

Mirosław J. LIPIŃSKI¹
Jerzy SZCZYPIOR²
Małgorzata WDOWSKA³

PRZYKŁAD OKREŚLANIA ZWIĄZKÓW REGIONALNYCH NA POTRZEBY INTERPRETACJI SONDOWAŃ DMT W MOCNYCH GRUNTACH SPOISTYCH

Streszczenie. Szeroko rozpowszechnione wykorzystanie badań DMT w różnorodnych warunkach geologicznych wymaga weryfikacji lub dostosowania istniejących formuł do określania parametrów geotechnicznych. Złodowacenia jakie miały miejsce na terenie Polski w przeszłości spowodowały występowanie silnie prekonsolidowanych gruntów oraz powstanie złożonych warunków geologicznych. Artykuł opisuje przykład korelacji wyników badań DMT z parametrami wytrzymałościowymi i odkształceniowymi określonymi na podstawie badań trójosiowych TXCIU przeprowadzonych na silnie prekonsolidowanych ilach o średniej i wysokiej plastyczności. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wyprowadzone wzory dotyczące sztywności pozwalają na określenie modułu odkształcenia E dla różnych odkształceń z zakresu 0,01-1,0%.

Słowa kluczowe: DMT, nowe formuły, silnie prekonsolidowane grunty spoiste, wytrzymałość, sztywność, zakres odkształcenia

1. Wstęp

Wiele awarii i katastrof budowlanych powstało w wyniku nieodpowiedniego scharakteryzowania warunków w podłożu posadowienia. Podstawowe narzędzia dostępne dla projektanta do rozpoznania geotechnicznych warunków posadowienia to badania terenowe i laboratoryjne. W przypadku obiektów dużych i niestandardowych oraz tam gdzie konieczna jest prognoza zachowania się gruntu w różnych warunkach obciążenia, nacisk jest położony na wysokiej ja-

¹ Autor do korespondencji/ corresponding author: Mirosław Lipiński, Katedra Geoinżynierii SGGW, ul. Nowoursynowska 159, bud. 33, pok. 29, 02-787 Warszawa, 22 5935228, miroslaw_lipinski@sggw.pl

² Jerzy Szczyplik, GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o.

³ Małgorzata Wdowska, Katedra Geoinżynierii SGGW

kości badania laboratoryjne, pozwalające określić zmiany sztywności i wytrzymałości badanego gruntu. W pozostałych przypadkach, które stanowią zdecydowaną większość w praktyce inżynierskiej, charakterystyka podłoża opiera się na badaniach terenowych i prostych badaniach laboratoryjnych w celu określenia istotnych ale podstawowych właściwości fizycznych. Do lat 50-tych ubiegłego stulecia, rozpoznanie podłoża opierało się prawie wyłącznie na otworach oraz wykopach badawczych. Od drugiej połowy XX wieku coraz częściej w badaniach terenowych wykorzystywano sondowania. W początkowym okresie były to głównie mechaniczne sondowania dynamiczne (otworowe i bezotworowe). Następnym etapem były sondowania statyczne, które chociaż pojawiły się już w latach 30-tych to jednak elektryczne sondy CPTu, przypominające dzisiejsze stożki są stosowane od początku lat siedemdziesiątych. Powtarzalność wyników sondowania CPT sprawiała, że w latach siedemdziesiątych ten rodzaj sondowania statycznego zyskiwał coraz większą popularność i zdominował rynek sondowań geotechnicznych. Pod koniec lat siedemdziesiątych, włoski geotechnik z Uniwersytetu L'Aquila profesor Silvano Marchetti opatentował rodzaj sondy statycznej, która obecnie znana jest pod nazwą „płaski dylatometr Marchettiego” i oznaczana jest akronimem DMT. Procedura tego badania jest bardzo prosta i w wersji podstawowej polega na wyznaczeniu na danej głębokości sondowania dwóch wartości ciśnień p_0 i p_1 odpowiadającym różnym położeniom membrany końcówki dylatometru. Procedura badania jest szczegółowo omówiona w wielu publikacjach, również w tych przedstawionych w spisie literatury do niniejszego artykułu [3,4,5,7]. Pomierzone wartości p_0 i p_1 oraz znajomość położenia zwierciadła wody w profilu są wystarczającymi danymi do opracowania wyników badania w formie podstawowej tj. dokumentującej wykonanie badania. Na tę formę składają się trzy podstawowe wskaźniki dylatometryczne tj. wskaźnik rodzaju gruntu I_D , moduł dylatometryczny E_D i wskaźnik naprężenia poziomego K_D . W latach osiemdziesiątych, ten rodzaj sondowania zyskiwał coraz większą popularność nie tylko we Włoszech i całej Europie ale również na innych kontynentach. W roku 1986 [7] procedura wykonania badania została objęta standardem amerykańskim ASTM a w roku 2015 odbyła się trzecia międzynarodowa konferencja poświęcona tylko temu rodzajowi sondowania.

