z trzech pierwszych poligonów wykonano porównanie i walidację analizowanych metod wyznaczania modułu G_o , dokonano analizy wyników, oraz poszukiwano związków z wybranymi parametrami geotechnicznymi dla analizowanych typów gruntów, co zostało opisane w [3].

Dla analizowanych poligonów wykonano pomiary prędkości propagacji fal sejsmicznych. Analizę porównawczą użytych metod oparto na wykresach bezpośrednich wartości mierzonych, czyli pomiarów prędkości fali poprzecznej V_s . Wyniki dla wybranych typów gruntów uzyskanych z dwóch metod (CSWS/SAWS i SDMT) — poligony 1–3, lub tylko CSWS/SAWS (poligon 4) pokazano na rysunku 2.

Wyznaczone na tej podstawie wartości modułów G_o wynikają z przyjęcia gęstości objętościowej dla każdego typu gruntu oraz współczynnik Poissona (ν). Wartości gęstości wyznaczono jako średnie wartości dla profilu na podstawie badań laboratoryjnych, natomiast wartość ν przyjęto jako średnią wartość dla typowych gruntów polskich. Wyznaczone na tej podstawie wartości modułu ścinania G_o przedstawia tabela 1.



Rys. 2. Wyniki bezpośrednich pomiarów sejsmicznych prędkości fali poprzecznej V_s w funkcji głębokości dla: łąw plicieńskich — poligon 1, piasków rzecznych — poligon 2, glin zwałowych — poligon 3, mąd — poligon 4

TABELA 1

Wartości modułu ścinania dla gruntów z 4 poligonów badawczych

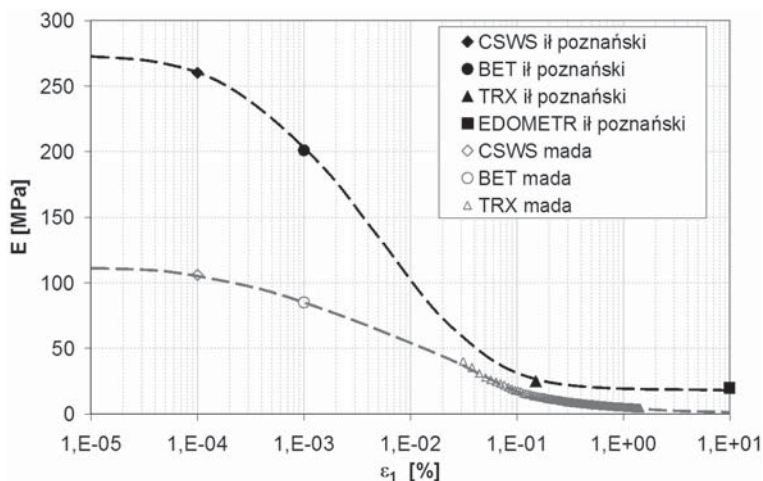
	założenia:	G_0 z CSWS/SAWS	G_0 z SDMT
Poligon 1 – łąy plicieńskie	$\rho = 2,1 \text{ T/m}^3$	$\nu = 0,3$	48÷180, śr. 70 MPa
Poligon 2 – piaski rzeczne	$\rho = 2,0 \text{ T/m}^3$		60÷242, śr. 126 MPa
Poligon 3 – gliny zwałowe	$\rho = 2,2 \text{ T/m}^3$		111÷375, śr. 241 MPa
Poligon 4 – mady rzeczne	$\rho = 1,9 \text{ T/m}^3$		14÷73, śr 36 MPa
			—

3. Zastosowania praktyczne

Grнты charakteryzują się silną nieliniowością w zależności od odkształcenia, [4, 8] zatem należy precyzyjnie dobierać metody badania podłoża tzn. w zakresie ich „czułości” pomiarowej, odpowiedniej dla danego typu konstrukcji budowlanych. Przykładem może tu być potwierdzenie przydatności metody DMT do wyznaczania modułów i prognozy na ich podstawie osiadań dla budynków posadowionych bezpośrednio (na ławach i stopach) uzyskane dla dużego zbioru danych (30 poligonów) [12]. Zbiorem porównawczym były wykresy osiadań pomierzonych na obiektach, odniesione do wartości osiadań prognozowanych z DMT. Dla 11 obiektów uzyskano wysoką zbieżności wyników prognozowanych do pomierzonych (wsp. kierunkowy prostej dla wartości średnich wyniósł 0,97 przy przedziale rozrzutu 0,5÷2,0). Podobne przykłady prezentuje między innymi Monaco i in.(2006) [9].

