

**Artur Kieszek**✉

Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie

## Próba obliczenia właściwości mechanicznych gruntów małospoistych stabilizowanych granulometrycznie nawierzchni szlaków turystycznych

**Streszczenie.** Celem artykułu jest wykazanie zależności pomiędzy właściwościami mechanicznymi mieszanek gruntowych nawierzchni szlaków turystycznych a ich właściwościami fizycznymi, takimi jak: porowatość, wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia i wskaźnik grupowy szkieletu gruntowego. Badania wykazały, że obliczone właściwości mechaniczne mieszanek gruntowych odwzorowują wielkości liczbowe uzyskanych danych empirycznych z badań w przedziale od 1 do 17%. W artykule opisano wyłącznie właściwości mechaniczne trzech mieszanek gruntowych o optymalnym stopniu uziarnienia przy określonych właściwościach fizycznych. Należy zauważyć, że uzyskane teoretyczne rezultaty funkcji wytrzymałości mechanicznej mogą być wykorzystywane do pilotażowych badań nośności nawierzchni z mieszanek gruntowych, pośrednio mogą przyczyniać się do zminimalizowania zakresu i skrócenia czasu badań laboratoryjno-terenowych.

**Słowa kluczowe:** funkcja wielomianowa, funkcja regresji, korelacja, właściwości mechaniczne, właściwości fizyczne, stabilizacja granulometryczna

### Wstęp

Nawierzchnie gruntowe szlaków turystycznych stabilizowanych granulometrycznie powinny charakteryzować się dobrymi właściwościami mechanicznymi i techniczno-eksploatacyjnymi. W przypadku niestabilizowanych granulometrycznie nawierzchni gruntowych szlaków turystycznych znajdujących się na gruntach piaszczystych górne warstwy przesuszone lub przesiąknięte wodą pod wpływem obciążeń spowodowanych ruchem turystycznym ulegają odkształceniom i przemieszczeniom. Inaczej zachowują się nawierzchnie znajdujące się na gruntach spoistych – w czasie suszy wykazują dużą wytrzymałość mechaniczną, ale w przypadku zwiększonego opadu pionowego ulegają uplastycznieniu i tracą swoją pierwotną nośność. Stabilizacji tej nie należy jednak stosować na podłożu spoistym, ponieważ nie jest możliwe jego rozdrobnienie

i wymieszanie „stabilizatora” z gruntem podłoża. Nawierzchnie szlaków na gruntach mało spoiistych charakteryzują się właściwościami pośrednimi między gruntami sypkimi i spoiistymi, są mało odporne na przemieszczanie się turystów w czasie zmiennych warunków klimatycznych. Może zatem zachodzić uzasadniona potrzeba ulepszenia tych nawierzchni z zastosowaniem stabilizacji granulometrycznej jako metody dającej możliwość zwiększenia właściwości mechanicznych i techniczno-eksploatacyjnych (Kieszek, 2022).

Wyniki stabilizacji granulometrycznej mierzone są właściwościami mechanicznymi mieszanek gruntowych – gruntów, które są uzależnione od właściwości fizycznych szkieletów gruntowych, takich jak: różnoziarnistości uziarnienia gruntu ( $U$ ), porowatości gruntu ( $n$ ) i wilgotności ( $W$ ). Należy zaznaczyć, że właściwości mechaniczne są funkcją szkieletu gruntowego, którą możemy wyrazić następująco:

$$R = f(\text{szk.}) = f(U, \rho_{ds}, W) = f(U, n, W)$$

W praktyce badanie właściwości mechanicznych szkieletów mieszanek gruntowych polega na pomiarze oporu gruntu na odkształcenia aparatem *CBR* w laboratorium i modułu nośności  $E$  płytą w terenie przy określonych parametrach fizycznych. Wielkości fizyczne wykonuje się w laboratorium, w tym gęstości objętościowe szkieletu ( $\rho_{ds}$ ) i wilgotności optymalne ( $W_{opt.}$ ) oznacza się metodą normalną Proctora. Wszystkie te właściwości fizyczne są wielkościami obliczonymi wg określonych wzorów, brak jest natomiast jednoznacznego wzoru oznaczenia ziarnistości uziarnienia gruntu (Hazen i Kollis, 1966; Wiłun, 1967; Lambe i Whitman, 1977; Pieńkos, 1994; Wolski, 1996). Utrudnia to określenie wyników stabilizacji granulometrycznej, tj. braku jednoznacznego sposobu określania zmienności uziarnienia gruntu i jego związku z innymi cechami szkieletu gruntowego, np. z gęstością czy zależną od niej porowatością.

