

## WSKAŹNIK KRZYWIZNY UZIARNIENIA A PARAMETRY ZAGĘSZCZALNOŚCI GRUNTÓW NIESPOISTYCH O DWUMODALNYCH ROZKŁADACH UZIARNIENIA

Marek A. Patakiewicz<sup>\*</sup>, Katarzyna Zabielska-Adamska<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>GEOTOR Firma Usług Geotechnicznych, Warszawa

<sup>\*\*</sup>Politechnika Białostocka, Białystok

**Streszczenie.** W artykule przeprowadzono analizę wpływu uziarnienia gruntów niespoistych o nieciągłych (dwumodalnych) rozkładach uziarnienia na ich zagęszczalność. Zdolność do zagęszczania gruntów niespoistych zwykle oceniana jest na podstawie wskaźnika jednorodności uziarnienia ( $C_U$ ) lub łącznie na podstawie dwóch wskaźników uziarnienia –  $C_U$  i wskaźnika krzywizny uziarnienia ( $C_C$ ). W przypadku gruntów o nieciągłych rozkładach uziarnienia wartości wskaźnika  $C_C$  przeważnie są mniejsze od 0,5. Grunty te klasyfikowane są poza grupą gruntów dobrze zagęszczalnych – jako grunty źle uziarnione. Wyniki analiz prowadzonych z wykorzystaniem wskaźnika kształtu krzywej zagęszczalności ( $IC$ ) wskazują, iż grunty o nieciągłych rozkładach uziarnienia – mimo niskich wskaźników krzywizny uziarnienia ( $C_C$ ) – mogą być uważane jako grunty dobrze zagęszczalne.

**Słowa kluczowe:** zagęszczalność, parametry zagęszczalności, wskaźnik krzywizny uziarnienia, wskaźnik zagęszczalności ( $IC$ ), rozkład uziarnienia, nieciągłe uziarnienie

### WSTĘP

Miarą właściwego zagęszczenia gruntu w budowlę ziemnej jest wskaźnik zagęszczenia ( $I_s$ ) określony wzorem:

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntu zagęszczonego w nasypie,  
 $\rho_{d \max}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu tego gruntu określona laboratoryjnie przy wilgotności optymalnej ( $w_{opt}$ ), najczęściej metodą Proctora.

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ( $\rho_{d\max}$ ) oraz wilgotność optymalna ( $w_{\text{opt}}$ ) są nazywane parametrami zagęszczalności.

Na parametry zagęszczalności gruntów niespoistych istotny wpływ ma uziarnienie gruntu. Uziarnienie jest też jednym z podstawowych kryteriów sedymentologicznej klasyfikacji osadów okruczowo-ilastych. Wyniki analiz uziarnienia pozwalają wnioskować o środowisku, w jakim formował się dany grunt (osad), o warunkach jego transportu i depozycji. Zróżnicowanie granulometrii gruntów, będące wynikiem różnorodnych procesów, którym poddawany był sedymentowany materiał gruntowy, może być opisywane za pomocą szeregu wskaźników uziarnienia. Zdolność do zagęszczania gruntów niespoistych oceniana jest na podstawie wartości wskaźnika jednorodności uziarnienia ( $C_U$ ) lub łącznie – na podstawie wartości wskaźników: jednorodności ( $C_U$ ) i krzywizny uziarnienia ( $C_C$ ). Wprowadzenie Eurokodu 7 [PN-EN 1997-2:2009] oraz norm dotyczących zasad klasyfikowania gruntów [PN-EN ISO 14688-1:2006, PN-EN ISO 14688-2:2006, PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012] nie wpłynęło na zmianę sposobu obliczeń wskaźników uziarnienia, jak również nie wprowadziło do praktyki badań geotechnicznych nowych wskaźników.

Wskaźnik jednorodności uziarnienia ( $C_U$  – Hazena) jest powszechnie stosowany w geotechnice jako kryterium oceny zdolności gruntu do zagęszczania i przydatności do budowy nasypów [PN-S-02205:1998, Warunki techniczne... 2009]. Wskaźnik ten opisywany jest wzorem:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2)$$

gdzie:  $d_{60}$ ,  $d_{10}$  – średnice ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio 60% i 10% masy badanej próbki gruntu.

Wskaźnik krzywizny uziarnienia ( $C_C$ ), stosowany w geotechnice do oceny zdolności gruntu do zagęszczania, w połączeniu ze wskaźnikiem  $C_U$  wyliczany jest ze wzoru:

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (3)$$

gdzie:  $d_{30}$  – średnica ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią 30% masy badanej próbki gruntu.

Celem artykułu było pokazanie, że grunty o dwumodalnych rozkładach uziarnienia i niskich wskaźnikach krzywizny uziarnienia ( $C_C < 1,00$ ) nie zawsze powinny być traktowane jako grunty źle uziarnione, charakteryzujące się słabą zagęszczalnością.

