

MICHAŁ CŹWIĄKAŁA *

**BADANIA ZAGĘSZCZALNOŚCI KRUSZYW
UŻYWANYCH W BUDOWNICTWIE DROGOWYM**

Słowa kluczowe: wilgotność optymalna, gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, badanie w aparacie Proctora, zagęszczanie gruntów

Streszczenie

Trwałość i jakość budowli drogowej zależy w dużej mierze od prawidłowego zagęszczenia podłoża gruntowego. Dobrze przygotowane podłoże powinno gwarantować nośność obiektu i w razie konieczności pełnić funkcję izolującą od niekorzystnych warunków gruntowych. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań kruszyw wykorzystywanych do budowy dróg. Badania te posłużyły do opracowania modeli krzywych trendu, jakie mogą być wykorzystywane do kontroli badań zagęszczalności w celu określenia wilgotności optymalnej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Jednym z podstawowych parametrów charakteryzujących jakość podłoża gruntowego jest wilgotność optymalna [w_{opt}], którą definiuje się jako wilgotność, przy której grunt ubijany w sposób normowy, tzn. przy zachowaniu odpowiedniej ilości uderzeń oraz energii zagęszczenia ubijaka, uzyskuje maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego [ρ_{dmax}], czyli maksymalne zagęszczenie [Stypułkowski 1981].

Wilgotność optymalną oznacza się w aparacie Proctora poprzez ubijanie w cylindrze próbki gruntu w odpowiednich i równych porcjach, z których każda – w zależności od wielkości zastosowanego cylindra i ubijaka – powinna być ubijana przy odpowiedniej ilości uderzeń i energii zagęszczenia [Karczewski 1972]. Badanie prowadzi się tak długo, aż przy kolejnej wilgotności nastąpi spadek gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, co oznacza, że badany grunt osiągnął swoją wilgotność optymalną, czyli stan nawilgocenia, przy którym zagęszcza się on najlepiej.

W niniejszym artykule zaprezentowano przykładowe wyniki badań wilgotności optymalnej, jakie zostały przeprowadzone dla dwóch złóż zlokalizowanych w dorzeczu Odry. Są to złoża piasku średnioziarnistego w Przewoźnikach

* TPA Instytut Badań Technicznych

(tab. 1) oraz w Królowie (tab. 2). Badane kruszywa były wykorzystywane do modernizacji drogi krajowej nr 18 na odcinku Olszyna – Golnice.

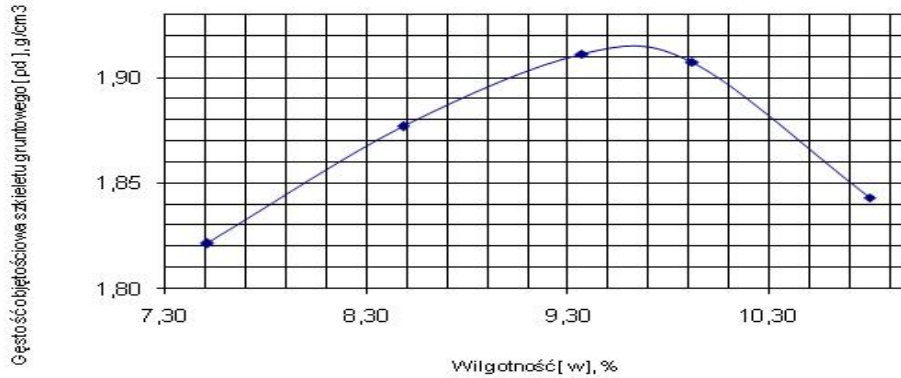
Tab. 1. Wyniki oznaczania wilgotności optymalnej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla piasku średnioziarnistego ze złoża kopalni Przewoźniki

Numer próbki	Wilgotność gruntu W [%]	Gęstość objętościowa gruntu ρ_o [g/cm ³]	Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d [g/cm ³]
1	7,51	1,96	1,82
2	8,48	2,04	1,88
3	9,37	2,09	1,91
4	9,92	2,10	1,91
5	10,80	2,04	1,84