Istotne jest, aby zmiana składu granulometrycznego gruntu znalazła wyraz w wielkości wskaźnika różnoziarnistości uziarnienia. Wówczas możliwe byłoby ustalenie wpływu składu granulometrycznego na kształtowanie się właściwości fizycznych i mechanicznych szkieletu gruntowego. Problem jest jednak bardziej skomplikowany, ponieważ z uziarnieniem jest związana porowatość szkieletu gruntowego, która ma istotny wpływ na kształtowanie się właściwości mechanicznych tego szkieletu.

W literaturze brak jest danych dotyczących kształtowania się właściwości mechanicznych w zależności od zmiennego uziarnienia, porowatości i wilgotności szkieletu gruntowego jako jednego wskaźnika. Określono jedynie kształtowanie się właściwości fizycznych i mechanicznych dla poszczególnych rodzajów gruntów bez uwzględniania zróżnicowanego składu granulometrycznego, np. w opracowaniach: „Klasyfikacja gruntów i ich przydatność do budowy dróg i lotnisk”, „Klasyfikacja gruntów i ich przydatność do budowy dróg i lotnisk wg A. Casagrande’a” (Wiłun, 1967); „Klasyfikacja gruntów i ich przydatności do budowy dróg i lotnisk wg Z. Wiłuna” (Kollis, 1966); „Właściwości fizyczne i techniczne gruntów” (Sylwestrzak i Szewczyk, 1990). Wykonano również ocenę

porównawczą właściwości mechanicznych gruntów o składach optymalnych zawartych w zakresach uziarnienia 0-13 mm, 0-25 mm, przy czym nie ustalono związku między kształtowaniem się właściwości mechanicznych a uziarnieniem mieszanek optymalnych (Pieńkos i Stępień, 1969).

Dla realizacji celów publikacji niezbędne było opracowanie wskaźnika różnoziarnistości uziarnienia szkieletu gruntowego (charakteryzującego zmienność składu granulometrycznego gruntu) i wskaźnika grupowego szkieletu gruntowego (ujmującego zarówno zmienność uziarnienia, jak i porowatość szkieletu). Objasnienia ww. wskaźników znajdują się w dalszej części publikacji. W konsekwencji można byłoby ustalić kształtowanie się wielkości mechanicznych szkieletu gruntowego w zależności od wielkości fizycznych.

Przyjęto, że wytrzymałością mechaniczną szkieletu gruntowego będzie matematyczna postać funkcji, wyrażona przez iloczyn dwóch czynników (funkcji trójmianu drugiego stopnia i wskaźnika redukcyjnego wilgotności).

Znalezienie zależności między kształtowaniem się właściwości mechanicznych wraz ze zmiennym jego uziarnieniem dałoby możliwość określenia efektu stabilizacji granulometrycznej. Wobec tego badanie właściwości mechanicznych stanowiłoby jedynie kontrolę ustalonych wzorem właściwości mechanicznych.

Celem artykułu jest wskazanie na istnienie istotnych statystycznych zależności wyrażonych wskaźnikiem korelacji pomiędzy właściwościami mechanicznymi ( $CBR$ ,  $E$ ) badanych mieszanek gruntowych nawierzchni szlaków turystycznych a ich właściwościami fizycznymi, takimi jak porowatość ( $n$ ), wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia ( $U$ ) i wskaźnik grupowy szkieletu gruntowego ( $W_{szk.}$ ). Na potrzeby opracowania określono także matematyczną postać funkcji umożliwiającej obliczenie wielkości właściwości mechanicznych ( $CBR$ ,  $E$ ) mieszanek gruntowych nawierzchni szlaków turystycznych jako iloczynu dwóch czynników (funkcji trójmianu drugiego stopnia i wskaźnika redukcyjnego wilgotności).

## Metodyka badań

Materiał do badań statystycznych stanowił zbiór ponad 600 danych empirycznych nt. właściwości fizycznych i mechanicznych uzyskanych z 17 mieszanek gruntowych – gruntów, dla których laboratoryjnie oznaczono właściwości fizyczne. Do określenia składów granulometrycznych wykorzystano w badaniach laboratoryjnych metodę analizy sitowej dla gruntów o uziarnieniu powyżej 0,07 mm, a metodą areometryczną wyznaczono szkielety gruntowe zawierające cząstki mniejsze niż 0,07 mm. Wilgotności optymalne i maksymalne gęstości objętościowe szkieletów gruntowych oznaczono normalną metodą Proctora (aparatus Proctora), która umożliwiła znalezienie zależności między kształtowaniem się wilgotności gruntu a jego gęstością objętościową (Wiłun, 1967; Wolski, 1997).

