

WPŁYW ENERGII ZAGĘSZCZANIA NA ZMIANY ZWIĘZŁOŚCI GLEBY

Krzysztof Lejman, Zygmunt Owsiak, Antoni Szewczyk

Institut Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań wpływu jednostkowej energii zagęszczania inercyjnego na zmiany związłości gleby. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w glebach piaszczystej słabogliniastej i gliniastej ciężkiej w przedziałach wilgotności wynoszących odpowiednio 0,5-13,5% i 13,5-21,1%. Zależności regresyjne pomiędzy związłością i energią zagęszczania opisano funkcją sigmoidalną. Stwierdzono, że wilgotności, przy których występują najwyższe gradienty związłości oraz związłości maksymalne, wynoszą dla gleby piaszczystej słabogliniastej i gliniastej ciężkiej odpowiednio 5,5% i 10,3% i są niższe od optymalnych wilgotności zagęszczania.

Słowa kluczowe: gleba, energia zagęszczania, związłość

Wstęp

Niezamierzonym efektem każdej polowej produkcji roślinnej jest proces przenoszenia na podłoże energii [Krysztosiak, Podsiadłowski 1998], który w większości przypadków skutkuje niekorzystnym jego zagęszczeniem. Powoduje to zmniejszenie plonu oraz zwiększenie nakładów na odtworzenie optymalnych warunków dla wzrostu roślin [Buliński 2006]. Proces ten ma na ogół charakter dynamiczny, co wynika z prędkości przemieszczania po polu agregatów rolniczych. Prawidłowa analiza tego procesu uwarunkowana jest głównie możliwością wyznaczenia chwilowej charakterystyki gleby służącej do porównywania różnych rozwiązań technicznych i technologicznych polowej produkcji roślinnej. W obszarze tym szczególne miejsce znajdują pomiary penetrometryczne, przy czym uwarunkowania wynikające z braku jednoznacznego powiązania wyników pomiarów związłości z właściwościami fizycznymi gleby takimi jak gęstość czy porowatość [Błaszkiwicz 1998; Pukos i Walczak 1990] powodują, że zastosowanie stosunkowo łatwego w użyciu narzędzia i włączanie uzyskanych przy jego użyciu wyników do systemów decyzyjnych jest bardzo ograniczone.

Celem pracy było wyznaczenie zależności pomiędzy jednostkową energią zagęszczania inercyjnego i związłością gleb o składach granulometrycznych piasku słabogliniastego i gliny ciężkiej oraz wyznaczenie wpływu wilgotności tych gleb na dynamikę przyrostów związłości.

Zakres, metody i warunki badań

Doświadczalny materiał glebowy pobierano z pól uprawnych o składach granulometrycznych piasku słabogliniastego oraz gliny ciężkiej [PN-R-04033], dla których procentowy udział frakcji piasku, pyłu i łu wynosił odpowiednio 87, 9 i 4 oraz 30, 44 i 27. Podstawowe parametry charakteryzujące badane gleby przedstawiono w tab. 1. Gleby wysuszono w temperaturze pokojowej do wilgotności powietrznie suchej. Wilgotność ta odpowiadała pierwszemu poziomowi wilgotności, który był stosowany w badaniach. Kolejne poziomy uzyskano nawilżając gleby począwszy od wilgotności odpowiadającej początkowi zakresu wilgotności użytecznych w odstępach około 3% (tab. 2).

Tabela 1. Parametry gleb

Table 1. Soil parameters

Gatunek gleby	Gęstość fazy stałej [Mg·m ⁻³]	Granica płynności [%]	Granica plastyczności [%]	Optymalna wilgotność zagęszczenia [%]	Zawartość próchnicy [%]
Piasek słabogliniasty	2,64	19,6	10,7	9,4	0,85
Glina ciężka	2,63	39,7	19,8	15,4	2,38