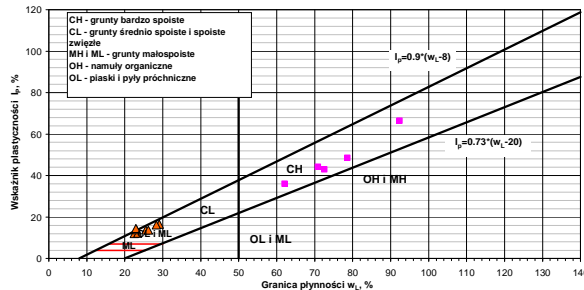
W Polsce badanie płaskim dylatometrem po raz pierwszy zostało wykonane w 1989 roku na składowisku odpadów poflotacyjnych (obecna nazwa to Obiekt Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych Żelazny Most). W latach następnym urządzenie to było wykorzystywane w wielu pracach Katedry Geotechniki SGGW i firmy GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o. dotyczących np. I linii metra w Warszawie, składowiska Żelazny Most czy zapory wodnej w Czorsztynie [3]. Obecnie ten rodzaj sondowania jest prawdopodobnie drugim (po sondzie CPT) najbardziej popularnym rodzajem sondowania statycznego. Przyczyny tej popularności wynikają z relatywnie prostej budowy urządzenia, powtarzalności wyników oraz szerokich możliwości zastosowań. Warto zwrócić uwagę na jeszcze jedno ważne kryterium, według którego ustalana jest

wiarygodność związków korelacyjnych danego rodzaju sondowania. Im więcej jest udokumentowanych zastosowań sondy skorelowanych z konkretną (weryfikowalną) sytuacją terenową, czyli tzw. *case history* (np. upłynnienie wywołane trzęsieniem ziemi, utrata stateczności, wielkość osiadania), tym większe zaufanie do związków empirycznych wyprowadzonych dla sondowania. W odniesieniu do tego kryterium, liczba udokumentowanych opracowań dotyczących zastosowań DMT w zagranicznej literaturze geotechnicznej jest duża i to przesądza o popularności urządzenia, opartej na wiarygodności wyników. Niestety w Polsce najczęściej wykorzystuje się formuły opracowane za granicą dla innych rodzajów gruntów i bezkrytycznie stosuje się je do podłoża rodzimych. Dotyczy to zarówno gruntów spoistych jak i niespoistych. Badania referencyjne dla sondowań dylatometrycznych były wykonywane np. dla piasków w komorze kalibracyjnej [1] a dla gruntów spoistych na podstawie wysokiej jakości badań laboratoryjnych dla dobrze rozpoznanych poligonów badawczych np. il Augusta oraz il pylasty Taranto [2]. Tego rodzaju porównań dla gruntów najczęściej występujących w Polsce brakuje. Dotyczy to przede wszystkim silnie prekonsolidowanych mineralnych gruntów spoistych. W artykule przedstawione zostanie podejście do wyprowadzenia formuł opartych na kalibracji wyników badania dylatometrycznego z wynikami badań na próbkach o nienaruszonej strukturze uzyskanych w aparacie trójosiowym. Korelacje, które są przedmiotem analiz dotyczą wytrzymałości w warunkach bez odpływu oraz modułu odkształcenia dla różnych zakresów odkształcenia.