Laboratoryjnie oznaczono wskaźnik nośności gruntu *California Bearing Ratio* –  $CBR$  „Aparatem do oznaczenia  $CBR$ ”, badany moduł nośności –  $E$  wykonano w terenie za pomocą „Aparatu do badania nośności podłoża i nawierzchni”. Wszystkie te badania

przeprowadzono na gruntach w trzech zakresach uziarnienia przy zmiennym zagęszczeniu i zmiennej wilgotności szkieletów gruntowych – zgodnie z normą PN-88/B-O4481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.

W publikacji przedstawiono dane liczbowe optymalnych trzech mieszanek gruntowych oraz ich właściwości fizyczne i mechaniczne przy zagęszczeniu normalnym metodą Proctora ( $\rho_{ds}$ ), wilgotności optymalnej ( $W_{opt.}$ ) w trzech stopniach uziarnienia (0-1,02 mm, 0-12 mm, 0-25 mm) – tabele 1, 2 i 3.

Równania dwóch matematycznych funkcji trójmianu drugiego stopnia oparto na analizie danych empirycznych właściwości fizycznych i mechanicznych ze statystycznego zbioru danych empirycznych. Miernik oceny trafności doboru funkcji aproksymacyjnej stanowiła wysokość współczynnika korelacji ( $r > 0,9$ ) dla wskaźnika grupowego szkieletu gruntowego (tab. 1 i 2). Dane empiryczne zakwalifikowane do powyższego zbioru poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego MS Office, w tym pakietu aplikacyjnego MS Excel, zawansowanego i popularnego narzędzia do wyodrębnienia najistotniejszych danych oraz opracowano z wykorzystaniem programu Statgraphics Plus.

Wykorzystane oprogramowanie posłużyło do ustalenia ważności rangi współczynników korelacji (istotnych i bardzo istotnych), doboru potęgowej funkcji regresji, opracowania i sprecyzowania wskaźnika redukcyjnego wilgotności oraz przyjęcia ostatecznych postaci funkcji trójmianu drugiego stopnia.

W badaniach statystycznych uwzględniono trzy wskaźniki, takie jak: różnoziarnistości uziarnienia szkieletu gruntowego ( $U = ((d_{80}/d_{20}) \cdot d_{50})^{0,5}$ ), grupowy szkieletu gruntowego ( $W_{szk.} = (U/n^2)^{0,6}$ ) i redukcyjny wilgotności  $h = W_{opt.} + \ln(W_{opt.})/W + \ln(W)$ .

Statystyczną bazę danych empirycznych stanowiły dane liczbowe opracowane na podstawie zbadanych gruntów i ich mieszanek znajdujących się na obszarze Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie i z okolic miejscowości Rydwan w latach 1999-2000. Badania były wykonane w LZD w Rogowie.

### **Pojęcie stabilizacji, charakterystyka właściwości mechanicznych i fizycznych niezbędnych do teoretycznej analizy matematycznej postaci funkcji wytrzymałości mechanicznej**

Gruntem jest materiał niejednorodny, stanowiący ośrodek trójfazowy, składający się ze szkieletu i porów wypełnionych wodą i powietrzem. Szkielet gruntowy stanowią ziarna ( $d > 0,05$  mm) i cząstki ( $d < 0,05$  mm) o różnej wielkości i kształcie. Zawartość wagową i procentową ziaren wyznacza się za pomocą analizy sitowej, a cząstek z wykorzystaniem alaniny areometrycznej. W zależności od procentowej zawartości ziaren i cząstek dzieli się je na następujące frakcje: frakcję kamienistą, frakcję żwirową, frakcję piaskową, frakcję pyłową i frakcję iłową. W zależności od udziału procentowego poszczególnych frakcji określa się rodzaj gruntu (Wiłun, 1967; Wolski, 1996).

