

AGROFIZYKA

procesy, właściwości, metody

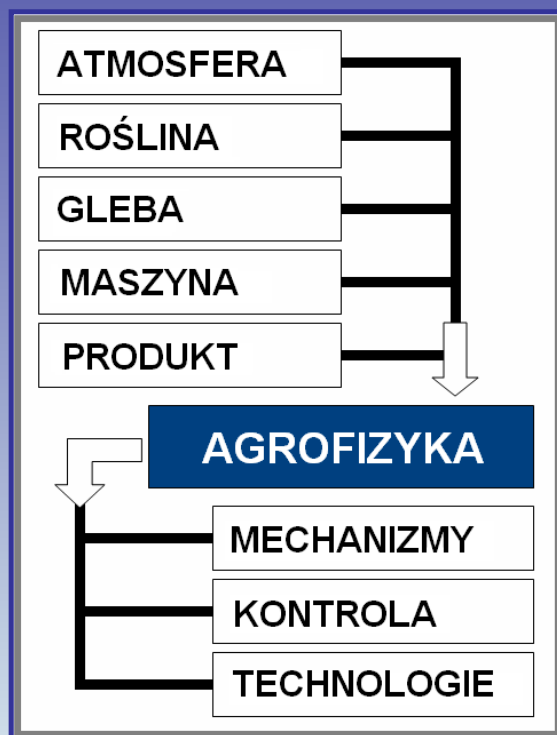
Redakcja:

Jan Gliński

Józef Horabik

Jerzy Lipiec

Cezary Sławiński



AGROFIZYKA

procesy, właściwości, metody

pod redakcją

**Jana Glińskiego, Józefa Horabika,
Jerzego Lipca, Cezarego Sławińskiego**

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

Lublin 2014

Opiniowali do druku:

prof. dr hab. Jerzy Drozd
prof. dr hab. Jerzy Weres

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Wydawnictwo
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin, tel. (81) 744-50-61, www.ipan.lublin.pl

©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2014

Pełny tekst dostępny jest na stronie internetowej IA PAN w Lublinie
<http://www.ipan.lublin.pl/pl/info/wydawnictwa-nieciagle>

ISBN 978-83-89969-34-7

Wydanie I. Nakład 400 egz., ark. 20,6
Projekt okładki: Grzegorz Józefaciuk
Skład komputerowy: Marek Pazur
Druk: *ALF-GRAF*, ul. Abramowicka 6, 20-391 Lublin

„AGROFIZYKA jest nauką traktującą o fizycznych właściwościach i procesach mających wpływ na produkcję roślinną. Głównym celem badań agrofizycznych jest transport masy (wody, powietrza, składników pokarmowych roślin) i energii (światła, ciepła) w układzie gleba-roślina-atmosfera i gleba-roślina-maszyna-produkty roślinne, żywność oraz sposób jego regulacji w celu otrzymania dużej ilości i wysokiej jakości biomasy z zachowaniem zrównoważonego środowiska. Znajomość zjawisk fizycznych w środowisku rolniczym pozwala również na obniżenie strat biomasy podczas jej zbioru, transportu, przechowania i przetwórstwa, a ponadto na efektywniejsze zużycie chemikaliów (nawozów sztucznych, herbicydów, pestycydów) i wody, niezbędnych dla jej produkcji”.

(Encyclopedia of Agrophysics, Springer, 2011)

SPIS TREŚCI

WSTĘP	7
1. AGROFIZYKA – PRZEDMIOT, ZAKRES I OBIEKTY BADAŃ	9
1.1. Przedmiot i zakres badań agrofizycznych	10
Józef Horabik	
1.2. Obiekty badań agrofizycznych	25
Jan Gliński	
2. PROCESY	27
2.1. Gleba jako układ termodynamiczny	28
Krzysztof Lamorski, Cezary Sławiński, Jaromir Krzyszczałak	
2.2. Fizyczna degradacja gleb i jej przeciwdziałanie	32
Jerzy Lipiec, Jerzy Rejman	
2.3. Tlenowe uwarunkowania melioracji wodnych gleb uprawnych	57
Janusz Ostrowski	
2.4. Termodynamiczny opis niektórych procesów w roślinie	66
Bogusława Łapczyńska-Kordon	
2.5. Przenikanie substancji przez błony biologiczne	75
Stanisław Przystański	
2.6. Układ gleba-roślina-atmosfera jako kontinuum	81
Cezary Sławiński, Jaromir Krzyszczałak, Krzysztof Lamorski	
3. WŁAŚCIWOŚCI	89
3.1. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na ich biosferę	90
Małgorzata Brzezińska, Magdalena Frąć	
3.2. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na chemizm gleby	95
Jean Diatta, Witold Grzebisz	
3.3. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na efektywność nawożenia roślin uprawnych	104
Witold Grzebisz	
3.4. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na produkcję i emisję gazów glebowych	109
Teresa Włodarczyk	
3.5. Wpływ właściwości fizycznych gleb na wzrost i plonowanie roślin ..	117
Jerzy Lipiec	
3.6. Właściwości fizyczne i technologiczne materiałów roślinnych	131
Barbara Krzysztófik, Paulina Wrona	
3.7. Wpływ fizycznych właściwości materiałów roślinnych na ograniczanie ich strat ilościowych i jakościowych	140
Barbara Krzysztófik, Paulina Wrona	

3.8.	Właściwości mechaniczne ziarna zbóż	151
	Jarosław Frączek, Zbigniew Ślipek	
3.9.	Tarcie materiałów roślinnych	162
	Jarosław Frączek, Zbigniew Ślipek	
3.10.	Właściwości biomasy przeznaczonej na cele energetyczne	175
	Jarosław Frączek, Zbigniew Ślipek	
4.	METODY	185
4.1.	Metody statystyczne w agrofizyce	186
	Elżbieta Skórska	
4.2.	Fizyczne metody badania gleb i środowiska przyrodniczego	197
	Wojciech Skierucha, Andrzej Wilczek, Anna Szyplowska	
4.3.	Modelowanie procesów fizycznych zachodzących w środowisku glebowym	210
	Cezary Sławiński, Piotr Baranowski, Krzysztof Lamorski, Jaromir Krzyszczyk	
4.4.	Metody luminescencyjne w badaniach środowiska glebowego i roślin	213
	Aleksander Brzóstowicz	
4.5.	Zastosowanie metod luminescencyjnych w badaniach materii organicznej gleb i osadów dennych	217
	Dorota Gołębiowska, Lilla Mielnik, Romualda Bejger, Mariola Sienkiewicz	
4.6.	Zastosowanie metod luminescencyjnych w badaniach roślin	225
	Antoni Murkowski, Renata Matuszak-Slamani, Andrzej Gawlik, Andrzej Mila	
4.7.	Fizyczne metody oceny jakości surowców roślinnych i produktów żywnościowych	230
	Dorota Witrowa-Rajchert, Artur Zdunek, Paulina Wrona, Barbara Krzysztofik	
4.8.	Modelowanie procesów suszenia biomasy	243
	Bogusława Łapczyńska-Kordon	
4.9.	Modelowanie geometrii 3D obiektów roślinnych	253
	Leszek Mieszkalski	
4.10.	Modelowanie właściwości mechanicznych tkanek roślinnych	273
	Artur Zdunek, Piotr M. Pieczywek	
4.11.	Metody badań i skutki uszkodzeń ziarna roślin uprawnych	278
	Stanisław Grundas	
5.	SUMMARY	288

WSTĘP

Rolnictwo jest to jedna z najstarszych i najważniejszych dziedzin działalności człowieka (uprawa roli) nastawiona na dostarczanie mu żywności i surowców pochodzących z produkcji polowej biomasy.