2. Charakterystyki z badań laboratoryjnych

W przypadku ustalania formuł do wyznaczania parametrów geotechnicznych na podstawie płaskiego dylatomietru, jedną z podstawowych metod jest kalibracja z wynikami badań laboratoryjnych wykonywanych na próbkach pobranych w miejscach wykonania sondowania DMT. O ile w przypadku gruntów słabych rezultaty badania dylatometrycznego mogą być skorelowane z wynikami sondowań FVT lub badaniami w komorze kalibracyjnej, to w przypadku mocnych gruntów spoistych podłoża, korelacja z badaniami laboratoryjnymi wykonanymi na próbkach o wystarczająco dobrej jakości, stanowi główny punkt odniesienia.

Celem artykułu jest przedstawienie takiego podejścia na przykładzie badań wykonywanych dla II linii metra w Warszawie [8]. Przedstawiane korelacje dotyczą dwóch grup gruntów tj. mocno prekonsolidowanych gruntów spoistych o średniej i wysokiej plastyczności. Używając „przeurokodowej” nomenklatury klasyfikacyjnej, której nadal używa większość projektantów, są to po prostu gliny i ily. Nomogram Casagrandego dla badanych gruntów przedstawiono na rysunku 1. Stan badanych gruntów o mniejszej plastyczności oscyluje wokół granicy pomiędzy stanem twardoplastycznym i półzwardym. Wszystkie grunty o dużej plastyczności (ily) są w stanie półzwardym. Konsystencja zwarta i stan co najmniej twardoplastyczny upoważnia do określenia badanych gruntów jako silnie prekonsolidowanych.



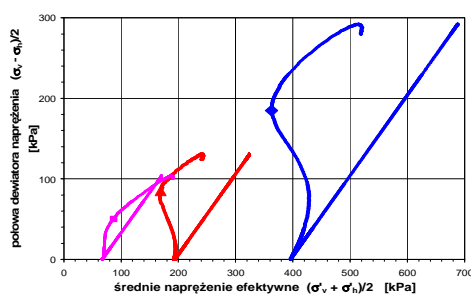
Rys. 1. Nomogram Casagrandego badanych gruntów

Fig. 1. Casagrande chart for tested soils

Jako podstawę odniesienia dla sondowań DMT przyjęto wyniki badań trójosiowych w których próbki były konsolidowane izotropowo a następnie ściskane w warunkach bez odplywu. Takie warunki konsolidacji i ścinania podczas badania trójosiowego odpowiadają warunkom badania podczas wykonywania pomiarów dylatometrycznych p_0 i p_1 .

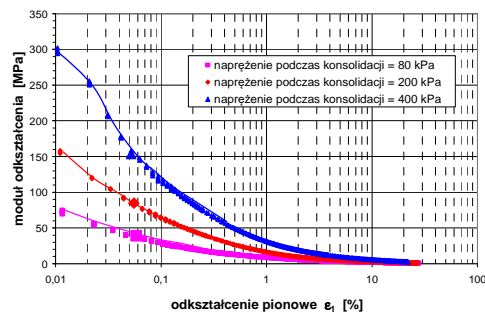
Podstawowe parametry jakie określane były na podstawie badań trójosiowych to wytrzymałość w warunkach bez odplywu oraz moduł odkształcenia. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe ścieżki otrzymane z badań, które były podstawą do określania wytrzymałości bez odplywu. Wartość wytrzymałości odczytana ze ścieżki naprężenia efektywnego odpowiadała tzw. punktowi „phase transformation” w otoczeniu którego ścieżka wpisuje się w obwiednię zniszczenia.