W przypadku gdy nie mamy bezpośrednich pomiarów, a metoda obliczeń projektowych wymaga określonych parametrów wtedy rozwiązaniem pomocnym staje się poszukiwa-

nie związków korelacyjnych. Dla danych z 3 poligonów badawczych autorzy przedstawili pierwsze próby takich korelacji [3]. W cytowanym artykule szczegółowo opisano podaną przez Marchettiego i in. [6] eksperymentalną metodę wyznaczania przebiegu krzywej sztywności w oparciu o badania standardowe (DMT) wykorzystując tzw. krzywe referencyjne dla danego typu gruntu. W oparciu o podaną metodykę możliwe jest wyznaczenie wartości G_0 dla dowolnej wielkości strefy odkształcenia. Ograniczenie stosowalności tej metody wynika z braku w/w krzywych referencyjnych dla różnych typów gruntów. Wymaga to szeregu badań i oznaczeń. Pierwsze próby wyznaczenia tego rodzaju rozkładu sztywności przedstawiono na rysunku 3. Dla porównania na wykresie zestawiono wyniki modułu odkształcenia w zakresie $10^1 \div 10^{-5}$ uzyskane dla holocenijskich utworów madowych oraz dla iłłów plicieńskich stanowiących podłoże stacji metra A19.



Rys. 3. Nieliniowość modułu odkształcenia E w zależności od wielkości odkształcenia ϵ_1 dla iłłów poznańskich ze stacji A19, oraz dla porównania dla mada z Wilanowa

Wskazany w literaturze [2–4, 7, 8] dobór metod w zależności od wielkości odkształceń potwierdza się w praktyce. Przydatność oznaczeń tych parametrów wg podanych metod potwierdzają analizy wsteczne na zrealizowanych obiektach (np. głębokie wykopy). Często parametry (moduły) przyjęte do obliczeń z metod geofizycznych, które są wielokrotnie wyższe niż wartości podawane w normach, czy oznaczone za pomocą metod standardowych, dają dobrą zgodność z wynikami z monitoringu i pozwalają zapewnić dobrą zbieżność obserwacji z wynikami z obliczeń numerycznych [2]. Poniżej przedstawiono przykłady praktycznych zadań geotechnicznych rozwiązanych z wykorzystaniem parametrów oznaczonych dla strefy małych odkształceń.

Dla wyznaczonych na stacji A19 modułów wykonano obliczenia MES-em (Plaxis 2D), w celu sprawdzenia rozbieżności wartości przemieszczeń konstrukcji stacji w zależności od przyjętego parametru. Uzyskane wyniki zostały odniesione do rzeczywistych pomiarów odkształceń konstrukcji stacji (tabela 2).

TABELA 2

Wyniki ugięcia ścian w przekroju osi 4–5: obliczone i pomierzone [4]

punkty/ położenie	Obliczenia				Pomiar (oś 4–5) ściana W	Pomiar (oś 4–5) ściana W
	edometr	TXT	BET	CSWS		
A /3,0 m	–8,5 mm	–11,0 mm	3,0 mm	3,3 mm	1 mm	2 mm
B /7,0 m	8,3 mm	6,0 mm	2,2 mm	2,8 mm	3 mm	2 mm
C /12,0 m	47,0 mm	41,0 mm	1,3 mm	1,7 mm	2 mm	1 mm