## KLASYFIKACJA ZAGĘSZCZALNOŚCI GRUNTÓW NA PODSTAWIE WSKAŹNIKÓW UZIARNIENIA

Według klasycznego podziału grunty mineralne dzielą się ze względu na wartość  $C_U$  na: równoziarniste ( $C_U < 5$ ), różnoziarniste –  $5 \leq C_U \leq 15$  i bardzo różnoziarniste ( $C_U > 15$ ) [Wiłun 1987].

Według PN-EN 1997-2:2009 grunty gruboziarniste dzielą się na źle uziarnione ( $C_U \leq 6$ ) oraz dobrze uziarnione ( $6 \leq C_U \leq 15$ ). Piaski są źle uziarnione, jeśli  $C_U \leq 3$ , i dobrze uziarnione, jeśli  $C_U > 6$ . W normie PN-EN ISO 14688-2:2006 wyróżnione zostały grunty: dobrze uziarnione, słabo uziarnione oraz źle uziarnione, a normowy podział gruntów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka uziarnienia gruntów na podstawie PN-EN ISO 14688-2:2006  
Table 1. Soil graining characteristics in accordance with PN-EN ISO 14688-2:2006

Charakterystyka uziarnienia Graining characteristics	$C_U$	$C_C$
Grunt wielofrakcyjny Multi-fraction soil	$> 15$	1-3
Grunt średnioziarniony (kilkufrakcyjny) <sup>a</sup> Average graded soil (some-fraction) <sup>a</sup>	6–15	$< 1$
Grunt równomiernie uziarniony (jednofrakcyjne) <sup>a</sup> Uniform soil (uni-fraction) <sup>a</sup>	$< 6$	$< 1$
Grunt o nieciągłym uziarnieniu (źle uziarniony) <sup>a</sup> Gap graded soil (poorly graded) <sup>a</sup>	zwykle wysoki usually high	różny (przeważnie $< 0,5$ ) various (mostly $< 0.5$ )

<sup>a</sup>Określenia używane w PN-EN ISO 14688-2:2006 do czasu wprowadzania poprawki PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012, tj. do dnia 14.11.2012 r. – Terms used in PN-EN ISO 14688-2:2006 until such time as PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 has been introduced, i.e. until 14 November 2012.

W literaturze przyjmuje się, że grunt niespoisty jest dobrze uziarniony (łatwo zagęszczalny, a tym samym przydatny do budowy nasypów), jeżeli  $C_C = 1-3$ , a  $C_U > 4$  dla żwirów lub  $C_U > 6$  dla piasków [ASTM D 2487-06, Czyżewski i in. 1973, Field Manual 1997, Sivakugan i Das 2010]. Według PN-S-02205:1998 grunty o wskaźniku  $C_U > 3$  traktuje się jako grunty przydatne do wbudowania w nasyp, a grunty o mniejszych wartościach  $C_U$  mogą być stosowane warunkowo. Warunki techniczne [2009] określają, że uziarnienie gruntu przeznaczonego do wbudowania w warstwy ochronne nowo budowanych dróg kolejowych o prędkości maksymalnej pociągów 160–250 km·h<sup>-1</sup> powinno spełniać warunek  $C_C = 1-3$ .

W przypadku gruntów o nieciągłych rozkładach uziarnienia wartości wskaźnika  $C_C$  przeważnie są mniejsze od 0,5 [PN-EN ISO 14688-2:2006, Ismail 2008]. Grunty te w świetle normy PN-EN ISO 14688-2:2006 oraz dotychczas stosowanych zasad sytuowane są poza grupą gruntów dobrze zagęszczalnych – jako grunty źle uziarnione. Arceement i Wright [2001] podają, iż wskaźnik  $C_C$  może zmieniać się w przedziale od 0,4 do 6,7. Według Ismaila [2008] większość „dobrze uziarnionych” gruntów ( $C_U > 5$ ) charakteryzuje się wskaźnikiem  $C_C = 0,5-2,0$ , natomiast wskaźnik  $C_C < 0,5$  może wskazywać na nieciągłe uziarnienie gruntu.

## OPIS BADANYCH GRUNTÓW

Badania prowadzono na gruntach mineralnych niespoistych ( $I_{om} < 2\%$ ), o uziarnieniu pospółki według PN-86/B-02480, pochodzących z obszaru Polski. W świetle wymagań

normy PN-S-02205:1998 były to grunty przydatne do budowy nasypów ( $C_U > 3,0$ ). Grunty oznaczono jako obiekty badawcze – identyfikowane poprzez miejsce pobrania gruntu. Według normy PN-EN ISO 14688-2:2006 badane grunty określono jako średnioziarnione (kilkufrakcyjne) oraz o nieciągłym uziarnieniu (źle uziarnione), a ich charakterystykę przedstawiono w tabeli 2. Wśród analizowanych zbiorów danych nie stwierdzono występowania gruntów niespoistych, które swoimi parametrami uziarnienia, według kryteriów PN-EN ISO 14688-2:2006, odpowiadają gruboziarnistym gruntom wielofrakcyjnym (tj. o wskaźnikach uziarnienia  $C_U > 15$  i  $C_C = 1-3$ ).