Źródło: opracowanie własne

Przy każdym poziomie wilgotności glebę ważono i zasypywano w równych częściach do trzech pojemników cylindrycznych (rys. 1). Następnie gleba poddawana była zagęszczeniu inercyjnemu. Stosowano 5 poziomów zagęszczenia charakteryzujących się rosnącą liczbą uderzeń ciężarkiem o masie 20 kg. Liczba uderzeń zawierała się w granicach od 0 do 12. Jednostkową energię zagęszczenia po każdym uderzeniu (n) obliczano ze wzoru:

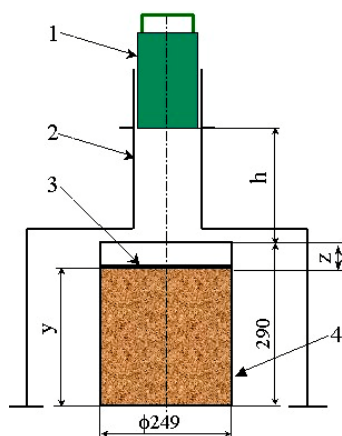
$$E_j = \sum_1^n \frac{m \cdot g \cdot (h + z_{n-1})}{V_{n-1}} \quad (1)$$

gdzie:

- m – masa ciężarka [kg],
- g – przyspieszenie ziemskie [m·s⁻²],
- h, z – wymiary zgodne z rys. 1 [m].

Przed pierwszym uderzeniem i po kolejnych wyznaczano parametry konieczne do obliczenia aktualnej objętości gleby (V) i wysokości, z której spada ciężarek przy następnym uderzeniu. Dla wybranych wartości energii zagęszczenia przeprowadzono pomiary zwięzłości. W każdym pojemniku wykonywano 2 pomiary, co przy użyciu 3 pojemników pozwoliło na uzyskanie 6 powtórzeń. Zwięzłość mierzono stosując zwięzłościomierz z napędem mechanicznym wyposażony w sondę stożkową o kącie wierzchołkowym 60° i polu podstawy 3 cm². Prędkość zagłębiania sondy wynosiła 3 cm·s⁻¹, a błąd pomiaru nie przekraczał 5 kPa. Po przeprowadzeniu pomiarów zwięzłości gleba była powtórnie spulchniana i zagęszczana do kolejnego poziomu. Zastosowanie własnej metodyki zagęszczenia inercyjnego gleby w pojemniku umożliwiło wyznaczenie jednostkowej energii zagęszczenia

oraz pozwoliło na przeprowadzenie pomiarów zwięzłości przy użyciu standardowej metody, jaka jest stosowana w warunkach polowych, przy jednoczesnym zachowaniu prawidłowych relacji pomiędzy objętością pojemnika i naprężeniami przenoszonymi na jego ścianki [Garciano i in. 2007].



Rys. 1. Schemat stanowiska do zagęszczania gleby: 1 - ciężarek, 2 - prowadnica, 3 - płyta, 4 - pojemnik z glebą, h - odległość podstawy ciężarka od krawędzi pojemnika (250 mm), y - wysokość warstwy gleby
 Fig. 1. Diagram of a setup for soil compacting: 1 - weight, 2 - guide, 3 - plate, 4 - container with soil, h - distance between weight base and container edge (250 mm), y - soil layer height

Zależności regresyjne pomiędzy zwięzłością (z) i jednostkową energią zagęszczania (E_j) wyznaczono w oparciu o model funkcji MMF (Morgan-Mercer-Flodin) [Morgan i in. 1975] o postaci:

$$z = A_1 - \frac{A_1 - A_2}{1 + A_3 \cdot E_j^{A_4}} \quad (2)$$

gdzie:

$A_1 - A_4$ - parametry funkcji.

Istotność korelacji sprawdzano dla poziomu prawdopodobieństwa $\alpha=0,05$ przy 34 stopniach swobody. Funkcję tę (2) przyjęto ze względu na fakt, że poszczególne jej parametry ($A_1 - A_4$) mają określoną interpretację fizyczną, ponieważ $A_1 = \lim_{x \rightarrow \infty} f(x)$, $A_2 = f(0)$, A_4 określa kształt krzywej a A_3 jest parametrem skalującym.