Drugim parametrem jaki otrzymano z badań trójosiowych był moduł odkształcenia E reprezentujący sztywność gruntu. Podobnie jak dla parametrów wytrzymałościowych na rysunku 3 pokazano przykładowe wyniki badań. Wykresy przedstawiają rozkłady modułu otrzymanych z badań w zależności od odkształcenia pionowego. Warto w tym miejscu podkreślić, że dzięki wykorzystaniu do badań zmodyfikowanych komór aparatu trójosiowego o wewnętrznych prętach łączących, możliwe było określenie wartości modułów w szerokim zakre-



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki wytrzymałościowe z badań – ścieżki naprężenia efektywnego

Fig. 2. Examples of shear strength characteristics – effective stress paths and undrained shear strength



Rys. 3. Przykładowe charakterystyki odkształceniowe z badań

Fig. 3. Examples of stiffness characteristics – distribution of deformation moduli E

sie odkształcenia pionowego tj. 0,01-1,0%. Pomimo, że zakres ten nie obejmuje odkształceń mniejszych niż 10^{-2} % to jednak z praktycznego punktu widzenia odpowiada on warunkom pracy konstrukcji jakie występują w większości praktycznych zagadnień inżynierskich.

3. Korelacje wyników sondowania z badaniami laboratoryjnymi

3.1. Wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu

Wskaźnik naprężenia poziomego K_D wykorzystuje tylko jeden z pomiarów dylatometrycznych odpowiadający progowej wartości ciśnienia spoczynkowego p_0 (*lift off pressure*). Już sama budowa formuły określającej wskaźnik K_D , podobna do definicji współczynnika parcia bocznego w spoczynku świadczy o tym, że wskaźnik naprężenia bocznego jest wielkością odzwierciedlającą stan gruntu, w tym historię stanu naprężenia. Z kolei wielkości określające stan gruntu wykazują dobrą korelację z wytrzymałością, zwłaszcza gruntów spoistych odniesioną do warunków bez odpływu. W związku z powyższym, wskaźnik K_D jest podstawą wzorów do obliczania wskaźnika prekonsolidacji OCR, współczynnika parcia bocznego w spoczynku K_0 oraz wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu oznaczaną τ_{fu} lub c_u .

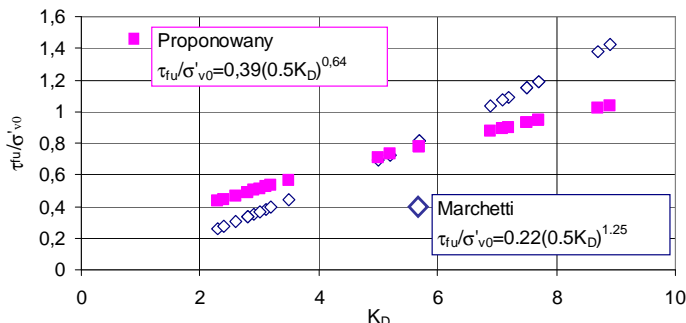
Oryginalna formuła przedstawiona przez Marchettiego [5] określająca znormalizowaną (ze względu na pionową składową naprężenia efektywnego) wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu ma następującą postać:

$$\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_{v0}} = 0,22(0,5K_D)^{1,25} \quad (1)$$

Korelacja wyników badań laboratoryjnych z wynikami pomiarów dylatometrycznych dla analogicznych wartości pionowej składowej naprężenia efektywnego przeprowadzona w ramach niniejszej pracy pozwoliła na wyprowadzenie analogicznej formuły w postaci:

$$\frac{\tau_{fu}}{\sigma'_{v0}} = 0,39(0,5K_D)^{0,64} \quad (2)$$

Porównując dwa wzory należy zauważyć, że proponowana formuła zawęża zakres zmienności znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie dla danego zakresu zmienności wskaźnika naprężenia bocznego K_D . W zakresie wartości wskaźnika $K_D < 5,5$ proponowany wzór dostarcza wyższych wartości wytrzymałości, natomiast dla wyższych wartości wskaźnika naprężenia bocznego, c_u/σ'_{v0} jest mniejsze niż wyliczone z formuły Marchettiego. Efekt ten jest spowodowany faktem, że badane grunty były silnie prekonsolidowane. Porównanie dwóch zależności przedstawiono na rysunku 4.