Tabela 2. Parametry uziarnienia i zagęszczalności analizowanych gruntów niespoistych o jedno- i dwumodalnych rozkładach uziarnienia

Table 2. Graining and compaction parameters of analyzed non-cohesive soils with unimodal and bimodal grain-size distribution

Nazwa obiektu badawczego Designation of the research object	Symbol gruntu Soil symbol	Rozkład uziarnienia Grain-size distribution	$\rho_{d \max}$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	$w_{\text{opt}}$ [%]	$C_U$	$C_C$
Dębinki	Po	B	1,963	8,9	4,18	0,78
Rudno Jeziorowe przeróbka (1)	Po	B	1,876	10,5	2,92	0,88
Rudno Jeziorowe przeróbka (2)	Po	B	1,893	10,1	3,35	0,85
Skorosze	Po	B	1,930	8,7	3,72	0,90
Zakręt	Po	C	1,997	9,4	6,30	1,00
Annopol	Po	A	1,971	10,6	5,10	1,60
Nowy Dwór Mazowiecki	Po	A	1,986	8,8	6,10	0,65
Rudno Jeziorowe kopalnia (1)	Po	A	2,071	7,3	10,45	0,39
Rudno Jeziorowe kopalnia (2)	Po	A	2,085	5,8	14,96	0,38
Rudno Jeziorowe kopalnia (3)	Po	A	2,101	5,6	10,31	0,51
Rudno Jeziorowe kopalnia (4)	Po	A	2,105	6,3	11,59	0,44
Rudno Jeziorowe kopalnia (5)	Po	A	2,111	6,0	12,71	0,41

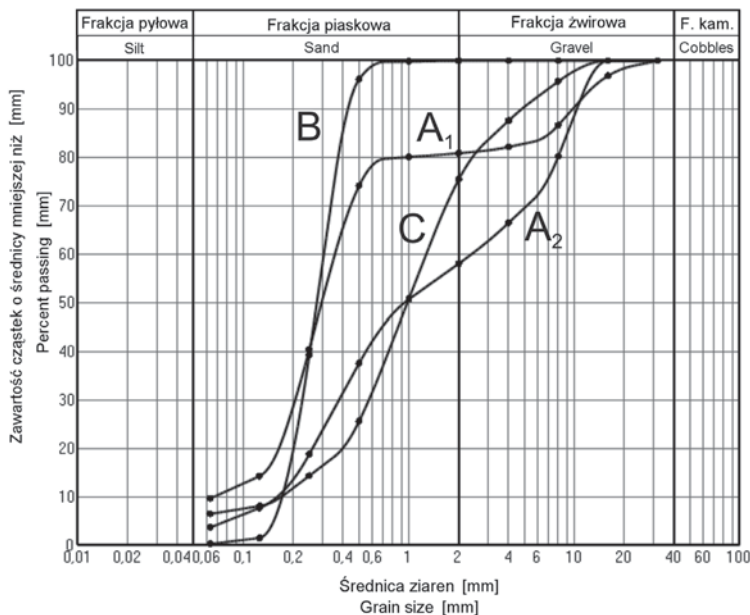
Objaśnienia: A – grunty o nieciągłym uziarnieniu (rozkład dwumodalny), B – grunt równomiernie uziarniony (rozkład jednomodalny), C – grunt średnioziarniony (rozkład jednomodalny).

Explanations: A – gap graded soils (bimodal grain-size distribution), B – uniform soil (unimodal grain-size distribution), C – average graded soil (unimodal grain-size distribution).

## ROZKŁAD UZIARNIENIA BADANYCH GRUNTÓW

Analiza uziarnienia pozwala określić zawartość poszczególnych frakcji w badanym gruncie, podaje też informację odnośnie do typu rozkładu uziarnienia. Uziarnienie gruntu może mieć rozkład jedno- lub wielomodalny. Rozkład jednomodalny może wskazywać na środowisko jednorodne pod względem materiału wejściowego lub na stałość warunków procesu osadotwórczego [Racinowski i in. 2001]. Uziarnienie o rozkładzie wielomodalnym może wskazywać na zmienność dynamiki warunków środowiskowych w trakcie osadzania gruntu lub na zróżnicowanie litologiczne złoża i przemieszanie gruntu w kopalni w trakcie procesu eksploatacji.