Początkowo, przy niewielkiej populacji ludności, rolnictwo opierało się na wykorzystywaniu warunków naturalnych (gleby, klimatu) do pozyskiwania niezbędnych płodów rolnych. Wraz ze wzrostem liczby ludności zaistniała potrzeba wykorzystania osiągnięć w zakresie nauk podstawowych do zwiększania produkcji rolniczej. Wykorzystano w tym celu szczególnie osiągnięcia w chemii i biologii, które dały podstawę do powstania takich dyscyplin, jak agrochemia i agrobiologia.

Pełne wykorzystanie wymienionych nauk okazało się jednak ograniczone wymogami ochrony środowiska przed nadmierną chemizacją, erozją, zagęszczeniem gleby. Wzrosły ponadto oczekiwania dotyczące poprawy jakości i obniżenia strat płodów rolnych, produkcji i przetwarzania surowców biologicznych dla celów konsumpcji, postępu mechanizacji rolnictwa i sprostania rozwojowi nowoczesnych technologii opartych na monitorowaniu procesów fizycznych.

Zwrócono więc uwagę na kolejną dyscyplinę nauk podstawowych, jaką jest fizyka, co dało początek do wyodrębnienia nowej dyscypliny nauki o charakterze interdyscyplinarnym – **agrofizyki**, stojącej na pograniczu fizyki i biologii oraz nauk podstawowych i stosowanych.

Instytucjonalnie, agrofizyka pojawiła się w chwili powstania Instytutu Agrofizyki w St. Petersburgu w 1933 roku. Jej dynamiczny rozwój w Polsce nastąpił po roku 1968 z chwilą utworzenia, w ramach Polskiej Akademii Nauk, Instytutu Agrofizyki w Lublinie. W oparciu o tę placówkę pojawiły się specjalistyczne czasopisma: *Problemy Agrofizyki* i *Acta Agrophysica* wydawane w języku polskim, *International Agrophysics* – kwartalnik wydawany w języku angielskim i wielka *Encyclopedia of Agrophysics* (ponad 1 000 stron), wydana przez wydawnictwo Springer. Podobne opracowanie, w skróconej formie pod tytułem *Agrophysics – physics in agriculture and environment* autorów J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec, ukazało się w *Soil Science Annual*, 2013, 64, 2, 67-80.

Przedmiot „Agrofizyka” lub „Fizyka z elementami agrofizyki” jest wykładany na wyższych uczelniach i jest wspierany cennymi podręcznikami związanymi z agrofizyką prof. Stanisława Przetalskiego z obszernym materiałem podstaw fizyki. Brak jest jednak pozycji pokazującej praktyczne zastosowania praw fizycznych i nowoczesnych metod pomiarowych w rolnictwie i środowisku przyrodniczym.

Tę lukę stara się uzupełnić niniejsza książka, w której redagowaniu uczestniczyło 37 autorów, z których 16 to pracownicy Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie, a 19 są wykładowcami przedmiotu „agrofizyka” w uczelniach wyższych Krakowa, Poznania, Szczecina, Warszawy i Wrocławia. Autorzy przedstawiają wybrane zagadnienia dotyczące:

- definicji i zakresu badań agrofizycznych obejmujących różne obiekty rolnicze i środowiska przyrodniczego oraz metody ich badania i oceny;
- procesów fizycznych zachodzących w środowisku glebowym i w materiałach roślinnych, wpływających na ich jakość;
- modelowania agrofizycznych procesów i właściwości.

Książka ta jest przeznaczona dla wykładowców i studentów realizujących program agrofizyki w uczelniach wyższych, dla których ma ona stanowić uzupełnienie treści programu o elementy praktyczne, wynikające ze znajomości agrofizyki, ale również powinna być przydatna praktykom rolnictwa i ochrony środowiska przyrodniczego.

Słowa kluczowe: agrofizyka, zastosowanie, rolnictwo, środowisko przyrodnicze

1. AGROFIZYKA – PRZEDMIOT, ZAKRES I OBIEKTY BADAŃ

1.1. Przedmiot i zakres badań agrofizycznych

Józef Horabik

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

„Fizyka jest nauką przyrodniczą najbardziej podstawową i wszechogarniającą, wpływ zaś jej na rozwój innych nauk przyrodniczych był i jest ogromny. Właściwie fizyka odgrywa dziś rolę tego, co dawniej nazywano filozofią przyrody i z czego zrodziły się współczesne nauki przyrodnicze. Specjaliści z różnych dziedzin uczą się fizyki ze względu na zasadniczą rolę jaką odgrywa ona w zrozumieniu wszystkich zjawisk” (Feynman i in. 1974). R.P. Feynman, laureat nagrody Nobla w dziedzinie fizyki, stwierdza, że fizyka jest dziedziną nauki wspomagającą wiele innych dziedzin, a w praktyce prawie wszystkie nauki przyrodnicze. Przykładem takich interdyscyplinarnych dziedzin, w których wykorzystuje się metody fizyki, są: biofizyka, geofizyka, astrofizyka, fizyka medyczna oraz agrofizyka.

Fizyka jest nauką o właściwościach materii i o zjawiskach. W odróżnieniu od innych dyscyplin przyrodniczych fizyka zajmuje się badaniem najbardziej ogólnych cech i form ruchu materii. Właściwości fizyczne określone są jako niezależne od obserwatora, mierzalne i wyrażane ilościowo charakterystyki opisywanego materiału, definiujące stan materiału bez wskazywania w jaki sposób stan ten został osiągnięty. Zjawiska fizyczne to zmiany i procesy zachodzące w przyrodzie.

Wielkości fizyczne, ich pomiar i jednostki

Podstawową metodą badań w fizyce są obserwacje zjawisk i przeprowadzanie eksperymentów. Na podstawie zebranych danych są znajdowane zależności i związki przyczynowe, które wyraża się w postaci równań matematycznych wiążących wielkości fizyczne. W ten sposób formułuje się prawa fizyczne. Zbiór logicznie powiązanych praw tworzy teorię. Fundamentalne prawa, na których opiera się pewna teoria, są nazywane zasadami (Bobrowski 1999).

Wielkością fizyczną nazywa się taką własność ciała lub zjawiska, którą można porównać ilościowo z taką samą własnością innego ciała lub zjawiska. Pomiar wielkości fizycznej polega na wyznaczeniu liczbowego stosunku danej wielkości do wielkości tego samego rodzaju, przyjętej za jednostkę. Wielkości fizyczne muszą być jednoznacznie określone. Definicja nowej, nieznannej wielkości wyraża ją za pomocą wielkości uprzednio już zdefiniowanych. Zawsze jednak pozostaje pewna liczba wielkości, których nie można w ten sposób zdefiniować. Wielkości

takie nazywamy podstawowymi. Są one określane przez podanie sposobu ich pomiaru. Wszystkie inne wielkości, określane za pomocą wielkości podstawowych, nazywamy wielkościami pochodnymi.

Aby móc liczbowo wyrażać wielkości fizyczne, każda z nich musi mieć określoną jednostkę. Po ustaleniu podstawowych wielkości fizycznych i ich jednostek, jednostki wielkości pochodnych definiuje się za pomocą jednostek podstawowych, jako odpowiednią ich kombinację. Najczęściej używanym układem jednostek jest układ SI, który ma siedem jednostek podstawowych i dwie jednostki uzupełniające (Tab. 1.1.1).