Wartości parametru E uzyskane z badań BET i CSWS uzyskują najlepszą zbieżność z pomiarami (ten sam rząd wielkości). Wyniki dla modułów z badań edometrycznych i z aparatu trójosiowego ściskania są rozbieżne i dają ok. 4-krotnie większe wartości przemieszczeń w stosunku do maksymalnych pomierzonych na stacji. Przeprowadzenie analizy z wykorzystaniem parametrów wyznaczonych w zakresie małych odkształceń (zakres realnej pracy konstrukcji stacji) wyznaczonych za pomocą metod z użyciem sejsmiki, prowadzi do uzyskania wartości przemieszczeń zbliżonych do rzeczywistych. Należy zauważyć, że podane wartości sprawdziły się w obliczeniach z użyciem modelu z warunkiem Coulomba–Mohra.

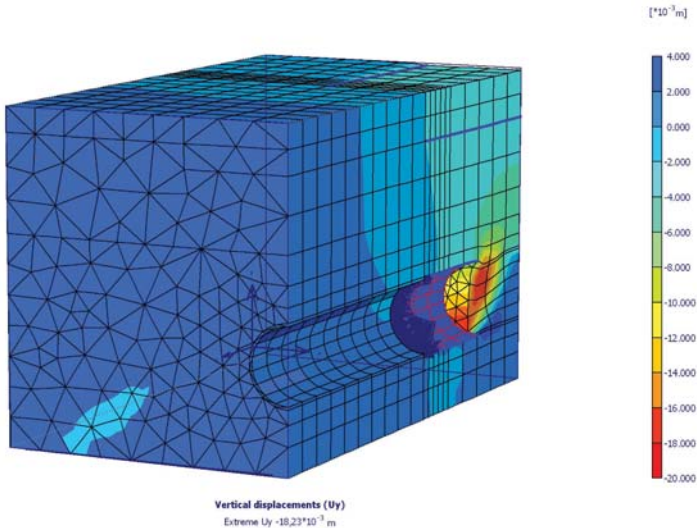
W przypadku stacji metra, czy tuneli do współpracy z konstrukcją włączone są duże obszary gruntów, a w nich odkształcenia są małe. Poniżej przedstawiono przykład modelowania wpływu budowy tunelu metra na otoczenie, w tym również przejście pod budynkami. Analizy wykonano [11] w celu ustalenia prognozy oddziaływań tuneli drażonych mechanicznie (EPB). Dane to: oś tunelu o średnicy 6,30 m na głębokości ok. 12 m p.p.t., głębokość posadowienia budynku wynosi 4,0 m. Warunki gruntowe: od powierzchni terenu; 1,5 m nasypu, 12 m piasku średniego i drobnego, poniżej ił. Tunel przebiega w warstwie piasku. Spąg tunelu w iłach plicieńskich. Woda gruntowa o zwierciadle swobodnym występuje na głębokości 5 m p.p.t.. Parametry gruntu przyjęto takie wg tabeli 3, moduły wyznaczono na podstawie pomiarów modułu ścinania G_o z badań SDMT i CSWS/SAWS.

TABELA 3

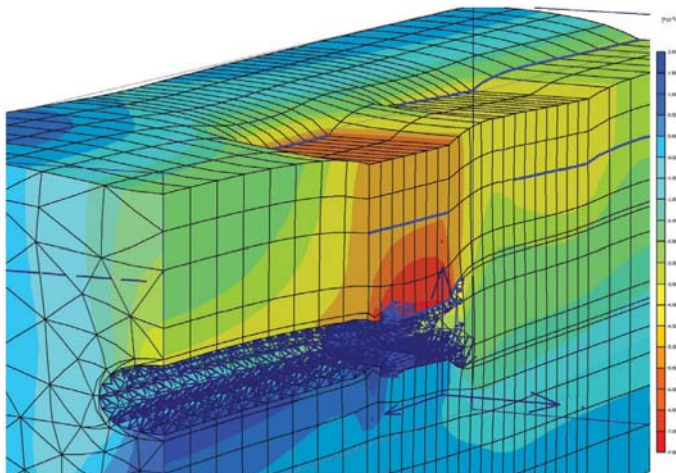
Parametry gruntowe przyjęte do obliczeń (grunty osuszone)