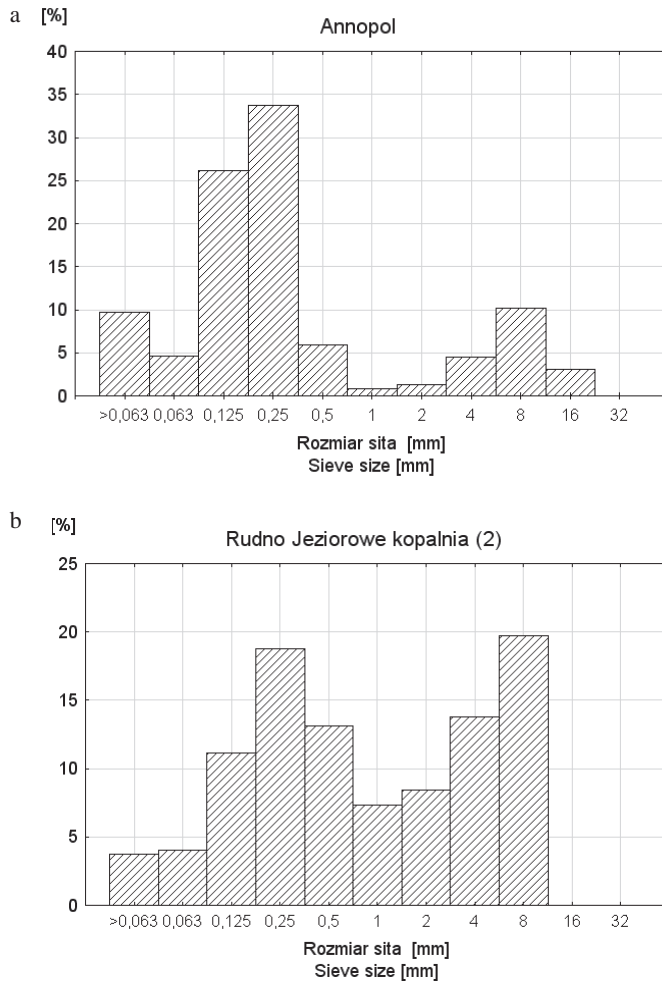
Przykłady krzywych uziarnienia gruntów niespoistych o zróżnicowanych charakterystykach uziarnienia przedstawiono na rysunku 1. Histogramy rozkładu uziarnienia, odpowiadające poszczególnym krzywym uziarnienia, przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Dla prezentowanych gruntów obliczono wartości średnic miarodajnych  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  oraz wskaźniki uziarnienia  $C_C$  i  $C_U$ , które przedstawiono w tabeli 3. Oprócz badanych pospółek na rysunkach 1 i 3 pokazano krzywą uziarnienia i histogram gruntu równomiernie uziarnionego – piasku aluwialnego z Białoleki, oraz gruntu średniouziarnionego – pospółki z Rudna Jeziorowego. Symbolami  $A_1$ - $A_2$  oznaczono grunty o nieciągłym uziarnieniu, symbolem B – grunt równomiernie uziarniony, a symbolem C – grunt średniouziarniony.



Rys. 1. Krzywe uziarnienia: pospółka z Annapola (grunt o nieciągłym uziarnieniu –  $A_1$ ), pospółka z Rudna Jeziorowego kopalni 1 (grunt o nieciągłym uziarnieniu –  $A_2$ ), piasek aluwialny z Białoleki (grunt równomiernie uziarniony – B), pospółka z Rudna Jeziorowego (grunt średniouziarniony – C)

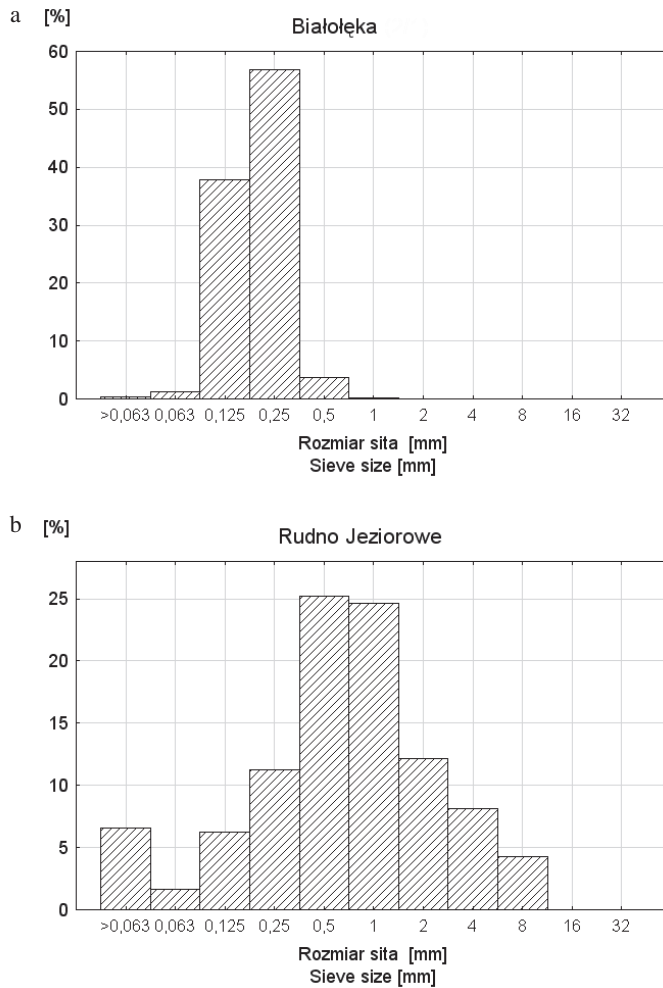
Fig. 1. Grain-size distribution curve: gravel and sand mix from Annapol (soil with discontinuous distribution –  $A_1$ ), gravel and sand mix from Rudno Jeziorowe kopalnia 1 (soil with discontinuous distribution –  $A_2$ ), alluvial sand from Białoleka (uniformly graining soil – B), gravel and sand mix from Rudno Jeziorowe (soil with average graining – C)