Tabela 1.1.1. Wielkości podstawowe i uzupełniające i ich jednostki w układzie SI

Lp.	Wielkość	Jednostka	Symbol jednostki
Wielkości podstawowe			
1	Długość	metr	m
2	Masa	kilogram	kg
3	Czas	sekunda	s
4	Liczność materii (ilość substancji)	mol	mol
5	Natężenie prądu elektrycznego	amper	A
6	Temperatura termodynamiczna	kelwin	K
7	Światłość	kandela	cd
Wielkości uzupełniające			
8	Kąt płaski	radian	rad
9	Kąt bryłowy	steradian	sr

Procesy fizyczne istotne dla agrofizyki

Zjawiska fizyczne zachodzące w organizmach żywych, stanowią przedmiot biofizyki. Granice między biofizyką a agrofizyką nie zawsze są ostre. Tam, gdzie badania fizyczne dotyczą organizmów żywych, różnice mają jedynie charakter umowny (Przestalski 2001).

Autonomiczną domeną agrofizyki są badania fizyczne procesów zachodzących w układach glebowych, badania właściwości fizycznych surowców i produktów rolniczych, a także badania wpływu na organizmy żywe (rośliny, zwierzęta) czynników fizycznych takich jak, promieniowanie elektromagnetyczne, korpuskularne czy też oddziaływania ultradźwięków.

Bardzo często zdarza się, że badania tego samego obiektu, ale prowadzone w różnej skali wielkości, są przedmiotem zainteresowania różnych dyscyplin naukowych: chemii (skala atomów, nm), biofizyki (skala komórek), fizyki (mm) bądź inżynierii (m). Wypadkowe oddziaływania nie są zazwyczaj prostą sumą

oddziaływań zachodzących w różnej skali. Nauki przyrodnicze, w tym agrofizyka, stają więc bardzo często przed koniecznością poszukiwania interdyscyplinarnej interpretacji wzajemnych oddziaływań.

Procesy fizyczne będące przedmiotem zainteresowania agrofizyki, przebiegające w sposób naturalny w środowisku przyrodniczym bądź też będące elementami składowymi procesów przetwórczych, charakteryzuje duża różnorodność i zmienność czasowo-przestrzenna, a biorące w nich udział materiały, niejednorodna budowa oraz aktywność biologiczna, stanowi duże utrudnienie ich opisu. W praktyce oznacza to niemożliwość uzyskania dokładnego opisu oraz konieczność czynienia często bardzo znacznych uproszczeń.

Przykład: przepływ wody w profilu glebowym

Przykładem procesu wymagającego uwzględnienia wielu zjawisk oraz poczynienia wielu upraszczających założeń umożliwiających jego opis jest proces wymiany masy i energii w systemie gleba-roślina-atmosfera. Konstruując taki opis korzysta się z praw fizycznych, a także ze stwierdzonych zależności empirycznych (Walczak i Horabik 2000). Podstawowymi zasadami, które muszą być spełnione to zasada zachowania masy i energii układu wyrażona równaniami ciągłości. Opisuąc proces przepływu wody w systemie gleba-roślina-atmosfera należy uwzględnić dodatnie i ujemne źródła wody. Do opisu przepływu wody w profilu glebowym wykorzystuje się zasadę zachowania masy wyrażoną równaniem ciągłości, które dla pola bezźródłowego ma postać:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = 0 \quad (1)$$

a dla pola ze źródłami postać następującą:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = f(\vec{r}, t) \quad (2)$$

Wstawiając do równania ciągłości (2) strumień wody q określony równaniem Darcy mówiącym, że strumień przepływu wody przez glebę jest wprost proporcjonalny do gradientu potencjału (ciśnienia wywołującego przepływ):

$$\vec{q} = K(\Theta) \cdot \text{grad } \Psi \quad (3)$$

otrzymujemy równanie Richardsa w postaci:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\nabla \cdot K(\Theta) \cdot \text{grad } \Psi + F(\vec{r}, t) \quad (4)$$

gdzie:

q – strumień wody,

$K(\Theta)$ – współczynnik przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej,

Θ – wilgotność,

Ψ – potencjał wody glebowej,

$F(r,t)$ – funkcja źródłowa (np. pobór wody przez korzenie roślin, nawadniająco – odwadniające systemy drenażowe).

Do rozwiązania równania Richardsa potrzebna jest znajomość podstawowych charakterystyk hydrofizycznych gleby: zależność pomiędzy potencjałem wody glebowej a wilgotnością $\Psi(\Theta)$ (krzywa retencji wodnej) oraz zależność między współczynnikiem przewodnictwa wodnego a wilgotnością $K(\Theta)$, warunkująca ruch wody w glebie. Należy pamiętać, że uzyskane rozwiązania są zawsze tylko uproszczeniami modelowymi, których dokładność zależy od dokładności wodnych charakterystyk gleby, a ponadto nie jest jednakowa w całym zakresie zmienności parametrów (Sławiński 2003).

Właściwości fizyczne

Właściwości fizyczne nierozzerwalnie związane są z procesami fizycznymi, których przebieg opisują jako parametry procesu, bądź też wyznaczone są podczas procesu fizycznego przebiegającego w ściśle kontrolowanych warunkach. W przypadku roślin, płodów rolnych, surowców i produktów żywnościowych bardzo istotne są zarówno procesy fizyczne przebiegające w sposób naturalny w środowisku pola uprawnego, jak również procesy technologiczne związane z uprawą gleby, roślin, zbiorem i wszystkimi kolejnymi etapami uszlachetniania i przetwarzania płodów rolnych aż do produktu finalnego. Wszystkie te etapy produkcji rolniczej kształtują ilość i jakość plonu a więc również produktu finalnego. Stąd też powstaje potrzeba spojrzenia na właściwości fizyczne poprzez pryzmat wszystkich procesów fizycznych towarzyszących w produkcji rolniczej, w przebiegu których właściwości te odgrywają istotną rolę.

W przypadku materiałów roślinnych oraz płodów rolnych właściwości fizyczne opisują unikalne reakcje materiału na fizyczne wymuszenia np. w procesach mechanicznych, cieplnych czy elektrycznych. Wiedza o fizycznych właściwościach jest podstawą projektowania urządzeń do obróbki, składowania, przetwarzania. Stanowi podstawową wiedzę niezbędną do modelowania zachowania

się materiałów oraz ich jakości w okresie poprzedzającym zbiór, w okresie zbioru oraz podczas obróbki pozbiorowej.

Właściwości fizyczne zależą od wielu czynników takich jak wilgotność, miejsce uprawy, rok uprawy, czy odmiana. Ponadto większość właściwości fizycznych ulega zmianie podczas procesów, do opisu których są stosowane.