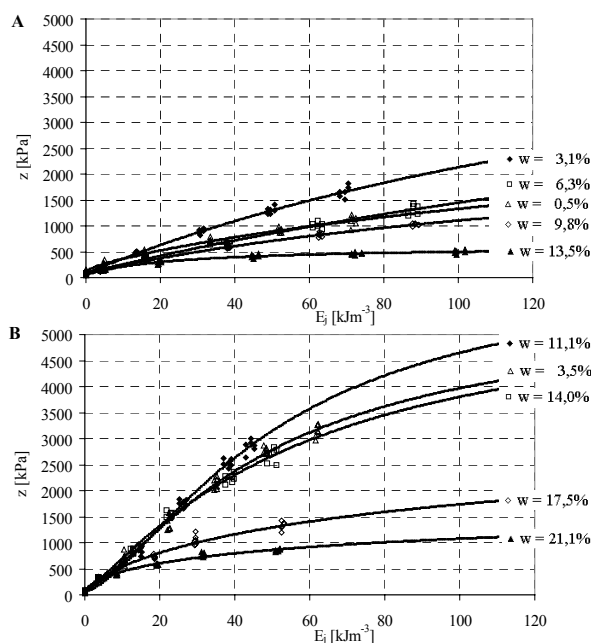
Krzywa funkcji MMF ma również tę właściwość, że wartość jej granicy wyznaczana jest na podstawie krzywizny i gradientów fazy początkowej. Właściwość ta ma istotne znaczenie przy wyznaczaniu zwięzłości maksymalnych, ponieważ w objętości gleby ograniczonej ściankami pojemnika pomiary zwięzłości mogą być przeprowadzane tylko do pewnej wartości zagęszczeń. Dalsze zagęszczanie powoduje, że przy pomiarze zwięzłości stosunkowo duże naprężenia przenoszone są na ścianki pojemnika, co generuje błędy pomiarowe [Garciano i in. 2007].

Oceny dynamiki zmian zwięzłości, dla gleb o zróżnicowanej zawartości frakcji spławialnych i zmiennej wilgotności, dokonano na podstawie przebiegu pierwszej pochodnej funkcji (2), pochodna ta ma postać:

$$\frac{dz}{dE_j} = (A_1 - A_2) \cdot \frac{A_3 \cdot A_4 \cdot E_j^{A_4-1}}{(1 + A_3 \cdot E_j^{A_4})^2} \quad (3)$$

Wyniki badań

Przebiegi zwięzłości w zależności od jednostkowej energii zagęszczania przedstawiono na rys. 2, a wyznaczone wartości współczynników równania (2) oraz wyniki testów statystycznych zawiera tab. 2. W efekcie aproksymacji wyników badań równaniem (2) uzyskano bardzo wysokie współczynniki determinacji zawierające się w przedziale od 0,9749 do 0,9938, a standardowy błąd estymacji nie przekraczał 106 kPa. W przypadku obu gleb można zaobserwować większe intensywności przyrostu zwięzłości w początkowym etapie zagęszczania. Dalsze zagęszczanie powoduje stabilizację tego procesu do momentu osiągnięcia zwięzłości maksymalnych ograniczonych poziomymi asymptotami funkcji (2), których położenie zawarte jest w współczynnikach A_1 (tab. 2).



Rys. 2. Wpływ jednostkowej energii zagęszczania (E_j) na zwięzłość (z) gleb piaszczystej słabogliniastej (A) i gliniastej ciężkiej (B) przy różnych wilgotnościach (w)

Fig. 2. The impact of unit compacting energy (E_j) on compactness (z) of soils: loamy (A) and heavy clayey (B), for different humidity values (w)