Grunty, w szczególności małospoiste, zalegające w podłożu przestrzeni turystycznej parku, na których znajdują się gruntowe szlaki turystyczne, możemy poddawać stabilizacji granulometrycznej. Jest to proces technologiczny, który polega na modyfikacji uziarnienia gruntu przez jego doziarnienie innym gruntem i zagęszczeniu przy określo-

nej wilgotności. Stabilizacja ma na celu polepszenie właściwości fizyczno-mechanicznych nowo utworzonych mieszanek gruntowych, które charakteryzują się podwyższoną odpornością mechaniczną na ruch turystyczny. Poszczególne frakcje powinny spełniać określone funkcje w utworzonej mieszaninie gruntowej, frakcje żwirowa i piaskowa tworzą strukturę szkieletową, frakcja pyłowa pełni funkcję wypełniającą nowo utworzony szkielet z powyższych dwóch frakcji. Frakcja iltowa jest substancją wiążącą uzyskaną strukturę gruntową. Skład granulometryczny charakteryzuje się ilością, wielkością, proporcją wymiarową i procentową zawartością frakcji w szkielecie gruntowym (Kieszek, 2014a, b).

Graficznym obrazem gruntu jest krzywa uziarnienia. Graficznie kreśli się ją na wykresie w podziałce logarytmicznej jako krzywą sum procentowej zawartości frakcji o średnicy mniejszej lub większej od danej średnicy zastępczej.

Na potrzeby artykułu zostały przedstawione niezbędne właściwości fizyczne, które w dalszym etapie wykorzystano do obliczeń właściwości mechanicznych mieszanek gruntowych – gruntów:

- wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia ( $U$ ) wyrażony zależnością matematyczną:  $U = ((d_{80}/d_{20}) \cdot d_{50})^{0,5}$ , gdzie:  $d_{20}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{80}$  są średnicami ziaren i cząstek, których zawartość wraz z mniejszymi w materiale gruntowym, według krzywej uziarnienia, wynosi 20, 50 i 80% (Kieszek, 2014b, 2022),
- wskaźnik grupowy różnoziarnistości szkieletu gruntowego ( $W_{szk.}$ ) określony matematyczną formułą:  $W_{szk.} = (U/n^2)^{0,6}$ , ( $W_{szk.} = [((d_{80}/d_{20}) \cdot d_{50})^{0,5}/n^2]^{0,6}$ ), gdzie:  $d_{20}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{80}$  są średnicami ziaren i cząstek, których zawartość wraz z mniejszymi w materiale gruntowym według krzywej uziarnienia, wynosi 20, 50 i 80% oraz  $n$  jest porowatością mieszaniny gruntowej – gruntu,
- wilgotność mieszaniny gruntowej – gruntu ( $W$ ) jest ilorazem ciężaru wody ( $G_w$ ) do ciężaru szkieletu gruntowego ( $G_s$ ) określonym w procentach, gdzie:  $W = (G_w/G_s) \cdot 100$  [%], (Wiłun, 1967),
- wskaźnik redukcyjny wilgotności ( $h$ ) wyrażono matematyczną zależnością:  $h = W_{opt.} + \ln(W_{opt.})/W + \ln(W)$ , gdzie:  $W_{opt.}$  jest wilgotnością optymalną, a  $W$  wilgotnością gruntu występującą w czasie oznaczenia wskaźnika.

Gęstość gruntu wyrażamy ilorazem ciężaru próbki gruntu do jego objętości. Gęstości gruntu mogą być różne, ponieważ próbka gruntu użyta do badań może zawierać wodę lub być sucha oraz objętość całej próbki gruntu może być z porami lub bez porów. Na podstawie tych zależności można wyrazić następujące gęstości gruntu:

- gęstość właściwa szkieletu gruntowego ( $\rho_s$ ) jest wyrażona ilorazem ciężaru wysuszonej próbki gruntu ( $G_s$ ) do objętości cząstek i ziaren bez porów ( $V_s$ ), gdzie:  $\rho_s = (G_s/V_s)$  [g/cm<sup>3</sup>],
- gęstość objętościowa masy gruntowej ( $\rho$ ) jest ilorazem ciężaru wilgotnego szkieletu gruntowego ( $G$ ) do jego objętości przed wysuszeniem ( $V$ ), gdzie:  $\rho = (G/V)$ , [g/cm<sup>3</sup>],
- gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ( $\rho_d$ ) jest wyrażona ilorazem ciężaru suchego szkieletu gruntowego ( $G_s$ ) do jego objętości przed wysuszeniem ( $V$ ), gdzie:  $\rho_d = (G_s/V)$ , [g/cm<sup>3</sup>]. Jednocześnie oznaczenie ( $\rho_{ds}$ ) przyjmuje się dla maksymalnej



gęstości objętościowej suchego szkieletu gruntowego po jego zagęszczeniu normalną metodą Proctora,

- porowatość ( $n$ ) jest wyrażona ilorazem objętości porów ( $V_p$ ) do objętości całkowitej szkieletu ( $V$ ), gdzie:  $n = V_p/V$  lub  $n = (1 - \rho_d/\rho_s)$ ,  $n = ((\rho_s - \rho_d)/\rho_s) \cdot 100$  [%], (Pieńkos, 1994).