Morfologiczny i fizyczny stan materiałów pochodzenia roślinnego decyduje o doborze właściwych parametrów wielu procesów technologicznych. Szczegółowy opis tego stanu pomaga przy modelowaniu procesów roboczych, a w dalszej kolejności przy ich optymalizacji. Właściwości fizyczne płodów rolnych to cechy typowe, charakterystyczne dla danego gatunku. Ponieważ obiekty nauk rolniczych (gleby, rośliny, surowce, produkty, przetwory) znacznie odbiegają swoją specyfiką od tych, którymi zajmują się fizyka i chemia, metody pomiaru właściwości fizycznych materiału glebowego i roślinnego nie mogą być przenoszone wprost z fizyki, materiałoznawstwa technicznego czy wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych. Ograniczenie to stawia przed badaczami trudne wymagania dostosowania metod przejętych z innych dziedzin nauki bądź opracowania własnych oryginalnych metod badawczych. Środowisko nauk rolniczych wypracowywało więc również własne narzędzia badań, dostosowane do specyfiki materiałów rolniczych. W tym obszarze dość duże osiągnięcia posiada metrologia agrofizyczna proponująca metody pomiarowe dostosowane do badanych obiektów bądź własne oryginalne rozwiązania metodyczne oraz aparaturowe (Rajchew i in. 2009, Skierucha 2008, Zdunek i in. 2009).

Przykład: mechanika kontaktu – model Hertza oraz model JKF

Wiele materiałów rolniczych ma charakter dyskretny. Piasek, ziarno, zgranulowane produkty to najprostsze przykłady materiałów. W dużym uproszczeniu można przyjąć, że oddziaływania mechaniczne między elementami takiego złoża mają charakter punktowy. Podstawą opisu mechaniki takich materiałów jest rozpatrywanie oddziaływań sprężystych, lepkich czy też plastycznych. Głównym obszarem zainteresowania mechaniki kontaktu jest ciśnienie oraz adhezja w obszarze kontaktu. Punktem wyjścia tych analiz jest opracowany przez Hertza (Timoshenko i Goodier 1934) model kontaktu idealnie sprężystej kuli z płaską powierzchnią oparty na następujących założeniach:

- odkształcenia są małe i nie wykraczają poza granicę sprężystości,
- promień kontaktu jest bardzo mały w porównaniu do promienia ciała,
- powierzchnia jest gładka,
- brak tarcia w obszarze kontaktu.

Przy tych założeniach zależność siły w obszarze kontaktu od zagłębienia kuli w płaską powierzchnię przedstawia następująca zależność:

$$F = \frac{4}{3}ER^{1/2}x^{3/2} \quad (5)$$

gdzie:

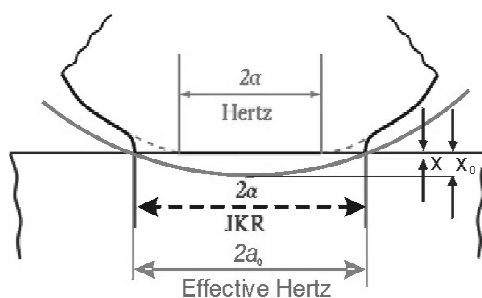
F – siła sprężystego odpychania w punkcie kontaktu,

E – moduł sprężystości Younga,

R – promień kuli,

x – zagłębienie.

W rzeczywistości powierzchnia kontaktu jest szorstka, kontakt nie jest idealnie sprężysty, a w jego obszarze oprócz sił sprężystości działają również siły adhezji, których źródłem mogą być siły van der Waalsa, siły elektrostatyczne, mostki cieczowe, siły kapilarne. Aby uwzględnić oddziaływania adhezyjne w modelu kontaktu Hertza Johnson, Kendall i Roberts (1971) sformułowali teorię, zwaną teorią adhezyjnego kontaktu JKR, poprzez zbalansowanie zmagazynowanej energii odkształcenia sprężystego oraz rozpraszanej energii oddziaływań powierzchniowych.



Rys. 1.1.1. Model kontaktu Hertza oraz model JKR: a – promień kontaktu Hertza, a (linia przerywana) – promień kontaktu JKR, a_0 – efektywny promień kontaktu Hertza

W modelu kontaktu JKR rzeczywiste względne zagłębienie x związane jest z zagłębieniem efektywnego modelu Hertza x_0 następującą zależnością (Rys. 1.1.1):

$$x = x_0 - \left(\frac{2\pi\Gamma}{E}\right)^{1/2} (Rx_0)^{1/4} \quad (6)$$

gdzie Γ jest gęstością energii powierzchniowej.

Przyłożona w obszarze kontaktu siła zewnętrzna F_{jkr} jest wyrażona poprzez siłę oddziaływania, jaka zaistniałaby w efektywnym kontakcie Hertza, o zagłębieniu x_0 , pomniejszoną o składową oddziaływań adhezyjnych:

$$F_{jkr} = \frac{4}{3} ER^{1/2} x_0^{3/2} - (8\pi E \Gamma)^{1/2} R^{3/4} x_0^{3/4} \quad (7)$$

Siła rozciągająca P_c , przy której nastąpi oddzielenie ciał, zależy od gęstości energii powierzchniowej Γ oraz od promienia kuli R :

$$P_c = \frac{3}{2} \pi \Gamma R \quad (8)$$

Przedstawiony model wskazuje jak bardzo złożony, a równocześnie bardzo wyidealizowany, jest opis samych oddziaływań w obszarze kontaktu. Chcąc przejść od pojedynczego kontaktu do złoża materiału można zastosować bardzo dynamicznie rozwijającą się ostatnio Metodę Elementów Dyskretnych pozwalającą na wyznaczenie trajektorii ruchu wszystkich cząstek układu i ich wzajemnych oddziaływań. Symulacje takie muszą jednak bazować na właściwie dobranych modelach kontaktu oraz wiarygodnych parametrach materiałowych niezbędnych do kalibracji oraz weryfikacji (Sykut i in. 2008, Usowicz i in. 2006).

Metody doświadczalne

Zastosowanie fizycznych metod badań do rozwiązywania zagadnień związanych z produkcją rolniczą otworzyło nowe możliwości badawcze, a tym samym zupełnie nowe możliwości ograniczania strat wynikających z niewłaściwej oceny wpływu stosowanych technologii zbioru, przetwarzania i obróbki płodów rolnych.

Wśród metod doświadczalnych należy wymienić metody spektroskopowe, dostępne praktycznie w pełnym zakresie widma elektromagnetycznego – od termografii do rentgenografii i mikrotomografii, elektrometryczne – potencjometryczne, amperometryczne czy jonometryczne, spektroskopię dielektryczną, czy emisję akustyczną. Szczególnie przydatne okazały się nowe metody szybkiego i dokładnego określania jakości płodów rolnych bazujące na pomiarze wielu właściwości fizycznych, które korelują dobrze ze wskaźnikami jakości badanych materiałów. Metody optyczne, akustyczne, ultradźwiękowe, elektryczne, metody oparte o diagnostykę rentgenowską, magnetyczny rezonans jądrowy i wspomagane komputerową analizą obrazu umożliwiają szybką, nieniszczącą ocenę jakości płodów rolnych, stadium dojrzałości, składu chemicznego oraz detekcję uszkodzeń wewnętrznych. Szczególnie dużymi możliwościami charakteryzują się metody optyczne. Wykorzystanie rozpraszania światła laserowego do oceny rozkła-

du wielkości cząstek, dojrzałości owoców, jakości mięsa czy stadium dojrzałości sera to przykłady uniwersalności metod optycznych. Cenną zaletą bardzo wielu metod fizycznych jest to, iż są one niedestrukcyjne i zapewniają krótki czas analizy (Baranowski i in. 2009, Bieganowski i in. 2010, Skierucha i Wilczek 2010, Zdunek i in. 2010).