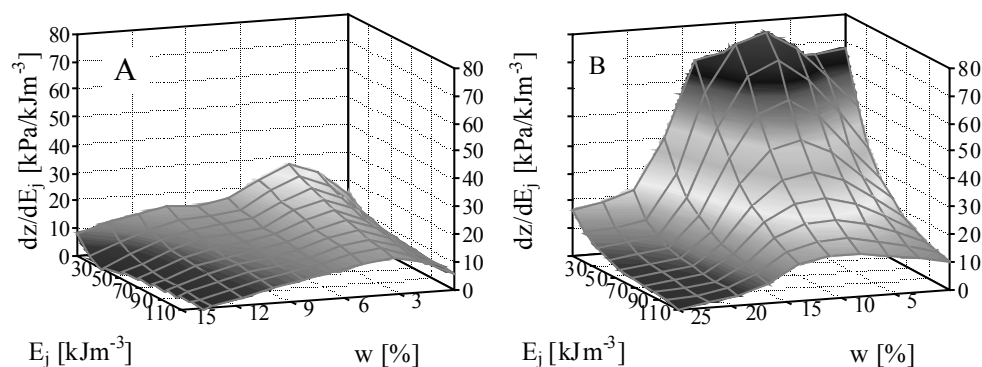
Stwierdzono, że w początkowym okresie zagęszczania gleby gliniastej ciężkiej gradienty zwięzłości są ponad dwukrotnie większe od tych, jakie obserwuje się dla piasku słabogliniastego (rys. 3). Jednocześnie można zauważyć zdecydowanie wyższy spadek wartości gradientów przy wzroście energii zagęszczania tej gleby. Porównywalne wartości gradientów badane gleby osiągają przy jednostkowej energii zagęszczania wynoszącej około 110 kJm^{-3} . Opiswane tendencje determinują większe krzywizny przebiegu zwięzłości dla gliny ciężkiej i skutkują osiągnięciem niższych wartości prognozowanych zwięzłości maksymalnych w zakresie wilgotności użytecznych (rys. 4A).

Tabela 2. Estymatory parametrów równania $z=f(E_j)$ i wyniki testów statystycznych

Table 2. Estimators of equation $z=f(E_j)$ parameters, and results of statistical tests

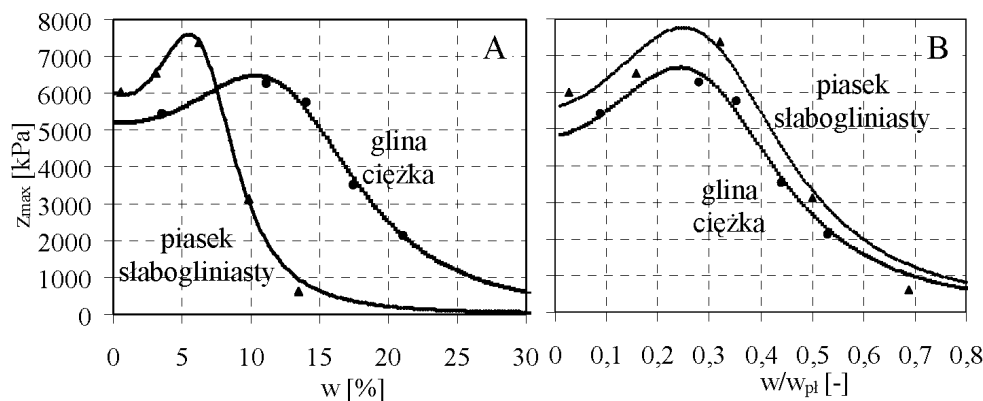
Gatunek gleby	Wilgotność [%]	Parametry równania $z=f(E_j)$				Wartości statystyk		
		A_1	A_2	A_3	A_4	R^2	Błąd standardowy	Wartość funkcji testowej F
Piasek słabogliniasty	0,5	6119	133	0,0063	0,8006	0,9749	58,38	414,25
	3,1	6529	82	0,0046	1,0026	0,9927	52,35	450,44
	6,3	7340	74	0,0029	0,9510	0,9912	45,28	1194,95
	9,8	3129	61	0,0069	0,9367	0,9969	20,96	3404,19
	13,5	616	58	0,0394	0,9855	0,9796	24,88	511,23
Gлина ciężka	3,5	5456	88	0,0047	1,3705	0,9917	105,75	1273,86
	11,1	6289	71	0,0028	1,4996	0,9938	85,93	1696,62
	14,0	5767	80	0,0082	1,1823	0,9934	82,84	1609,27
	17,5	3533	52	0,0277	0,7695	0,9829	60,36	613,03
	21,1	2130	44	0,0593	0,6104	0,9896	30,06	1016,98