Powyższe właściwości fizyczne gruntów powinny determinować kształtowanie się właściwości mechanicznych, takich jak:

- wskaźnik nośności  $CBR$  wyrażony jest procentowym stosunkiem obciążenia jednostkowego ( $p$ ), jakie należy przyłożyć do trzpienia o średnicy 5 cm, wciskanego w badaną próbkę gruntu na głębokość 2,54 mm; 5,08 mm; 7,62 mm z prędkością 1,25-1,27 mm/min, do standardowego obciążenia jednostkowego. Wskaźnik jest określony na podstawie następującej formuły:  $CBR = (p/p_s) \cdot 100$  [%], gdzie:  $p$  – nacisk, jaki jest potrzebny do zagłębienia się trzpienia w grunt na głębokość 5,08 mm,  $p_s$  – nacisk standardowy potrzebny do wciskania trzpienia w zagęszczony tłuczeń na głębokość 5,08 mm – 10 MPa (Wiłun, 1967),
- moduł nośności  $E$  wyrażony ilorazem przyrostu obciążenia jednostkowego do przyrostu odkształcenia badanej warstwy w ustalonym zakresie obciążeń jednostkowych, pomnożonego przez 0,75 średnicy płyty ( $D$ ), który przedstawia się w następującej formule:  $E = (3\Delta p/4\Delta s) \cdot D$  [MPa], gdzie  $\Delta p$  – przyrost obciążenia [MPa],  $\Delta s$  – przyrost odkształcenia [mm],  $D$  – średnica płyty [mm], (PN-S-02205, 1998).

Powyższe zależności matematyczne właściwości mechanicznych gruntów posłużyły do oceny oporu gruntów na działanie sił pionowych – ściskających ( $CBR$ ,  $E$ ).

### **Określenie matematycznej postaci funkcji wytrzymałości mechanicznej mieszanek gruntowych**

Analiza korelacyjna posłużyła do znalezienia więzi przyczynowo-skutkowej między badanymi właściwościami mechanicznymi a określonymi właściwościami fizycznymi gruntów. Ograniczyła się ona do zbadania współczynnika korelacji między dwiema cechami, przy wyłączeniu pozostałych. Do obliczeń współczynników korelacji i funkcji regresji przyjęto standardowe oznaczenia, zgodne z literaturą dla badanych statystycznie cech:

- właściwości mechanicznych ( $CBR$ ,  $E$ ),
- właściwości fizycznych ( $U$ ,  $n$ ,  $W_{szk}$ ).

Wyniki obliczeń współczynników korelacji cząstkowych badanych cech wykonano na podstawie danych empirycznych wielkości fizycznych i mechanicznych mieszanek gruntowych o optymalnym uziarnieniu, optymalnym zagęszczeniu i wilgotności optymalnej dla następujących cech współczynników korelacji:

- wskaźnika nośności  $CBR$  i wskaźnika różnoziarnistości uziarnienia  $U$ ; wskaźnika nośności  $CBR$  i porowatości  $n$ ; wskaźnika nośności  $CBR$  i wskaźnika grupowego szkieletu  $W_{szk}$ . (tab. 1),
- modułu nośności  $E$  i wskaźnika różnoziarnistości uziarnienia  $U$ ; modułu nośności  $E$  i porowatości  $n$ ; modułu nośności  $E$  i wskaźnika grupowego szkieletu  $W_{szk}$ . (tab. 2).

**Tabela 1.** Kształtowanie się liczbowych wielkości współczynnika korelacji kalifornijskiego wskaźnik nośności (*CBR*) w zależności od badanych właściwości fizycznych gruntów stabilizowanych granulometrycznie przy optymalnym zagęszczeniu ( $\rho_{ds} = 1,00$ ), wilgotności optymalnej ( $W_{opt.}$ ) i trzech stopni uziarnienia (0-1,02 mm, 0-12 mm, 0-25 mm)

Współczynnik korelacji ( <i>r</i> )	Stopnie uziarnienia mieszanek gruntowych – gruntów		
	0-1,02 mm	0-12 mm	0-25 mm
$r(CBR, U)$	0,67741	0,85782	0,93518
$r(CBR, n)$	-0,52906	-0,84953	-0,85147
$r(CBR, W_{szk.})$	0,69585	0,94241	0,94571

Źródło: badania własne.