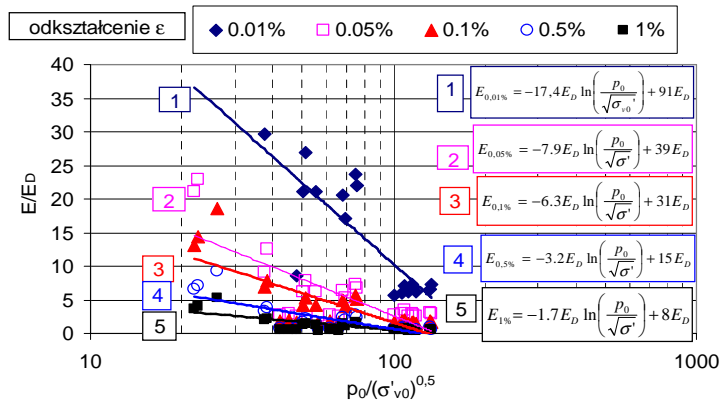


Rys. 4. Proponowana zależność znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu od wskaźnika naprężenia bocznego

Fig. 4. The new correlation proposed between normalized undrained shear strength and horizontal stress index

3.2. Moduł odkształcenia

Wartości modułu odkształcenia E w badaniach trójosiowych były odczytywane dla kilku charakterystycznych wartości odkształcenia pionowego tj. 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 oraz 1,0 %. Wyznaczenie wartości modułów odkształcenia dla różnych wartości naprężenia na koniec konsolidacji, w warunkach zadawania których materiał był ścinany, umożliwia skorelowanie tych modułów z wynikami badań dylatometrycznych. Według [6] szacowany zakres odkształceń postaciowych do których należy odnieść wyniki badań dylatometrycznych wynosi 0,05-0,1%, a zatem jest bardzo zbliżony do najczęściej spotykanych warunków pracy konstrukcji inżynierskich. Ze względu na fakt, że na wartość modułu największy wpływ ma stan naprężenia, rodzaj materiału i konsystencja w związku z tym do korelacji należy wykorzystać te wielkości mierzone podczas badania dylatometrycznego, które najbardziej odzwierciedlają wymienione wielkości i cechy. W tym przypadku należy sporządzić wykres na którym oś rzędnych będzie reprezentował stosunek modułu odkształcenia dla danego zakresu odkształcenia np. $E_{0,1\%}$ do określonego z badania DMT modułu dylatometrycznego E_D . Na osi odciętej natomiast należy odłożyć pomierzoną wartość p_0 odniesioną do składowej naprężenia pionowego od nadkładu dla jakiej został wykonany ten pomiar. Ze względu na fakt, że wpływ naprężenia pionowego uwzględnia się wykorzystując funkcję potęgową, oś pozioma wykresu powinna mieć wymiar $p_0/\sqrt{\sigma'_{v0}}$. Wykres taki, wykonany na podstawie analizy wyników badań trójosiowych i dylatometrycznych badanych gruntów przedstawiono na rysunku 5. Dla każdego zakresu odkształcenia przedstawiono linię która określa konserwatywną (mniejszą) wartość modułu odkształcenia E . Przyjęcie dolnego zakresu jako miarodajnego dla reprezentowania uzyskanych wyników ma tym silniejsze uzasadnienie im mniejszy jest zakres odkształcenia do którego odniesiony jest moduł. Przykładowo dla odkształcenia 10⁻²% wartości modułów mierzone co prawda w komorze z we-



Rys. 5. Proponowane relacje pomiędzy wynikami sondowania DMT a modulem odkształcenia E dla różnych zakresów odkształcenia

Fig. 5. Proposed relations between DMT results and deformation modulus E for various strain range

wewnętrznymi prętami łączącymi ale bez wewnątrzkomorowych czujników przemieszczeń nie są tak miarodajne jak dla większych zakresów odkształcenia. Formuły określające wartości modułów odkształcenia dla poszczególnych zakresów odkształcenia przedstawiono na rys. 5.