Niezwykle dynamiczny rozwój eksperymentalnych fizycznych metod badań sprawił, że pojawiły się zupełnie nowe, niedostępne jeszcze niedawno obszary badań podstawowych oraz stosowanych. Fizyczne metody badań dostarczają opisu procesów oraz właściwości fizycznych roślin i płodów rolnych podczas wegetacji, zbioru, transportu, przechowywania oraz przetwarzania. Pozwalają na opracowywanie innowacyjnych technologii uprawy, zbioru i przetwarzania. Jakość surowców rolniczych kształtowana jest na wszystkich etapach produkcji rolniczej, począwszy od warunków środowiskowych, poprzez właściwy dobór warunków uprawy, zbioru, składowania, obróbki, przetwarzania aż do produktu końcowego. Na wszystkich tych etapach niezbędna jest szeroka wiedza o właściwościach fizycznych środowiska, roślin, płodów rolnych, przetworów, produktu końcowego.

Historia agrofizyki

Potrzebę szerszego wprowadzenia fizyki do nauk rolniczych dostrzegł już w latach pięćdziesiątych prof. Bohdan Dobrzański, członek rzeczywisty PAN – pomysłodawca, inicjator i organizator Zakładu Agrofizyki PAN. Dostrzegając korzyści płynące z powstawania nauk interdyscyplinarnych, a jednocześnie wyczerpujące się możliwości interpretacyjne klasycznego podejścia do nauk rolniczych przewidział potrzebę i nowe możliwości płynące z szerokiego wykorzystania osiągnięć naukowych fizyki do rozwiązywania zagadnień, jakie stawiało przed nauką rolnictwo. Spoglądając z perspektywy minionych 45 lat działalności Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie inicjatywa prof. Bohdana Dobrzańskiego jawi się jako wyjątkowo trafna.

Gwałtowne zmiany, jakie zaszły w rolnictwie w minionym stuleciu, nie miały odpowiedników w historii. Jako symbol tej transformacji często wymienia się ciągnik rolniczy, który zmienił na zawsze tradycyjny sposób uprawy roślin i produkcji żywności. Wdrożenie nowych technologii, intensywne mechanizacja, zastosowanie środków chemicznych, rozwinięta specjalizacja oraz odpowiednia polityka przyczyniły się do gwałtownego wzrostu produkcji rolniczej. Ważnym elementem tego rozwoju było powstanie Instytutu Agrofizyki w Petersburgu i Amerykańskiego Towarzystwa Inżynierii Rolniczej. Ustanowienie w 1910 r. procedur standaryzacyjnych, obejmujących początkowo inżynierię rolniczą, a później również techno-

logię żywności i inżynierię systemów biologicznych, uznawane jest dziś za jedno z najważniejszych osiągnięć Towarzystwa w całym ubiegłym wieku.

Przy olbrzymich korzyściach wynikających z szybkiego tempa zmian w rolnictwie nie do pominięcia są również ich koszty. Wśród najważniejszych wymienić należy degradację gleb, zanieczyszczenie środowiska, pogorszenie warunków życia i pracy, wzrost kosztów produkcji oraz dezintegrację ekonomicznych i społecznych warunków społeczności wiejskiej. Wypracowany w ciągu ostatnich dwóch dekad kierunek rozwoju, nazwany rolnictwem zrównoważonym, integruje trzy główne cele: zachowanie środowiska przyrodniczego, opłacalność ekonomiczną oraz sprawiedliwość społeczną. Rozwój rolnictwa zrównoważonego wymaga uwzględnienia perspektywy systemowej: od skali pojedynczej farmy i lokalnego ekosystemu do wpływu na zmiany w skali lokalnej i globalnej. Systemowego podejścia wymagają także wysiłki podejmowane w obszarze interdyscyplinarnych badań oraz edukacji. Rolnictwo ekologiczne oparte na mechanizmach i prawach rządzących naturą zyskuje również ostatnio coraz większe zainteresowanie, z uwagi na produkcję tzw. bezpiecznej żywności, przy równoczesnej ochronie środowiska przyrodniczego.

Jednym z priorytetowych zagadnień badawczych wymagającym takiego podejścia jest problem zachowania trwałości i produktywności wykreowanych agroekosystemów. Wymaga to stosowania bardzo precyzyjnych metod badawczych, w tym przede wszystkim metod fizycznych. Bez intensywnego wsparcia ze strony agrofizyki, wyposażonej w narzędzia i metody badawcze nauk ścisłych, sprostanie wyzwaniom, przed którymi staje współczesne rolnictwo, byłoby bardzo trudne.

Początkowo agrofizyka koncentrowała się głównie na badaniu gleb i materiałów roślinnych. W miarę upływu czasu rozszerzał się stopniowo obszar badawczy obejmując z jednej strony coraz więcej elementów systemu gleba-roślina-atmosfera, a z drugiej coraz więcej etapów procesu produkcji surowców roślinnych na cele żywnościowe i nieżywnościowe. Agrofizyka zaczęła też być przydatna w szeroko pojętej ochronie środowiska poprzez udział w badaniach nie tylko degradacji gleb uprawnych, ale również terenów zabagnionych w aspekcie powstawania i emisji gazów cieplarnianych.

Dynamicznie rozwijające się rolnictwo, przemysł przetwórczy, technologia żywności, a w ostatnich latach również energetyka odnawialna oparta na biomasie, wymaga precyzyjnego opisu parametrów materiałowych przetwarzanych materiałów rolniczych. Jest to niezbędne do uzyskiwania półproduktów i produktów coraz wyższej jakości przy ograniczonych nakładach energetycznych. Racjonalne zasady projektowania oraz użytkowania systemów technicznych stosowanych w nowoczesnej produkcji rolniczej i przetwórstwie żywności bazują coraz

szerzej na precyzyjnych informacjach o właściwościach poddawanego obróbce materiału roślinnego.

Agrofizyka, jako dyscyplina nauki, była często utożsamiana z prowadzoną działalnością naukową. Wraz z jej rozwojem zmieniała się definicja agrofizyki. Terminu tego używano też do określania zakresu nauczania fizyki na uczelniach rolniczych. Mimo, że historia agrofizyki jest krótka, ewoluowała ona bardzo szybko i dziś wybiega daleko poza zagadnienia, którym klasycznie przypisywano przedrostek *agro*. Najogólniej ujmując, przez agrofizykę rozumie się zbiór tych elementów nauk fizycznych, które stosowane są w badaniach związanych z produkcją i przetwarzaniem wszelkich materiałów pochodzenia biologicznego (Walczak i in. 2003).

Agrofizyka jako interdyscyplinarna specjalność naukowa

Agrofizyka, jako interdyscyplinarna specjalność naukowa, wzbogaca nauki rolnicze o fizyczne i fizykochemiczne metody badawcze i skutecznie wspomaga rozwiązywanie złożonych zagadnień w naukach rolniczych wymagających zastosowania warsztatu nauk ścisłych. Jako integralna część fizyki środowiska koncentruje się m.in. na badaniach w zakresie rolniczego wykorzystania terenu oraz produkcji żywności. W obszarze zainteresowania agrofizyki leżą procesy fizyczne oraz właściwości materiałów istotne dla zrównoważonej produkcji rolniczej oraz nowoczesnych technologii przetwórczych, a zwłaszcza oddziaływania fizyczne i fizykochemiczne zachodzące w układach: gleba-roślina-atmosfera oraz gleba-roślina-maszyna-owoce i produkty rolne, ze szczególnym uwzględnieniem stanu środowiska oraz jakości surowców i produktów przeznaczonych na cele żywnościowe i nieżywnościowe.