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Wpływ wilgotności (w) i jednostkowej energii zagęszczania (E_j) piasku słabogliniastego (A) oraz gliny ciężkiej (B) na gradienty zwięzłości (dz/dE_j)

Fig. 3. The impact of humidity (w) and unit compacting energy (E_j) for loamy sand (A) and heavy clay (B) on compactness gradients (dz/dE_j)



Rys. 4. Wpływ wilgotności (w) – A i proporcji wilgotności do wilgotności granicy płynności (w/w_{pl}) – B na wartości zwięzłości maksymalnych (z_{max})

Fig. 4. The impact of humidity (w) – A and proportion of humidity to liquid limit humidity (w/w_{li}) – B on maximum compactness values (z_{max})

Wpływ wilgotności na przebiegi gradientów zwięzłości (rys. 3) i zwięzłości maksymalnych (rys. 4A) jest niejednoznaczny i jakościowo podobny do przebiegów gęstości objętościowej [Walkowiak 2000], ponieważ w przypadku obu gleb wzrost wilgotności powoduje początkowo wzrost, a następnie spadek wartości tych wielkości. Analizując przebiegi gradientów zwięzłości (rys. 3) można również zauważyć, że wilgotności, przy których występują najwyższe gradienty, są niezależne od wartości jednostkowej energii zagęszczania.

W celu przeprowadzenia analizy ilościowej przebiegów gradientów zwięzłości i zwięzłości maksymalnych poszukiwano funkcji z poziomą asymptotą $0 = \lim_{w \rightarrow \infty} f(w)$ spełniającej warunek dwufazowego przebiegu. Opisywane warunki spełnia funkcja o ogólnej postaci:

$$y^{-1} = a + b \cdot x^2 \cdot \ln x + c \cdot x^3 \quad (4)$$

Aproksymację przebiegów zwięzłości maksymalnej w zależności od wilgotności i proporcji wilgotności do wilgotności granicy płynności zilustrowano na rys. 4A i 4B. Uzyskane wartości współczynników równań przedstawiono w tab. 4. W obu przypadkach stwierdzono istotną wartość współczynników korelacji przy 3 stopniach swobody. Wyznaczenie wilgotności, przy których można się spodziewać zarówno najwyższych zwięzłości, jak i najwyższych gradientów zwięzłości wymagało zróżniczkowania i przyrównania do zera równania (4). Poszukiwane ekstrema wyznaczono rozwiązując metodami numerycznymi nieliniowe równanie:

$$b \cdot (2 \cdot \ln x + 1) + 3 \cdot c \cdot x = 0 \quad (5)$$

Wpływ energii...

Tabela 4. Współczynniki równań $z_{\max}=f(w)$ i $z_{\max}=f(w/w_{pl})$ dla piasku słabogliniastego (p.s.) i gliny ciężkiej (g.c.)

Tabela 4. Coefficients of equations $z_{\max}=f(w)$ and $z_{\max}=f(w/w_{li})$ for loamy sand (l.s.) and heavy clay (h.c.)

Funkcja	Gatunek gleby	Współczynnik			R ²	Błąd standardowy
		a	b	c		
$z_{\max}=f(w)$	p.s.	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$-4,86 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$	0,9964	238,59
	g.c.	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$-7,82 \cdot 10^{-7}$	$1,43 \cdot 10^{-7}$	0,9925	212,17
$z_{\max}=f(w/w_{pl})$	p.s.	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$9,87 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	0,9703	683,64
	g.c.	$2,07 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	0,9834	316,62

Obliczone wilgotności, przy których występują najwyższe gradienty zwięzłości oraz maksymalne zwięzłości, wynoszą w przybliżeniu dla gleby piaszczystej słabogliniastej i gliniastej ciężkiej odpowiednio 5,5% i 10,3% i są niższe od optymalnych wilgotności zagęszczania (tab. 1). Niższe wilgotności, przy których występują ekstrema można przypisać faktowi nakładania się czynników determinujących wpływ wilgotności na przebieg zagęszczania [Walkowiak 2000] i zmienności parametrów towarzyszących pomiarowi zwięzłości. Stwierdzono, że proporcje wilgotności, przy których występują najwyższe gradienty zwięzłości i zwięzłości maksymalne, do wilgotności odpowiadającej granicy płynności, są zbliżone dla obu gleb i wynoszą 0,2494 dla piasku słabogliniastego i 0,2437 dla gliny ciężkiej.