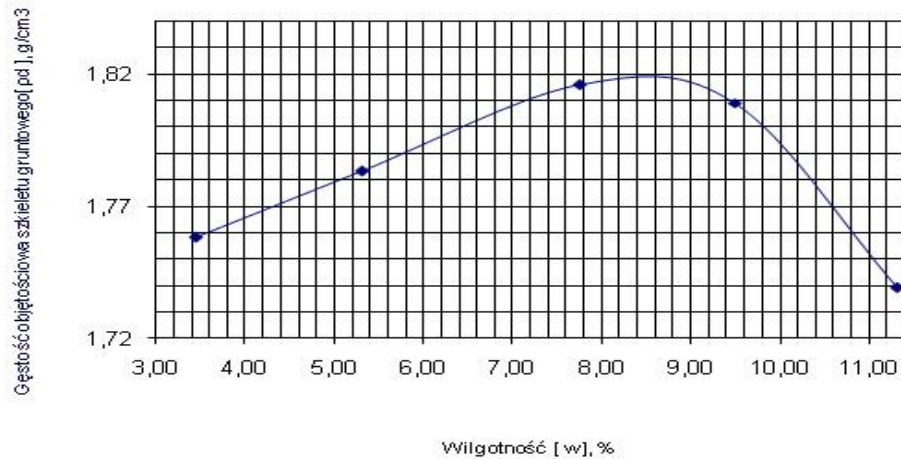
Tab. 2. Wyniki oznaczania wilgotności optymalnej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla piasku średnioziarnistego ze złoża kopalni Królów

Numer próbki	Wilgotność gruntu W [%]	Gęstość objętościowa gruntu ρ_o [g/cm ³]	Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d [g/cm ³]
1	3,46	1,82	1,76
2	5,31	1,88	1,78
3	7,76	1,96	1,82
4	9,49	1,98	1,81
5	11,31	1,94	1,74

Wykresy uzyskanych zależności pomiędzy wilgotnością gruntu i gęstością objętościową szkieletu gruntowego są zbliżone do przebiegu funkcji drugiego stopnia (funkcji kwadratowej) – rys. 1 i rys. 2.



Rys. 1. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego [ρ_d] od wilgotności [w] dla piasku średnioziarnistego ze złoża kopalni Przewoźniki



Rys. 2. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego [ρ_d] od wilgotności [w] dla piasku średnioziarnistego ze złoża kopalni Królów

Korzystając z tych wykresów można odczytać bezpośrednio wartości wilgotności optymalnych i odpowiadające im wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, które wynoszą:

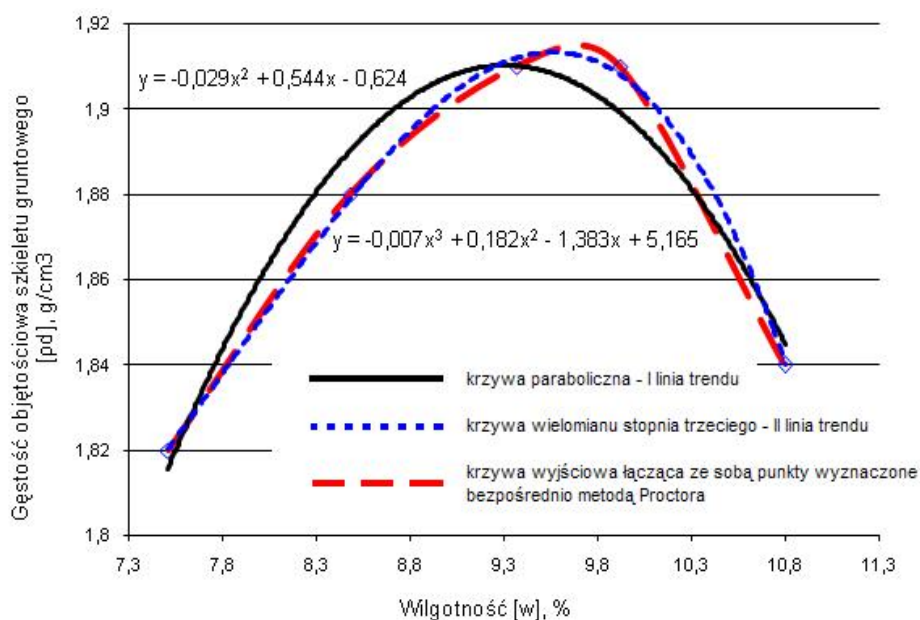
- próbka nr 1: $w_{\text{opt}} = 9,60\%$; $\rho_{d_{\text{max}}} = 1,91 \text{ g/cm}^3$,
- próbka nr 2: $w_{\text{opt}} = 8,40\%$; $\rho_{d_{\text{max}}} = 1,82 \text{ g/cm}^3$.