**Tabela 2.** Kształtowanie się liczbowych wielkości współczynnika korelacji modułu nośności gruntu (*E*) od badanych właściwości fizycznych gruntów stabilizowanych granulometrycznie przy optymalnym zagęszczeniu ( $\rho_{ds} = 1,00$ ), wilgotności optymalnej ( $W_{opt.}$ ) i trzech stopni uziarnienia (0-1,02 mm, 0-12 mm, 0-25 mm)

Współczynnik korelacji ( <i>r</i> )	Stopnie uziarnienia mieszanek gruntowych – gruntów		
	0-1,02 mm	0-12 mm	0-25 mm
$r(E, U)$	0,85153	0,88931	0,92783
$r(E, n)$	-0,64342	-0,89017	-0,93885
$r(E, W_{szk.})$	0,81241	0,93489	0,95554

Źródło: badania własne.

Analizując wielkości liczbowe współczynników korelacji z tabel 1-2 stwierdzono ujemny związek przyczynowo-skutkowy między cechami korelacji  $r(CBR, n)$ ,  $r(E, n)$ , wskazujący na silne rozbieżności między badanymi cechami.

W przypadku dodatniej korelacji  $r(CBR, U)$ ,  $r(CBR, W_{szk.})$ ,  $r(E, W_{szk.})$ ,  $r(E, W_{szk.})$  badane cechy są w bezpośrednim bardzo silnym związku i zmieniają się w tym samym kierunku. Dodatnia i zwiększająca się siła korelacji ponad  $r > 0,9$  występuje pomiędzy:

- kalifornijskim wskaźnikiem nośności gruntu a wskaźnikiem różnoziarnistości uziarnienia  $r(CBR, U)$  dla trzeciego zakresu uziarnienia (0-25 mm), wynosząc:  $r = 0,93518$ ,
- kalifornijskim wskaźnikiem nośności gruntu a wskaźnikiem grupowym szkieletu gruntu  $r(CBR, W_{szk.})$  dla drugiego zakresu (0-12 mm) i trzeciego zakresu uziarnienia (0-25 mm), wynosząc:  $r = 0,94241$  oraz  $r = 0,94571$ ,
- modułem nośności gruntu a wskaźnikiem różnoziarnistości uziarnienia  $r(E, U)$  dla trzeciego zakresu uziarnienia (0-25 mm), wynosząc:  $r = 0,92783$ ,
- modułem nośności gruntu a wskaźnikiem grupowym szkieletu  $r(E, W_{szk.})$ , wynosząc:  $r = 0,93489$  (0-12 mm) i  $r = 0,95554$  (0-25 mm), (tab.1 i 2).

W tych wymienionych przypadkach wielkość współczynnika korelacji oscyluje między wartościami z przedziału  $r(0,9-1,00)$ . Uzyskane wartości danych empirycznych

odpowiadają z dużym prawdopodobieństwem zmiennym losowym, potwierdzając więc przyczynowoskutkową między badanymi cechami, przy jednoczesnym istnieniu matematycznej zależności.

Wyniki korelacji wraz z wykorzystaniem analizy statystycznej dla danych empirycznych pozwoliły na ustalenie matematycznej postaci wzorów funkcji właściwości mechanicznych jako iloczynu dwóch czynników: czynnika trójmianu drugiego stopnia (równania funkcji regresji) w zależności od zmiennej niezależnej, którym jest grupowy wskaźnik szkieletu gruntowego ( $W_{szk.}$ ), oraz wskaźnika redukcyjnego wilgotności ( $h$ ). Ostateczną postać funkcji właściwości mechanicznych wyrażono równaniami:

- $CBR = [11,7561 + 1,78519 (W_{szk.}) - 0,00551551 (W_{szk.})^2] \cdot h$ , [%],
- $E = [28,0822 + 2,33509 (W_{szk.}) - 0,00560183 (W_{szk.})^2] \cdot h$ , [MPa].