Grunty o dwumodalnych rozkładach uziarnienia należy postrzegać jako mieszanki dwóch gruntów podstawowych, przy czym proporcje poszczególnych frakcji mogą być zróżnicowane (rys. 2). Dla gruntów o większej zawartości frakcji żwirowej wzrasta wartość średnicy zastępczej  $d_{60}$ , wpływając na wzrost wartości wskaźnika  $C_U$  i jednocześnie zmniejszanie się wartości wskaźnika  $C_C$  (rys. 2 – grunt o krzywej  $A_2$ ).



Rys. 2. Histogramy uziarnienia gruntu o uziarnieniu nieciągłym (rozkład dwumodalny): a – pospółka z Annopola – A<sub>1</sub>, b – pospółka z Rudna Jeziorowego kopalni (2) – A<sub>2</sub>

Fig. 2. Soil graining (histogram) with discontinuous (bimodal) grain-size distribution: a – gravel and sand mix from Annopol – A<sub>1</sub>, b – gravel and sand mix from Rudno Jeziorowe kopalnia (2) – A<sub>2</sub>



Rys. 3. Histogramy uziarnienia gruntu równomiernie i średniuziarnionego (rozkład jednomodalny): a – piasek aluwialny z Białoleki (grunt równomiernie uziarniony) – B, b – pospółka z Rudna Jeziorowego (grunt średniuziarniony) – C

Fig. 3. Soil graining (histogram) with uniformly and average graining (unimodal grain-size distribution): a – alluvial sand from Białoleka (uniformly grained soil) – B, b – gravel and sand mix from Rudno Jeziorowe (average grained soil) – C

Tabela 3. Średnice zastępcze i wskaźniki uziarnienia dla gruntów o zróżnicowanych charakterystykach krzywych uziarnienia

Table 3. Effective diameters and graining coefficients for silos with varied characteristics of grain-size distribution curves.

Nazwa obiektu badawczego Designation of the research object	Rodzaj gruntu Type of soil	Rozkład uziarnienia (rys. 1) Grain-size distribution (Fig. 1)	Średnice zastępcze [mm] Effective sizes [mm]			Parametry uziarnienia Graining parameters	
			$d_{10}$ $D_{10}$	$d_{30}$ $D_{30}$	$d_{60}$ $D_{60}$	$C_U$	$C_C$
Annopol	Po	A <sub>1</sub>	0,07	0,20	0,36	5,1	1,6
Rudno Jeziorowe kopalnia (2)	Po	A <sub>2</sub>	0,16	0,38	2,38	15,0	0,4
Białoleka	Ps	B	0,17	0,23	0,31	1,8	1,0
Rudno Jeziorowe	Po	C	0,17	0,57	1,27	7,5	1,5

Grunty niespoiste o dwumodalnych rozkładach uziarnienia zastosowane w budownictwie ziemnym pozwalają na uzyskanie bardzo dobrych zagęszczeń. Przykładem może być podłoże nasypowe pod budowaną halą w Nowym Dworze Mazowieckim, gdzie dla zagęszczanej pospółki o dwumodalnym rozkładzie uziarnienia (Nowy Dwór Mazowiecki – tab. 2 i 5) we wszystkich punktach badawczych uzyskano wskaźnik zagęszczenia  $I_s > 1,03$ .

### ANALIZA WSKAŹNIKA KSZTAŁTU KRZYWEJ ZAGĘSZCZALNOŚCI

Wskaźnik zagęszczalności ( $IC$ ) jest parametrem stworzonym przez Patakiewicza [2012, 2013], jako wskaźnik kształtu krzywej zagęszczalności. Jest to wielkość niemiarowana, obliczana według wzoru:

$$IC = \operatorname{tg} \alpha_z = \frac{\rho_{d \max} - \rho_{d 0,5w_{\text{opt}}}}{w_{\text{opt}} - w_{0,5w_{\text{opt}}}} \quad (4)$$

gdzie:  $\alpha_z$  – kąt nachylenia krzywej zagęszczalności po stronie „suchej”,

$\rho_{d 0,5w_{\text{opt}}}$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego odczytana z wykresu zagęszczalności gruntu  $\rho_d = f(w)$  przy wilgotności równej 1/2 wilgotności optymalnej,

$w_{0,5w_{\text{opt}}}$  – wilgotność równa 1/2 wilgotności optymalnej,

$\rho_{d \max}$  – maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego oznaczana metodą standardową Proctora,

$w_{\text{opt}}$  – wilgotność optymalna w postaci bezwymiarowej.