Agrofizyka od swego początku bardzo intensywnie korzystała z warsztatu naukowego i dorobku nauk ścisłych – fizyki i matematyki. Postęp w fizycznych metodach badań materii, jaki dokonał się na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, umożliwił lepsze zrozumienie właściwości i oddziaływań w obiektach, które są przedmiotem zainteresowania wielu nauk przyrodniczych.

Coraz większe zapotrzebowanie na badania teoretyczne oraz interdyscyplinarną interpretację pozwalającą na pogłębione wyjaśnianie złożonych oddziaływań spowodowało w ostatnich latach intensywne poszukiwania w zakresie modelowania procesów zachodzących w układach fizycznych, chemicznych i biologicznych związanych z produkcją rolniczą.

Modelowanie dokonuje pewnej idealizacji układu rzeczywistego uwzględniając tylko te oddziaływania, które odgrywają według nas istotną rolę. W zależności od sposobu opisu rozważanego procesu modele mogą być podzielone na: rzeczywiste, analogowe, teoretyczne fizyczno-matematyczne bądź fenomenologiczne.

Rozwój metod matematycznego modelowania (modele fizyczne, empiryczne, FEM, DEM, SSN) jaki dokonał się w ostatnich kilku dekadach sprawił, że symulowanie procesów fizycznych zachodzących w środowisku oraz podczas procesów produkcyjnych zmierzające do określenia wartości parametrów optymalnych dla danego procesu stało się dużo łatwiejsze.

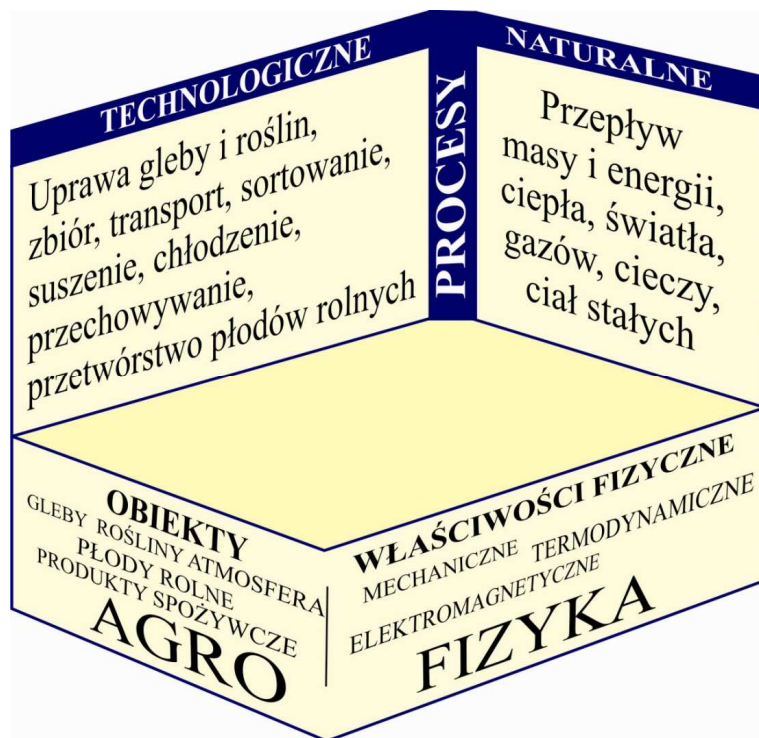
Monitoring, obok modelowania, jest drugą podstawową metodą badawczą stosowaną w naukach przyrodniczych, w tym w agrofizyce. Systemy pomiarowe i monitoring są podstawowymi narzędziami poznania świata materialnego. Wiedza o zmienności wielkości fizycznych jest podstawą do formułowania praw rządzących przyrodą oraz budowania i weryfikacji modeli opisujących przyrodę. Do wyznaczania parametrów fizycznych modeli niezbędne są specjalne systemy pomiarowe.

Modelowanie i monitoring to dwie metody badawcze mające charakter uniwersalny. Dotyczą wszystkich dyscyplin mieszczących się w zakresie nauk przyrodniczych stanowiąc nowoczesny i skuteczny warsztat badawczy. Są nierozrwalne i wzajemnie się uzupełniają. Modele umożliwiają symulację procesów i przewidywanie zachowania się procesów i obiektów w przyszłości, prowadzenie eksperymentów myślowych i numerycznych. Zastępują długie, żmudne i kosztowne badania eksperymentalne. Monitoring natomiast daje informacje historyczne o systemach, o ich aktualnym stanie, a dane aktualne wstawiane do modeli predykcyjnych zwiększają ich zdolność przewidywania.

Właściwości fizyczne nierozrwalnie związane są z procesami fizycznymi, których przebieg opisują jako parametry procesu, bądź też wyznaczone są podczas procesu fizycznego przebiegającego w ściśle kontrolowanych warunkach. W przypadku roślin, płodów rolnych, surowców i produktów żywnościowych bardzo istotne są zarówno procesy fizyczne przebiegające w sposób naturalny w środowisku pola uprawnego, jak również procesy technologiczne związane z uprawą gleby, roślin, zbiorem i wszystkimi kolejnymi etapami uszlachetniania i przetwarzania płodów rolnych aż do produktu finalnego. Wszystkie te etapy produkcji rolniczej kształtują ilość i jakość plonu, a w dalszej kolejności również produktu finalnego. Stąd też powstaje potrzeba spojrzenia na właściwości fizyczne poprzez pryzmat wszystkich procesów fizycznych uczestniczących w produkcji rolniczej, w przebiegu których właściwości te odgrywają istotną rolę (Horabik 2013). W tabeli 1.1.2 zebrano główne procesy i właściwości fizyczne wskazując jednocześnie ich wpływ na glebę, roślin oraz surowce i produkty żywnościowe. Rysunek 1.1.2 przedstawia natomiast zakres badań agrofizycznych.

Tabela 1.1.2. Główne procesy i właściwości fizyczne oraz ich wpływ na glebę, rośliny oraz surowce i produkty żywnościowe (Gliński i in. 2011)

Procesy fizyczne	Właściwości fizyczne	Wpływ na glebę i rośliny	Wpływ na surowce i produkty żywnościowe
Transport masy (woda, para wodna, przepływ powietrza, substancji chemicznych, przepływ kapilarny, dyfuzja molekularna, osmoza)	Przewodnictwo hydrauliczne, dyfuzja wody, pary wodnej, powietrza, substancji chemicznych, przepuszczalność	Woda dostępna dla roślin, wyciek, filtracja, drenaż, nawadnianie, zalewanie, transport substancji chemicznych, emisja gazu z gleby, napowietrzanie, parowanie, oddychanie, erozja, spływ powierzchniowy, zaskorupianie gleby	Chłodzenie, zamrażanie, suszenie, napowietrzanie, oddychanie magazynowe, dojrzewanie magazynowe
Absorpcja/adsorpcja masy (adhezja, kohezja)	Rozkład wielkości cząstek, porowatość, powierzchnia właściwa, zwilżalność	Gromadzenie odpadów, wymiana gazowa, koagulacja, flokulacja, peptyzacja, skurcz gleby	Suszenie, odwadnianie, nawilżanie, składowanie, oddychanie
Transport energii (przewodzenie ciepła, konwekcja, promieniowanie)	Przewodnictwo cieplne, pojemność cieplna, ciepło właściwe	Warunki cieplne	Suszenie, przetwarzanie, gotowanie
Adsorpcja i emisja energii (przewodzenie ciepła, promieniowanie)	Odbicie, absorpcja, dyspersja, składowe koloru, widzenie spektralne	Warunki cieplne, albedo, warunki wzrostu roślin	Suszenie, ogrzewanie, przetwarzanie
Przejścia fazowe (parowanie, kondensacja, krystalizacja, topnienie)	Ciepło utajone	Zamarzanie-rozmarzanie gleby	Zamrażanie, liofilizacja
Procesy mechaniczne (zderzenia, ściskanie, kruszenie, ścinanie, rozciąganie)	Sprężystość, lepkość, plastyczność, twardość, wytrzymałość, gęstość, porowatość	Uprawa gleby, agregacja, zagęszczanie, przejezdność, wyleganie roślin, wschody	Zbiór, obróbka pozbiorowa, czyszczenie, transport, składowanie, przetwarzanie (rozdrabnianie, aglomeracja, mieszanie, separacja)