Wnioski

1. Model regresji oparty na funkcji MMF pozwala na prognozowanie z dużą dokładnością zwięzłości gleb piaszczystej słabogliniastej i gliniastej ciężkiej w oparciu o jednostkową energię zagęszczania, ponieważ współczynniki determinacji są wyższe od 0,9749 a błędy standardowe nie przekraczają 105,75 kPa.
2. W zakresie wilgotności użytecznych gleba piaszczysta słabogliniasta charakteryzuje się ponad dwukrotnie niższymi jednostkowymi przyrostami zwięzłości w porównaniu z glebą gliniastą ciężką i wyższymi o około 1000 kPa zwięzłościami maksymalnymi.
3. Stwierdzone wilgotności, przy których występują najwyższe gradienty zwięzłości oraz maksymalne zwięzłości, wynoszą w przybliżeniu dla gleby piaszczystej słabogliniastej i gliniastej ciężkiej odpowiednio 5,5% i 10,3% i są niższe od optymalnych wilgotności zagęszczania.
4. Proporcje wilgotności, przy których występują najwyższe gradienty zwięzłości i zwięzłości maksymalne, do wilgotności odpowiadającej granicy płynności, są zbliżone dla gleb piaszczystej słabogliniastej oraz gliniastej ciężkiej i wynoszą odpowiednio 0,2494 i 0,2437.

Bibliografia

- Błaszkiwicz Z.** 1998. Badania rozkładu oporu penetracji gleby lekkiej powodowanego oponami ciągników rolniczych. *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1. s. 5-14.
- Buliński J.** 2006. Problemy ugniatania gleb uprawnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Zeszyt 508. s. 11-20.
- Garciano L. O., Upadhyaya S. K., Jones R. A.** 2007. Determination of the soil pressure distribution around a cone penetrometer, *Journal of Terramechanics*. Volume 44. s. 265-273.
- Kryzstofiak A., Podsiadlowski S.** 1998. Method of calculating tillage unitary energy. The soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures. *Geoforma Ediciones*. Logroño. s. 157-163.
- Morgan P. H., Mercer L. P., Flodin N. W.** 1975. General model for nutritional responses of higher organisms. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 72. s. 4327-4331.
- Pukos A., Walczak R.** 1990 Methodical construction of soil penetrometers as applied to the evaluation of soil compaction, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* Nr 388. s.151-161.
- Walkowiak R.** 2000. Modele matematyczne zależności gęstości objętościowej od wilgotności zagęszczania, nacisku i jednostkowej energii zagęszczania dla gleb o różnym rozkładzie granulometrycznym. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Rozprawy Naukowe*. Zeszyt 308. ISSN 0208-8436.
- PN-R-04033. Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne.

THE IMPACT OF COMPACTING ENERGY ON CHANGES IN SOIL COMPACTNESS

Abstract. The work presents results of the research on the impact of unit inertial compacting energy on changes in soil compactness. The tests were carried out in laboratory conditions in loose loamy soil and heavy clayey soil in humidity ranges: 0.5 – 13.5% and 13.5 – 21.1%, respectively. Regressive relations between compaction and compacting energy are described by sigmoidal function. It has been observed that humidity values, where highest compactness gradients and maximum compactness values occur, for loamy soil and heavy clayey soil are 5.5% and 10.3%, respectively, and are lower than optimal compaction humidity values.

Key words: soil, compacting energy, compactness

Adres do korespondencji:

Krzysztof Lejman; e-mail: Krzysztof.Lejman@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chelmońskiego 37/41
51-630 Wrocław