Wskaźnik zagęszczalności ( $IC$ ) posłużył jako parametr do propozycji nowej klasyfikacji gruntów pod względem zagęszczalności [Patakiewicz 2012, 2013], którą pokazano w tabeli 4.



Tabela 4. Klasyfikacja gruntów niespoistych pod względem zagęszczalności według Patakiewicza [2012, 2013]

Table 4. The Patakiewicz classification of non-cohesive soils in terms of compactibility [2012, 2013]

Kategoria gruntu Soil category	Wskaźnik zagęszczalności ( <i>IC</i> ) Compaction index ( <i>IC</i> )	Pochylenie krzywej zagęszczalności ( $\alpha_z$ ) Compaction curve slope ( $\alpha_z$ )
Grнты niezagęszczone i źle zagęszczone Non-compacted and poorly compacted soils	< 0,6	< 30°
Grнты trudno zagęszczone Hard compacted soils	0,6–0,8	30°–40°
Grнты zagęszczone Compacted soils	0,8–1,2	40°–50°
Grнты bardzo dobrze zagęszczone Very well compacted soils	> 1,2	> 50°

Na podstawie wykresów zagęszczalności dla każdego z badanych gruntów, oprócz parametrów zagęszczalności  $\rho_{d\max}$  i  $w_{\text{opt}}$ , określono wskaźnik zagęszczalności (*IC*) oraz współczynnik determinacji  $R^2$  obliczany dla sprawdzenia liniowości położenia punktów pomiarowych po stronie „suchej” krzywej zagęszczalności  $\rho_d(w)$ .

Tabela 5. Wskaźniki uziarnienia i wskaźnik kształtu krzywej zagęszczalności analizowanych gruntów niespoistych o jedno- i dwumodalnych rozkładach uziarnienia

Table 5. Graining coefficients and index of compaction curve shape analyzed non-cohesive soils with unimodal and bimodal grain-size distributions

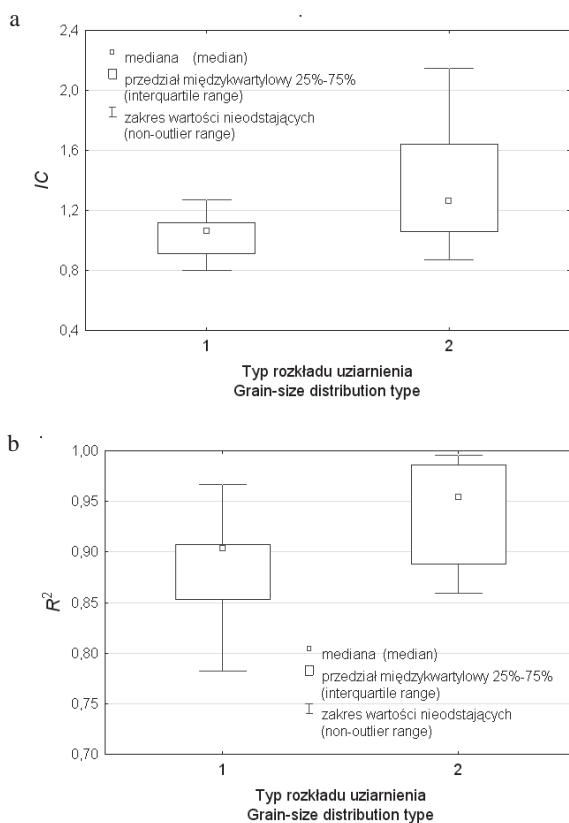
Nazwa obiektu badawczego Designation of the research object	Rozkład uziarnienia Grain-size distribution	$C_U$	$C_C$	<i>IC</i>	$R^2$
Dębinki	B	4,18	0,78	1,27	0,782
Rudno Jeziorowe przeróbka (1)	B	2,92	0,88	1,06	0,903
Rudno Jeziorowe przeróbka (2)	B	3,35	0,85	0,80	0,907
Skorosze	B	3,72	0,90	1,12	0,967
Zakręt	C	6,3	1,0	0,91	0,853
Annopol	A	5,1	1,6	1,19	0,986
Nowy Dwór Mazowiecki	A	6,1	0,65	1,26	0,859
Rudno Jeziorowe kopalnia (1)	A	10,45	0,39	1,19	0,888
Rudno Jeziorowe kopalnia (2)	A	14,96	0,38	1,48	0,954
Rudno Jeziorowe kopalnia (3)	A	10,31	0,51	1,64	0,996
Rudno Jeziorowe kopalnia (4)	A	11,59	0,44	1,06	0,971
Rudno Jeziorowe kopalnia (5)	A	12,71	0,41	0,87	0,936