Graficzny obraz uzyskanych wyników można przedstawić korzystając również z linii trendu. W tym celu opracowano arkusze kalkulacyjne, pozwalające wykreślić linii trendu dla wcześniej wyznaczonych punktów Proctora, przy jednoczesnym podaniu wzorów funkcji, które w dowolnych punktach wykresów (dla dowolnej wilgotności) określiłyby wartości gęstości objętościowej

szkieletu gruntowego, a także pokazywałyby różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi z funkcji linii trendu i wynikami otrzymanymi bezpośrednio podczas badania w aparacie Proctora.

W celu rozpoznania tego zagadnienia ograniczono się do dwóch znanych wielomianów, tj. wielomianu drugiego i trzeciego stopnia, co zostało przedstawione na wykresach (rys. 3 i rys. 4), uwzględniających trzy krzywe:

- krzywą paraboliczną (wielomianu stopnia drugiego), wyznaczoną na podstawie aproksymacji punktów Proctora – I linia trendu,
- krzywą wielomianu stopnia trzeciego, wyznaczoną na podstawie aproksymacji punktów Proctora – II linia trendu,
- krzywą wyjściową, łączącą ze sobą punkty wyznaczone bezpośrednio metodą Proctora.



Rys. 3. Wykresy modeli krzywych linii trendu do określenia wilgotności optymalnej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla piasku średnioziarnistego ze złoża kopalni Przewoźniki

Wzory funkcji:

- krzywa paraboliczna (I linia trendu – linia ciągła):

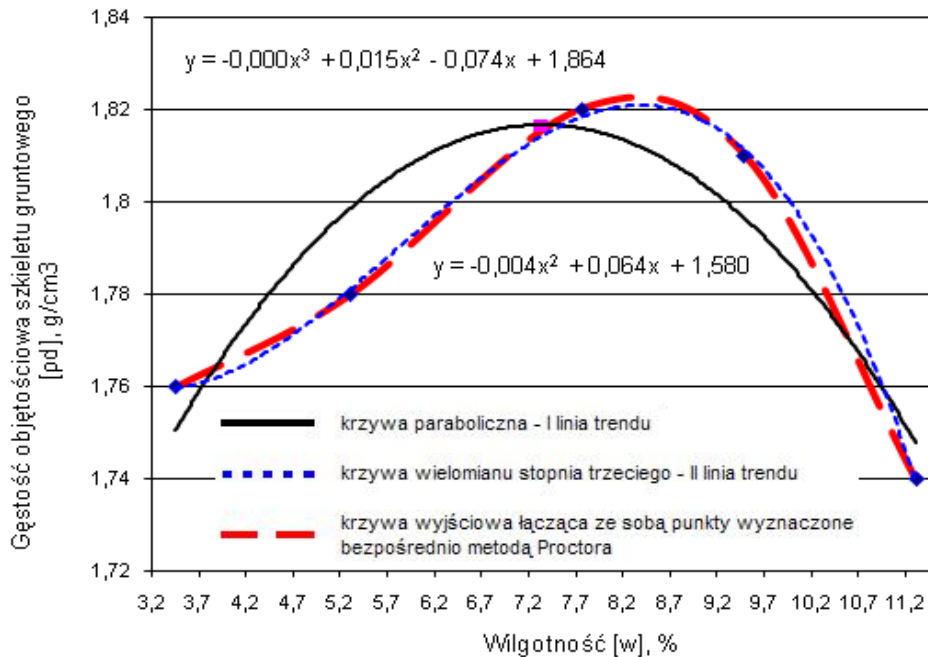
$$y = -0,0293x^2 + 0,5446x - 0,624$$

- krzywa wielomianu stopnia trzeciego (II linia trendu – linia kropkowana):