Jednocześnie wykonano analizę wariancji dla poszczególnych matematycznych postaci równań funkcji właściwości mechanicznych, na podstawie których obliczono średnią determinację, błąd standardowy, średni błąd absolutny i statystykę Durbin–Watson, zgodnie z oprogramowaniem Statgraphics Plus, gdzie:

- $CBR$  – średnia determinacja (92,9354%), błąd standardowy oszacowania (5,27954), średni błąd absolutny (4,18146), statystyka Durbin–Watson (0,0975248),
- $E$  – średnia determinacja (87,5957%), błąd standardowy oszacowania (8,67357), średni błąd absolutny (7,17527), statystyka Durbin–Watson (0,650289).

W tabeli 3 zestawiono wyniki właściwości mechanicznych, obliczone według matematycznej postaci funkcji właściwości mechanicznych z danymi empirycznymi, przy założeniu równości wilgotności optymalnej z wilgotnością gruntu w czasie badania ( $W_{opt.} = W$ ), przy której wskaźnik redukcyjny równy jest 1 ( $h = 1$ ).

**Tabela 3.** Właściwości mechaniczne  $CBR$  i  $E$  obliczone matematyczną funkcją wielomianową oraz uzyskane z badań empirycznych gruntów stabilizowanych granulometrycznie przy optymalnym zagęszczeniu ( $\rho_{ds} = 1,00$ ), wilgotności optymalnej ( $W_{opt.}$ ) i trzech stopni uziarnieniu 0-1,02 mm, 0-12 mm, 0-25 mm

Zakres uziarnienia mieszanin gruntowych – gruntów	Numer badanego gruntu	$U$	$n$	$W_{szk.}$	$W_{opt.}$ [%]	$CBR$ [%]		$E$ [MPa]	
						Badania empiryczne	Matematyczna postaci funkcji ( $h = 1$ )	Badania empiryczne	Matematyczna postaci funkcji ( $h = 1$ )
0-1,02 mm	1	1,289	0,253	6,06	11,00	24,8900	50,7000	22,3718	42,0271
0-12 mm	2	7,441	0,170	27,95	8,55	55,6400	85,1500	57,3434	88,9718
0-25 mm	3	10,690	0,151	40,05	8,00	76,9000	115,6800	74,4060	112,6172

Źródło: badania własne.

Dane liczbowe nośności mieszanek gruntowych zawarte w tabeli 3 nie odwzorowują wyników między otrzymanymi wynikami z matematycznej funkcji a wynikami empirycznymi z badań w przedziale od 1-17% (tab. 3).



Najmniejsze odstępstwo wskaźnika nośności gruntu CBR – służącego do określenia nośności nawierzchni gruntowych, polegające na pomiarze nacisku jaki jest potrzebny do wciśnięcia tłoka w badaną próbkę gruntu stabilizowanego granulometrycznie – wynosiło 3,25% dla gruntu trzeciego o optymalnym uziarnieniu dla wskaźnika redukcyjnego wilgotności równego jeden.

Podobną zależność możemy zauważyć w przypadku modułu nośności  $E$  charakteryzującą opór gruntu na odkształcenie płytą, wynosi on 2,65% dla gruntu trzeciego o optymalnym uziarnieniu dla wskaźnika redukcyjnego wilgotności równego 1.

Należy podkreślić, że stosowanie matematycznych obliczeń – w tym przypadku matematycznej postaci funkcji – nie odwzorowuje w 100% wyników badań rzeczywistych, ale nie dyskredytuje stosowania takich rozwiązań we wstępnych badaniach.

### Podsumowanie

Wykonane badania mogą być wzięte pod uwagę pod kątem zwiększenia wytrzymałości mechanicznych składów granulometrycznych i parametrów techniczno-eksploatacyjnych gruntowych nawierzchni szlaków turystycznych stabilizowanych granulometrycznie znajdujących się na gruntach małospoistych.

Wysoka wartość współczynnika korelacji między kalifornijskim wskaźnikiem nośności gruntu a wskaźnikiem grupowym szkieletu gruntu  $r(CBR, W_{szk.})$  oraz modułem nośności gruntu a wskaźnikiem grupowym szkieletu  $r(E, W_{szk.})$  – świadcząca o istnieniu zbieżnej korelacji – wymaga prowadzenia dalszych badań na szerszym materiale statystycznym. Z powyższego artykułu można wywnioskować, że:

- istnieją zależności korelacyjne pomiędzy właściwościami fizycznymi, takimi jak wskaźnik grupowy szkieletu gruntowego ( $W_{szk.}$ ), a właściwościami mechanicznymi ( $CBR, E$ ) mieszanek gruntowych – gruntów (korelacja jest dodatnia silna i bardzo silna),
- przy większym wskaźniku grupowym szkieletu gruntowego badane mieszanki gruntowe charakteryzują się również większymi właściwościami mechanicznymi. Przy większym wskaźniku różnoziarnistości uziarnienia występuje również wzrost nośności gruntów,
- przyjęcie matematycznych postaci funkcji właściwości mechanicznych w formie iloczynu dwóch czynników, którym pierwszym jest równanie funkcji trójmianu drugiego stopnia zależnego od zmiennej – wskaźnika grupowego szkieletu gruntowego ( $W_{szk.}$ ) i drugiego czynnika wskaźnika redukcyjnego wilgotności ( $h$ ) mogą być istotne dla gruntów przy założeniach, że badane grunty będą o zagęszczeniu  $\rho_{ds} = 1,00$ , wilgotności  $W_{opt.}$  w trzech stopniach zmiennego uziarnienia 0-1,02 mm, 0-12 mm, 0-25 mm.

Należy sądzić, że uzyskane pozytywne teoretyczne rezultaty mogą być wykorzystywane do pilotażowych badań nośności nawierzchni z mieszanek gruntowych, pośrednio mogą przyczynić się do zminimalizowania zakresu i skrócenia czasu badań.

## Literatura

- Kieszek, A. (2022). Stabilizacja granulometryczna małoinwazyjną metodą ulepszania gruntowych nawierzchni szlaków turystycznych na gruntach małospoistych w polskich parkach narodowych. Warszawa: Wydawnictwo SGGW, s. 77-88.
- Kieszek, A. (2014). Wpływ właściwości fizycznych gruntu i wody na wytrzymałość mechaniczną gruntowych nawierzchni szlaków pieszych na terenach leśnych Mazowsza. *Studia Mazowieckie*, 1, s. 113-127.
- Kieszek, A. (2014). Teoretyczne podstawy wpływu zmienności uziarnienia gruntów stabilizowanych granulometrycznie na wytrzymałość mechaniczną nawierzchni gruntowych szlaków pieszych w przestrzeni turystycznej Mazowsza. *Studia Mazowieckie*, 2, s. 109-120.
- Kollis, W. (1966). *Gruntoznawstwo techniczne*. Warszawa: Wydawnictwo Arkady.
- Lambe, W. T., Whitman, R. V. (1977). *Mechanika gruntów*. Tom I. Warszawa: Wydawnictwo Arkady.
- Pieńkos, K., Stępień, E. (1969). Badania nad przydatnością stabilizacji granulometrycznej do budowy dróg. *Sylwan*, 10, Warszawa: Wydawnictwo PTL.
- Pieńkos, K. (1994). Badania wpływu wybranych czynników warunkujących stabilizację cementem gruntowych dróg leśnych. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- PN-88/B-04481. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Warszawa: Wydawnictwa Normalizacyjne „Alfa”.
- PN-S-02205 (1998). *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania*. Polski Komitet Normalizacyjny. Poznań: Wydawnictwo Ars Boni.
- Sylwestrzak, J., Szewczyk J. (1990). *Materiały do ćwiczeń z projektowania dróg leśnych*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW-AR.
- Wiłun, Z. (1967). *Mechanika gruntów i gruntoznawstwo drogowe*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Wolski, W. (1996). *Przewodnik do ćwiczeń z podstaw geotechniki – mechanika gruntów. Część I*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Wolski, W. (1997). *Przewodnik do ćwiczeń z podstaw geotechniki – mechanika gruntów. Część II*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.

### **An attempt to calculate the mechanical properties of low-cohesion soils stabilized by granulometric methods of tourist trail surfaces**

**Abstract.** The article presents the relationship between the mechanical properties of soil mixtures used in tourist trail surfaces and their physical properties, such as porosity, grain size heterogeneity index and soil skeleton group index. The studies have shown that the calculated mechanical properties of soil mixtures reflect the numerical values of the empirical data obtained from the studies in the range from 1% to 17%. The article describes only the mechanical properties of three soil mixtures with an optimal degree of granulation at specific physical properties. It should be noted that the obtained theoretical results of the mechanical strength function can be used for pilot tests of the load-bearing capacity of surfaces made of soil mixtures, and can indirectly contribute to minimizing the scope and shortening the time of laboratory and field tests.

**Keywords:** polynomial function, regression function, correlation, mechanical properties, physical properties, granulometric stabilization