Objaśnienia: A – grнты o nieciągłym uziarnieniu (rozkład dwumodalny), B – grunt równomiernie uziarniony (rozkład jednomodalny), C – grunt średniouziarniony (rozkład jednomodalny)

Explanations: A – gap graded soils (bimodal grain-size distribution), B – uniform soil (unimodal grain-size distribution), C – average graded soil (unimodal grain-size distribution)

Wszystkie analizowane grunty o uziarnieniu pospółek, klasyfikowane według wartości wskaźnika zagęszczalności ( $IC$ ), były gruntami zagęszczalnymi ( $IC = 0,8-1,2$ ) i bardzo dobrze zagęszczalnymi ( $IC > 1,2$ ), co pokazano na rysunku 4.

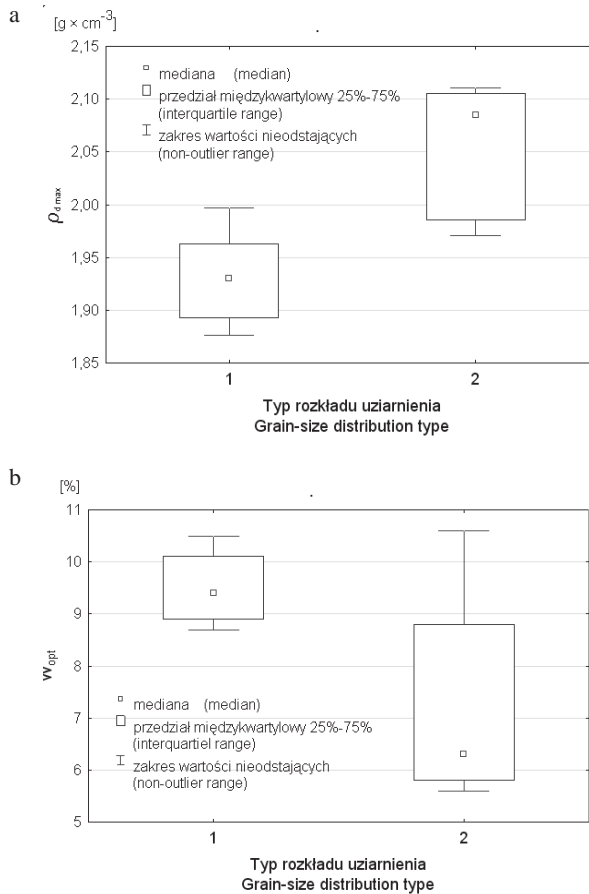
Liniowość (regularność) przebiegu krzywej zagęszczalności po stronie „suchej” charakteryzowano na podstawie współczynnika determinacji ( $R^2$ ) obliczanego z punktów pomiarowych budujących krzywą zagęszczalności po stronie „suchej”. Niezależnie od typu charakterystyki uziarnienia (rozkład jedno- lub dwumodalny) grunty w obu analizowanych grupach charakteryzowały się liniowym przebiegiem wykresu zagęszczalności po stronie „suchej”, przy czym bardziej regularnym (liniowym) przebiegiem „suchego” odcinka krzywej zagęszczalności charakteryzowały się grunty o rozkładzie dwumodalnym (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie zakresów zmienności wartości dla gruntów niespoistych o rozkładach uziarnienia jednomodalnych (1) i dwumodalnych (2): a – wskaźnika zagęszczalności ( $IC$ ), b – współczynnika determinacji ( $R^2$ )

Fig. 4. Comparison of result variability ranges for non-cohesive soils with unimodal grain-size distribution (1) and bimodal grain-size distribution (2): a – index of compaction ( $IC$ ), b – determination coefficient ( $R^2$ )

Na rysunku 5 porównano pami zbiory parametrów zagęszczalności ( $\rho_{d\max}$  i  $w_{\text{opt}}$ ) dla gruntów o jedno- i dwumodalnych rozkładach uziarnienia. Grunty o dwumodalnych rozkładach uziarnienia charakteryzowały się większymi wartościami  $\rho_{d\max}$  oraz mniejszymi wartościami  $w_{\text{opt}}$ . W odniesieniu do gruntów o jednomodalnych rozkładach uziarnienia zakres zmienności parametrów zagęszczalności ( $\rho_{d\max}$  i  $w_{\text{opt}}$ ) dla gruntów o dwumodalnych rozkładach uziarnienia był większy.