$$y = -0,0077x^3 + 0,1828x^2 - 1,3839x + 5,1654$$

Uzyskane wartości ekstremalne dla podanych funkcji:

- krzywa paraboliczna (I linia trendu – linia ciągła):
 $w_{\text{opt}} = 9,31 \%$; $\rho_{\text{dmax}} = 1,91 \text{ g/cm}^3$
- krzywa wielomianu stopnia trzeciego (II linia trendu – linia kropkowana):
 $w_{\text{opt}} = 9,36 \%$; $\rho_{\text{dmax}} = 1,85 \text{ g/cm}^3$



Rys. 4. Wykresy modeli krzywych linii trendu do określenia wilgotności optymalnej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla piasku średnioziarnistego ze złoża kopalni Królów

Wzory funkcji:

- krzywa paraboliczna (I linia trendu – linia ciągła):
 $y = -0,0044x^2 + 0,0643x + 1,5805$
- krzywa wielomianu stopnia trzeciego (II linia trendu – linia kropkowana):
 $y = -0,0009x^3 + 0,0158x^2 - 0,0741x + 1,8644$

Uzyskane wartości ekstremalne dla podanych funkcji:

- krzywa paraboliczna (I linia trendu – linia ciągła):
 $w_{\text{opt}} = 7,34 \%$; $\rho_{\text{max}} = 1,82 \text{ g/cm}^3$
- krzywa wielomianu stopnia trzeciego (II linia trendu – linia kropkowana):
 $w_{\text{opt}} = 7,41 \%$; $\rho_{\text{max}} = 1,77 \text{ g/cm}^3$

W celu zinterpretowania wyników przeprowadzonych badań posłużono się zbiorczym zestawieniem wartości ekstremalnych wilgotności optymalnych i odpowiadających im wartości gęstości objętościowych szkieletu gruntowego (tab. 4).

Tab. 4. Zestawienie wartości ekstremalnych wilgotności optymalnych i odpowiadających im wartości gęstości objętościowych szkieletu gruntowego ρ_{dmax}

Piasek średnioziarnisty ze złoża kopalni Przewoźniki Próbkę nr 1	Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{dmax} [g/cm ³]	Piasek średnioziarnisty ze złoża kopalni Królów Próbkę nr 2	Wilgotność optymalna w_{opt} [%]	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{dmax} [g/cm ³]
Krzywa wyjściowa	9,60	1,91	Krzywa wyjściowa	8,40	1,82
I linia trendu	9,31	1,91	I linia trendu	7,34	1,82
II linia trendu	9,36	1,85	II linia trendu	7,41	1,77

Z przeprowadzonych badań wynika, że w obu zbadanych kruszywach:

- wyniki maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego odczytanych z funkcji parabolicznych, tzn. krzywych przedstawiających I linię trendu pokrywają się z wynikami rzeczywistymi, jakie otrzymano bezpośrednio z punktów Proctora (próbka nr 1: $\rho_{dmax} = 1,91$; próbka nr 2: $\rho_{dmax} = 1,82$), natomiast wartości maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego odczytane z II linii trendu są zaniżone w stosunku do wartości rzeczywistych (próbka nr 1: $\rho_{dmax} = 1,85$; próbka nr 2: $\rho_{dmax} = 1,77$),
- krzywe linii trendu wielomianów stopnia trzeciego, tzn. krzywe przedstawiające II linię trendu, w porównaniu do krzywych wyjściowych, wyznaczonych bezpośrednio z punktów Proctora są bardzo do siebie zbliżone, lecz wyniki końcowe oznaczeń gęstości objętościowych szkieletu gruntowego znacznie odbiegają od wartości rzeczywistych (próbka nr 1: $\rho_{dmax} = 1,85$; próbka nr 2: $\rho_{dmax} = 1,77$),
- wartości maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu gruntowego dla krzywych linii trendu I i II różnią się znacznie od siebie (próbka nr 1: $\rho_{dmax} = 1,91$ – I linia trendu; próbka nr 1: $\rho_{dmax} = 1,85$ – II linia trendu; próbka nr 2: $\rho_{dmax} = 1,82$ – I linia trendu; próbka nr 2: $\rho_{dmax} = 1,77$ – II linia trendu), natomiast wilgotności są bardzo zbliżone (próbka nr 1: $w_{opt} = 9,31$ – I linia trendu; próbka nr 1: $w_{opt} = 9,36$ – II linia trendu; próbka nr 2: $w_{opt} = 7,34$ – I linia trendu; próbka nr 2: $w_{opt} = 7,41$ – II linia trendu),
- nie uzyskano wyników zgodnych co do wartości rzeczywistych wilgotności optymalnych, a najbardziej zbliżone wartości wilgotności optymalnej wykaza-

- ła próbka nr 1 (przykład 1), co prawdopodobnie wynika z charakteru funkcji parabolicznej,
- różnice w wartościach punktów pośrednich występujących przed i po osiągnięciu „ w_{opt} ” i „ ρ_{dmax} ” mogły być spowodowane błędami w wykonywaniu doświadczeń, bądź złym doбором funkcji.

Podsumowanie

Badania prowadzone w celu określenia wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego mają istotne znaczenie dla właściwego zbudowania podłoża dróg.

Właściwe zagęszczanie podłoża ma olbrzymi wpływ na trwałość przyszłej nawierzchni drogowej, decyduje również o późniejszych cechach eksploatacyjnych, takich jak osiadanie nawierzchni.

Przyjmując jeden z modeli krzywych linii trendu zaproponowanych w tym artykule można dla dowolnej wilgotności gruntu ustalić gęstość objętościową szkieletu gruntowego badanego materiału.

Różnice w wartościach punktów pośrednich występujących przed i po osiągnięciu „ w_{opt} ” i „ ρ_{dmax} ” mogą być spowodowane błędami w wykonywaniu samego badania, bądź nieodpowiednim doбором funkcji dla danego gruntu w celu określenia linii trendu; dla każdego rodzaju gruntu funkcja będzie przybierać inną postać – inny wzór lub współczynnik.

W prezentowanych badaniach bardziej wiarygodnymi w stosunku do rzeczywistych były wyniki uzyskane z krzywych parabolicznych (wielomianu stopnia drugiego).

Przeprowadzone badania mają charakter sondażowy, a uzyskane wyniki wskazują na celowość kontynuacji podjętego eksperymentu.

Literatura

1. KALABIŃSKA M., PIŁAT J., RADZISZEWSKI P.: *Technologia materiałów i nawierzchni drogowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
2. KARCZEWSKI B.: *Pracownia technologiczna w budownictwie drogowym*. Państwowe Wydawnictwa Szkolnictwa Zawodowego, Warszawa 1972
3. STYPULKOWSKI B.: *Zagadnienia materiałowe w projektowaniu i wykonawstwie drogowym*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981

RESEARCH OF DENSITY OF AGGREGATE MATERIALS USED IN ROAD BUILDING

Keywords: optimal moisture, ground framework density, Proctor's apparatus test, ground density

S u m m a r y

The goal of this article is to show how quality and durability of a road is dependant upon the correct density of its' ground base, which lies under the surface of the paving. A well prepared base should guarantee the load capacity and, where needed, isolate the road from the unfavourable ground conditions. Curve diagrams in this article show how to determine the optimal moisture and density of the ground framework.