Rys. 1.1.2. Zakres badań agrofizycznych (Gliński i in. 2011)

Analizując rozwój badań agrofizycznych należy zwrócić uwagę na trzy charakterystyczne elementy:

- poszukiwanie wyjaśnienia badanych zagadnień na gruncie uniwersalnych praw fizyki, chemii i biologii (modelowanie procesów hydro-termo-fizycznych w układzie gleba-roślina-atmosfera wykorzystujące prawa termodynamiki oraz zasady zachowania masy i energii, zastosowanie fizyki statystycznej, mikromechaniki, opisu fraktalnego do zagadnień istotnych dla rolnictwa);
- wykorzystywanie najnowszych zdobyczy nauk ścisłych do rozwiązywania zagadnień rolniczych (zastosowanie teledetekcji do zdalnego pomiaru temperatury radiacyjnej pokrywy roślinnej, metody TDR do pomiaru wilgotności, rozwój metod szybkiego i dokładnego określania jakości produktów rolnych opartych na pomiarze właściwości fizycznych);
- dostosowywanie tematyki badawczej do rozwiązywania aktualnie najistotniejszych zagadnień (ekologia, jakość surowców i produktów spożywczych).

Wiedza o procesach hydro- i termofizycznych zachodzących w układzie gleba-roślina-atmosfera oraz właściwościach fizycznych płodów rolnych i produktów rolniczych zdobyta na drodze badań teoretycznych, a także coraz popularniejszych symulacji komputerowych, poddana gruntownej weryfikacji doświadczalnej, jest przedmiotem zainteresowania wielu specjalności rolniczych. Służy do interpretacji oddziaływań, projektowania, kontroli i optymalizacji procesów. Znajduje szerokie zastosowanie w ochronie środowiska, gleboznawstwie, uprawie roli i roślin, inżynierii rolniczej, technologii rolno-spożywczej i wielu innych.

PIŚMIENNICTWO

- Baranowski P., Mazurek W., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2009. Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography. *Postharvest Biology and Technology*, 53, 91-100.
- Bieganowski A., Ryzak M., Witkowska-Walczak B., 2010. Determination of soil aggregate disintegration dynamic using laser diffraction. *Clay Minerals*, 45, 23-34.
- Bobrowski Cz., 1999. *Fizyka – krótki kurs*. WNT, Warszawa.
- Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M., 1974. *Feynmana wykłady z fizyki*. t. 1, cz. 1, PWN, Warszawa.
- Gliński J., Horabik J., Lipiec J., 2011. *Agrophysics: physics applied to Agriculture*. (Gliński J. i in., red.) *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer, 35-48.
- Horabik J., 2013. Stan badań z zakresu właściwości fizycznych surowców roślinnych w aspekcie ich przetwarzania. W: *Współczesna inżynieria rolnicza – osiągnięcia i nowe wyzwania* (red. R. Hołownicki, M. Kuboń). Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Inżynierii Rolniczej, Kraków, t. III, 127-150.
- Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D., 1971. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proc. R. Soc. London, A*, 324, 301-313.
- Przestalski S., 2001. *Elementy fizyki, biofizyki i agrofizyki*. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Rajchew T., Popandowa S., Pizmanowa S., Arsova A., Sokołowska Z., Hajnos M., Józefaciuk G., 2009. Sposób fizykochemicznej melioracji gleb kwaśnych zanieczyszczonych cynkiem. Patent 193727.
- Skierucha W., 2008. Temperature dependence of time domain reflectometry-measured soil dielectric permittivity. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(2), 186-193.
- Skierucha W., Wilczek A., 2010. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10-500 MHz Frequency Range. *Sensors*, 10(4), 3314-3329.
- Sławiński C., 2003. Wpływ fizycznych parametrów gleby na wartości współczynnika przewodnictwa wodnego (Badania modelowe). *Acta Agrophysica*, 90.
- Sykut J., Molenda M., Horabik J., 2008. DEM simulation of the packing structure and wall load in a 2-dimensional silo. *Granular Matter*, 10, 273-278.
- Timoshenko S.P., Goodier J.N., 1934. *Theory of elasticity*. Mc-Graw-Hill, New York.
- Usowicz B., Lipiec J., Marczewski W., Ferrero A., 2006. Thermal conductivity modelling of terrestrial soil media – A comparative study. *Planetarny and Space Science*, 54, 1086-1095.
- Walczak R.T., Gliński J., Horabik J. 2003. Agrofizyka i jej rola w rozwoju nauk rolniczych. *Acta Agrophysica*, 100, 1-264.

- Walczak R.T., Horabik J., 2000. Fizyczne i matematyczne metody badań w agrofizyce. *Acta Agrophysica*, 37, 253-275.
- Zdunek A., Pytka J., Ranachowski Z., 2009. Sposób i urządzenie do pomiaru kruchości i tekstury owoców i warzyw, zwłaszcza jabłek. Zgłoszenie patentowe P-388443.
- Zdunek, A., Cybulska J., Konopacka D., Rutkowski K., 2010. New contact acoustic emission detector for texture evaluation of apples. *J. Food Engineering*, 99(1), 83-91.

1.2. Obiekty badań agrofizycznych

Jan Gliński

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Obiektami agrofizycznymi nazywa się materiały, które odgrywają ważną rolę w produkcji rolnej. Charakteryzują się one specyficznymi właściwościami fizycznymi i podlegają różnym naturalnym i antropogenicznym procesom. Do ważniejszych obiektów agrofizycznych zalicza się: gleby, przyziemną warstwę atmosfery, rośliny, płody rolne i produkty spożywcze.

Największą grupę wśród obiektów agrofizycznych zajmują **gleby**, stanowiące ośrodek fizycznego umocowania korzeni roślin, magazyn wody i składników pokarmowych niezbędnych dla ich rozwoju i plonowania. Gleby tworzą się ze skał powierzchniowej warstwy skorupy ziemskiej (skały macierzyste) pod wpływem oddziaływania na nie klimatu, szaty roślinnej, rzeźby terenu i czasu. Wymienione czynniki glebotwórcze decydują o właściwościach gleb, mających wpływ na ich klasyfikację typologiczną i zmienność (mozaikę) przestrzenną.