Rys. 5. Porównanie zakresów zmienności parametrów zagęszczalności dla gruntów niespoistych o rozkładach uziarnienia jednomodalnych (1) i dwumodalnych (2): a – maksymalnej gęstości objętościowej, b – wilgotności optymalnej

Fig. 5. Comparison of compaction parameter variability ranges for non-cohesive soils with unimodal grain-size distribution (1) and bimodal grain-size distribution (2): a – maximum dry density, b – optimum water content

## WNIOSKI

1. Grunty o nieciągłym uziarnieniu należy postrzegać jako grunty o wielomodalnych rozkładach uziarnienia, składające się z mieszaniny kilku (najczęściej dwóch) gruntów podstawowych. We wszystkich analizowanych przypadkach grunty o wielomodalnych rozkładach uziarnienia charakteryzowały się rozkładami dwumodalnymi.

2. W porównaniu z grupą gruntów o jednomodalnych rozkładach uziarnienia grupa gruntów o rozkładach dwumodalnych w żadnym z analizowanych parametrów nie odbiega *in minus* od gruntów o rozkładach jednomodalnych. W świetle wykonanych analiz grunty o rozkładach dwumodalnych są gruntami dobrze zagęszczalnymi i przydatnymi do realizacji budowy ziemnych, mimo przeważnie małych ( $0,38 < C_C < 0,65$ ) wartości wskaźnika krzywizny uziarnienia. Dlatego wartość wskaźnika  $C_C$  nie powinna w sposób automatyczny dyskwalifikować gruntu pod względem jego zagęszczalności i przydatności w budownictwie ziemnym.

3. Oceniając przydatność gruntów niespoistych do zagęszczania, wskazane jest uwzględnienie parametrów bezpośrednio opisujących kształt krzywej zagęszczalności i charakteryzujących przebieg zagęszczania metodą Proctora. Takim parametrem jest wskaźnik zagęszczalności ( $IC$ ).

4. W toku dalszych prac planowane jest poszerzenie bazy danych dotyczących różnowiekowych gruntów niespoistych pochodzących z terenów Polski. Na podstawie poszerzonej bazy danych można będzie w przyszłości przeprowadzić analizę dotyczącą osiąganych wartości wskaźników  $C_C$  i  $C_U$  dla gruntów mineralnych występujących w Polsce i obecnie stosowanych w budownictwie ziemnym, z odniesieniem do poszerzonego zakresu parametrów opisujących zagęszczalność gruntów.

## PIŚMIENNICTWO

- Arcement B.J., Wright S.G., 2001. Evaluation of laboratory compaction procedures for specification of densities for compacting fine sands. Research Report 1875-1. Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin.
- ASTM D 2487-06 Standard practice for classification of soils for engineering purposes.
- Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A., 1973. Zapory ziemne. Arkady, Warszawa.
- Field Manual 5-410, 1997. Military soils engineering. U.S. Army, Headquarters Department of the Army, Washington, D.C.
- Ismail M., 2008. Mathematical correlations between the effective diameter of soil and other properties. Engineering and Technology 26 (10), 1274–1281.
- Patakiewicz M., 2012. Zastosowanie wskaźników krzywej zagęszczalności jako charakterystyk zagęszczalności gruntów niespoistych. Inżynieria Morska i Geotechnika 4, 366–370.
- Patakiewicz M., 2013. Wpływ wskaźników sedymentologicznych uziarnienia na parametry zagęszczalności gruntu. Praca doktorska. Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Białystok.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7. Projektowanie Geotechniczne. Część 2 – Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1:2006: Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1 – Oznaczanie, opis (ISO 14688–1:2006).

- PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2 – Zasady klasyfikowania (ISO 14688–2:2006).
- PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2 – Zasady klasyfikowania (ISO 14688–2:2006).
- PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- Racinowski R., Szczypek T., Wach J., 2001. Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia osadów czwartorzędowych. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Sivakugan N., Das B.M., 2010. Geotechnical engineering: a practical problem solving approach. Ross Publishing, J. Ross Publishing Inc., Florida.
- Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego Id-3, 2009. Załącznik do zarządzenia Nr 9/2009 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 4 maja 2009 r.
- Wiłun Z., 1987. Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa.

## COEFFICIENT OF CURVATURE AND COMPACTION PARAMETERS FOR NON-COHESIVE SOILS WITH BIMODAL GRAIN SIZE DISTRIBUTION

**Abstract.** The impact of non-cohesive soil grading with bimodal grain-size distribution on its compaction was analyzed in the paper. Ability to compaction of non-cohesive soils is usually estimated on the basis of coefficient of uniformity ( $C_U$ ) or jointly two grading coefficients –  $C_U$  and coefficient of curvature ( $C_C$ ). In the case of soils with discontinuous grain-size distribution values of coefficient of curvature  $C_C$  are more often lower than 0.5. Those soils are classified outside the well-compacted soils, as poorly graded soils. Results of the analyses carried out with the index of compaction curve shape  $IC$  indicate that soils with discontinuous grain-size distribution – despite the low values of coefficient of curvature ( $C_C$ ) – can be considered as well-compacted soils.

**Key words:** compactibility, compaction parameters, coefficient of curvature, index of compaction ( $IC$ ), grain size distribution, discontinuous grading

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.07.2013