4. Podsumowanie i wnioski

Artykuł przedstawia przykład opracowania korelacji pomiędzy wynikami sondowań płaskim dylatometrem Marchettiego a wynikami badań trójosiowych przeprowadzonych na próbkach NNS silnie prekonsolidowanych gruntów spoistych o zróżnicowanej plastyczności. Najważniejsze ustalenia dokonane na podstawie badań są następujące:

- Ustalone korelacje pomiędzy badaniami trójosiowymi a sondowaniami płaskim dylatometrem Marchettiego dotyczą silnie prekonsolidowanych gruntów spoistych o zróżnicowanej plastyczności pobranych z podłoża II linii warszawskiego metra. Geneza, plastyczność i stan tych gruntów tworzą typowe warunki posadowienia jakie można spotkać na terenie Polski. Badane grunty to ility o zróżnicowanej plastyczności, które można podzielić na dwie grupy według wskaźnika plastyczności I_p :

$12,0 < I_p < 16,6\%$	$-0,11 < I_L < 0,09$	średnia $I_L = 0,02$
$36,1 < I_p < 66,5\%$	$-0,19 < I_L < -0,03$	średnia $I_L = -0,116$.
- Formuła określająca wytrzymałość w warunkach bez odplywu określona dla badanych gruntów dostarcza wyższych (w stosunku do wzoru Marchettiego) wartości znormalizowanej wytrzymałości c_u / σ'_{v0} w zakresie wskaźnika naprężenia bocznego $K_D < 5,5$. Dla wyższych wartości K_D , proponowany wzór określa niższe wartości niż formuła z 1980 roku.

- Przeprowadzone badania pozwoliły na wyprowadzenie formuł określających moduł odkształcenia E odpowiadający następującym zakresom odkształcenia pionowego 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 oraz 1,0 %. Należy wyraźnie podkreślić, że proponowane wzory należy stosować tylko w zakresie parametrów sondowania dla jakich zostały wyznaczone. Dotyczy to w największym stopniu wartości modułu E odpowiadającego odkształceniu 0,01%.

Literatura

- [1] Baldi G., Bellotti R., Ghionna V.N., Jamiolkowski M., and Lo Presti D.C.: Modulus of Sands from CPT's and DMT's, Paper to the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 1989, pp. 165-170.
- [2] Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellota R., and Pasqualini E.: New correlations of penetrations tests for design practice, Proceedings of the 1st international Symposium on Penetration testing, ISOPT-1, Orlando Florida, Vol. 1, 1988, pp. 263-296.
- [3] Lipiński M.J.: Wykorzystanie dylatometu do wyznaczenia parametrów gruntowych dla potrzeb projektowania, X Krajowa konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, tom II, 1993, 163-169.
- [4] Lipiński M.J.: Wdrożenie do bieżącej eksploatacji ruchowej dylatometu Marchettiego. Raport GEOTEKO Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., 1993.
- [5] Marchetti S., Crapps D.K.: Flat Dilatometer Manual. Internal report of GPE Inc., distributed to purchasers of the DMT equipment, 1981.
- [6] Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D.: In situ tests by seismic dilatometer (SDMT). Proceedings from research to practice in geotechnical engineering. Geotechnical Special publication No. 180:292-311 (book honoring J.H. Schmertmann), 2008.
- [7] Schmertmann J.H.: Suggested method for performing the Flat Dilatometer Test. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 9, No. 2, 1986, 93-101.
- [8] Szczypior J.: Określanie wybranych parametrów geotechnicznych gruntów spoiстых na podstawie sondowań statycznych. Praca magisterska pod kierunkiem M. Lipińskiego. Katedra Geoinżynierii SGGW, 2004.

DMT BASED NEW FORMULAE FOR SHEAR STRENGTH AND STIFFNESS EVALUATION IN HEAVY OVERCONSOLIDATED COHESIVE SOILS

Summary

Wide use of Marchetti flat dilatometer tests in various geological conditions requires verification or adjustment of formulae for evaluation of geotechnical parameters. In area of Poland, due to past glaciation, complex geological conditions are encountered, very often with heavy overconsolidated soils. The paper describes example of correlations of DMT results with shear strength and stiffness parameters determined on the basis of triaxial tests TXCIU carried out on heavy overconsolidated low and high plasticity clays. It is worth to emphasize that derived formulae for stiffness determination make possible to evaluate deformation moduli E for various strain range 0.01-1%.

Keywords: DMT, new formulae, heavy overconsolidated cohesive soils, shear strength, stiffness, strain range

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/tb.2016.63