Mohr–Coulomb		Iły	Piaski
γ_{unsat}	[kN/m ³]	21,00	18,00
γ_{sat}	[kN/m ³]	21,00	19,00
k_x	[m/dzień]	0,000	1,000
k_y	[m/dzień]	0,000	1,000
E_{ref}	[kN/m ²]	266000,000	200000,000
ν	[—]	0,330	0,300
G_{ref}	[kN/m ²]	100000,000	76923,077
E_{oed}	[kN/m ²]	394117,647	269230,769
c_{ref}	[kN/m ²]	21,00	1,00
ϕ	[°]	12,00	33,00
R_{inter}	[—]	0,70	1,00

W obliczeniach wymodelowano: ciśnienie robocze w przodku tarczy, nacisk siłowników posuwających tarczę, iniekcję wypełniająca przestrzeń za obudową i odprężenie gruntu związane z przejściem tarczy o średnicy większej od obudowy. Obliczenie obejmuje etapowy postęp tarczy. Na rysunkach 4 i 5 widoczny jest etap drażnienia tarczą, w przodku widoczne są przemieszczenia, powstające w przypadku zbyt małego ciśnienia stabilizującego.



Rys. 4. Siatka elementów obrazująca rozkład pionowych przemieszczeń. Największe przemieszczenie pionowe w rejonie tarczy wynosi 18,23 mm. [11]



Rys. 5. Obraz przemieszczeń pionowych w rejonie tarczy pod skrzydłami budynku. Obraz pionowych przemieszczeń wokół tunelu. Kolor pomarańczowy intensywny oznacza osiadanie nad tunelem równe 38 mm. Kolor niebieski pod tunelem oznacza odprężenie gruntu. [11]

Modelowanie przemieszczeń wywołanych drążeniem tarczą EPB wymaga potwierdzenia w odniesieniu do pomiarów rzeczywistych, jednak doświadczenia światowe oraz obserwację przemieszczeń w przypadku głębokich wykopów potwierdzają potrzebę stosowania w programach komputerowych wartości modułów odpowiadających małym odkształceniom.

4. Wnioski

Obecnie podstawowe metody do wyznaczania rozkładu sztywności gruntu to grupa metod wykorzystujących sejsmikę. Wykonane badania porównawcze dla dwóch metod oznaczania sprężystych parametrów gruntów wskazują że obydwie metody dają bardzo zbliżone wyniki pomimo różnego charakteru tych pomiarów (inwazyjne SDMT i bezinwazyjne CSWS/SAWS) [3]. Są to pierwsze tego typu porównania wykonane dla typowych gruntów polskich. Uzyskane na ich podstawie wartości modułu G_o są najwyższe dla glin zwałowych, gdzie należy się spodziewać największego wpływu wynikającego z przekonsolidowania (OC). Otrzymane porównania wyników są obiecujące, a poszukiwane zależności w przypadku zestawień dla SDMT mają potwierdzenie w doświadczenia innych autorów [4, 6, 7, 9]. Uzyskane krzywe referencyjne dla ilów i mad mogą stanowić podstawę do wyznaczania parametrów w pełnym zakresie odkształcenia postaciowego. Przedstawione wyniki stanowią I etap wstępnych badań wykonywanych w ramach projektu badawczego dotyczącego określania modułu G_o gruntów w badaniach laboratoryjnych i polowych z wykorzystaniem metod sejsmicznych, realizowanego w ITB (praca statutowa nr NG-61) we współpracy z IHiGI Wydziału Geologii UW.

Przykłady praktyczne [2, 4, 11, 12] potwierdzają konieczność wyznaczania wartości G_o dla obiektów gdzie do współpracy włączone są duże obszary gruntów, a w nich odkształcenia są małe np. ściany szczelinowe, obudowy tuneli itp. Zastosowanie w modelowaniu numerycznym parametrów sztywności (G_o) i na tej podstawie uzyskiwane prognozy przemieszczeń są zbieżne z rzeczywistymi pomiarami.

Przedstawione metody oraz przykłady zastosowań praktycznych, w których do oceny współpracy konstrukcji z podłożem wykorzystano parametry uzyskane z wykalibrowanych badań polowych oraz analizy numeryczne oparto na typowych (prostych) modelach gruntu, stanowią alternatywę dla złożonych modeli zaawansowanych. Te ostatnie wymagają jednak wyznaczania dla podłoża wielu coraz bardziej zawiłych, teoretycznych parametrów (niekiedy nie będących już wielkościami fizycznymi). Zdaniem autorów przy bardzo rozwiniętym warsztacie obliczeniowym jaki mamy do dyspozycji, problemem są właśnie wiarygodne (więc między innymi stosunkowo prosto oznaczane) i adekwatne do zadania parametry gruntowe wprowadzane do analiz. Stąd wynika potrzeba rozwoju i szerszego stosowania wyżej opisywanych metod.

LITERATURA

- [1] *Barański M., Szczepański T.*: Wykorzystanie metod sejsmiki powierzchniowej (CSWS, SAWS) do wyznaczania parametrów sprężystych gruntu. Z. Nauk. P. Białost. Budownictwo Nr 28, Białystok, 2006, s. 9–18

- [2] *Barański M., Popielski P., Szczepański T.*: Analiza możliwości weryfikacji modelu numerycznego na podstawie pomiarów i badań wykonanych w trakcie realizacji obiektu. Czasopismo Techniczne. Wydawnictwo PK, z. 1–Ś, Kraków, 2007
- [3] *Barański M., Godlewski T., Szczepański T.*: Determination of Soil Stiffness Parameters on Chosen Test Sites, Using in situ Seismic Methods. Dembicki E., Komisarek J.(red.), Soil parameters from *in situ* and laboratory tests, Poznań, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2010
- [4] *Godlewski T.*: Poznań Formation Clays as a Construction Subsoil on the Example of A19 Marymont Underground Station in Warsaw (Poland). Proceedings of the 19th European Young Geotechnical Engineers' Conference, Széchenyi István Egyetem, Győr, Hungary, 3–6 September, 2008, pp. 145–153
- [5] *Gogolik S.*: Zastosowanie testów SCPTU i SDMT do wyznaczania prędkości fali poprzecznej w osadach poflotacyjnych. Z. Nauk. P. Białost. Budownictwo Nr 26, Białystok, 2006, s. 49–58
- [6] *Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D.*: In situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT). J.E. Laier, D.K. Crapps & M.H. Hussein, From Research to practice in Geotechnical Engineering, ASCE G.S. Publ. No. 170, 2008, pp. 292–311
- [7] *Matthews M.C., Clayton C.R.I., Own Y.*: The Use of Geophysical Techniques to Determine Geotechnical Stiffness Parameters. Proc. Instn. Civ. Engrs Geotech. Eng, 143, 2000, pp. 31–42
- [8] *Menzies B.*: Near-surface Site Characterisation by Ground Stiffness Profiling Using Surface Wave Geophysics. H. C. Verma Commemorative Volume. Indian Geotechnical Society, New Delhi, 2000
- [9] *Monaco P., Totani G., Calabrese M.*: DMT — Predicted vs Observed Settlements: a Review of the Available Experience. Proc. from the Second International Flat Dilatometer Conference, Washington D.C., 2006, pp. 275–280
- [10] *Robertson P.K.*: Interpretation of Cone Penetration Tests — Unified Approach. Can. Geotech. J. 46, 2009, pp. 1337–1355
- [11] *Wysokiński L., Godlewski T., Wszędyrówny-Nast M.*: Zależności regionalne parametrów geotechnicznych podłoża na podstawie sondowań CPTU i DMT. Mat. Konf.: Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych. Wyd. Uczel. UTB Bydgoszcz, 2009, s. 235–242
- [12] Seminarium ITB: Projektowanie geotechniczne dla potrzeb nowych technologii budowy metra, Warszawa, 28.10.2010