Gleby są wyjątkowo zróżnicowanym, heterogenicznym, dynamicznym, wielofazowym środowiskiem, złożonym z fazy stałej (okruchy skał, minerały, materia organiczna), ciekłej (roztwór wodny) i gazowej (powietrze glebowe) oraz z organizmów żywych. Są one w większości zbudowane na miąższości profilu (do 1,5 m) z kilku mineralnych poziomów genetycznych lub warstw, charakterystycznych dla określonej jednostki typologicznej, z wyróżniającym się wierzchnim, ciemno zabarwionym poziomem akumulacji materii organicznej (próchnicy). Poziom wierzchni stanowi również warstwę orną gleb uprawnych. Niewielki procent stanowią gleby w całości zbudowane z materii organicznej (np. z torfu).

Nad glebą zalega warstwa przyziemnej atmosfery, kształtująca **mikroklimat** pola uprawnego w łanie roślin. Głównymi składnikami tego mikroklimatu są: temperatura, wilgotność powietrza, siła i kierunek wiatru, ilość światła. Ścisłe związane z klimatem pola uprawnego są: ewapotranspiracja, intercepcja przez pokrywę roślinną wody i światła..

Rośliny uprawne, będąc tylko w nielicznej grupie wśród wielu gatunków roślin, stanowią źródło pokarmu i surowców. Największe obszary upraw w skali światowej zajmuje pszenica, a następnie ryż, kukurydza, ziemniaki, jęczmień, soja, proso, a najmniejsze – żyto. Rośliny zbierane są w postaci korzeni, łodyg, liści i owoców z przeznaczeniem dla różnych celów – bezpośredniego spożycia, magazynowania i przetwórstwa. Niektóre, np. wiklina, rośliny przemysłowe, me-

dyczne, są w obumarłej postaci używane do pozyskiwania odnawialnej energii, przemysłu tekstylnego, budownictwa i medycyny. Fizyczne właściwości roślin ulegają zmianie w trakcie ich wzrostu i różnych procesów pozbiorowych.

Plody rolne to żywe lub obumarłe produkty zebrane z pola. Mają one typowe rozmiary i kształty, a ze względu na ich mechaniczne właściwości, są dzielone na klasy: płynne, półpłynne, półstałe i stałe. Fizyczne warunki zbioru, transportu, przechowywania i przetwarzania wpływają na ich budowę i jakość.

Produkty spożywcze stanowią całe rośliny lub ich części przeznaczone do spożycia bezpośredniego lub po przetworzeniu. Do produktów spożywczych zalicza się m.in. produkty ziarniste (zboża, rośliny strączkowe, orzechy), oleje roślin oleistych, owoce, warzywa, chleb, produkty ekstruzji.

PIŚMIENNICTWO

- Gliński J., 2011. Agrophysical objects (soils, plants, agricultural products, and foods). (Gliński J. i in., red.) Encyclopedia of Agrophysics, Springer, 34-35.
- Gliński J., Lipiec J., Horabik J., 2013. Agrophysics – physics in agriculture and environment. Soil Sci. Annual, vol. 64, No 2, 67-80. Doi: 10.2478/ssa-2013-0012.

2. PROCESY

2.1. Gleba jako układ termodynamiczny

Krzysztof Lamorski, Cezary Sławiński, Jaromir Krzyszcak

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Gleba jest wielofazowym i heterogenicznym ośrodkiem, w którym zachodzą różnorodne procesy transportu powiązane z naturalnymi zjawiskami zachodzącymi w ośrodku glebowym. Do najistotniejszych zjawisk transportu przebiegających w ośrodku glebowym należą: transport wody, transport energii, transport pary wodnej czy transport substancji chemicznych. Lista ta nie obejmuje pełnego katalogu procesów transportu, które mogą mieć miejsce w ośrodku glebowym.

Gleba jest układem heterogenicznym, składającym się z fazy stałej (materiału glebowego), fazy ciekłej (woda glebowa wraz z rozpuszczonymi w niej substancjami) i fazy gazowej (powietrze glebowe zawierające również parę wodną i inne gazy np. pochodzące z metabolizmu mikroorganizmów glebowych). Zwrócić należy uwagę, że procesy transportu zachodzące w glebie dotyczą zarówno fazy ciekłej jak i gazowej. Abstrahujemy tutaj od ewentualnych zmian położenia fazy stałej gleby np. w wyniku jej pęcznienia, kurczenia, pęknięcia czy reologicznego płynięcia uplastycznionej gleby.

Fizycznymi podstawami procesów transportu w glebie są zjawiska zachodzące na poziomie mikroskopowym – w poszczególnych porach glebowych. Na tym poziomie szczegółowości opisu ośrodka glebowego jest on ośrodkiem heterogenicznym w którym współegzystują jego elementy składowe w fazie stałej, ciekłej i gazowej. Pomędzy poszczególnymi fazami środowiska glebowego występują granice faz. Zjawiska zachodzące w skali mikro to np. wiązanie wody na ziarnach materiału glebowego, zjawiska kapilarne czy dyfuzja gazów w przestrzeni porów glebowych. Jednak nie stosuje się w praktyce tak detalicznego opisu zjawisk transportu bazującego na bezpośrednim opisie zjawisk w skali mikro. Zamiast tego w celu opisu procesów transportu w glebie zakłada się, że jest ona ośrodkiem o jednorodnych właściwościach w skali makro. I stosuje się formalizm termodynamiki procesów nierównowagowych do opisu zjawisk transportu w ośrodku glebowym.

Dla potrzeb opisu przebiegu zjawisk transportu w ośrodku, ośrodek glebowy jest uważany za układ termodynamiczny, którego stan jest charakteryzowany przez tak zwane parametry stanu. Parametrami stanu układu mogą być np. temperatura – T , ciśnienie – p , stężenie – c , potencjały chemiczne – μ , czy całkowity potencjał wody glebowej – H . Parametry stanu układu są funkcjami przestrzeni i czasu, mogą przyjmować różne wartości w różnych obszarach ośrodka glebowego.

$$T=T(x,y,z,t), p = p(x,y,z,t), \mu_i = \mu_i(x,y,z,t), H = H(x,y,z,t)$$

Wybór parametrów stanu poprawnie charakteryzujących ośrodek glebowy nie jest arbitralny. Zależy od procesów transportu, które chcemy uwzględnić w opisie fizycznym gleby i przyjętych konwencji.

Na gruncie termodynamiki procesów nierównowagowych przestrzenne różnice (gradienty) wartości parametrów stanu stanowią bodźce, które wywołują przepływy prowadzące do zmniejszania różnic parametrów stanu, co w przypadku układu pozostawionego samemu sobie spowodowałoby w końcu osiągnięcie stanu równowagi – wyrównanie parametrów stanu w całej objętości rozważanego ośrodka glebowego i ustanie przepływów. Przepływy wywoływane przez bodźce są do nich proporcjonalne, co da się zapisać w znanych zależnościach:

$$J_T = -\lambda \text{ grad}(T) \quad - \text{prawo przewodnictwa cieplnego Fouriera,}$$

$$J_H = -K \text{ grad}(H) \quad - \text{prawo przewodnictwa wodnego Darcy,}$$

$$J_c = -D \text{ grad}(c) \quad - \text{prawo dyfuzji Ficka.}$$

Powyżej zostały wymienione zależności pomiędzy strumieniami a wywołującymi je podstawowymi bodźcami tzw. bodźcami sprzężonymi. Równania te są jedynie przybliżeniem, ponieważ w ogólności dany bodziec wywołuje nie tylko podstawowy przepływ, z którym jest sprzężony, lecz również wpływa na inne przepływy – co potwierdzają obserwacje i co wynika z teorii procesów nierównowagowych. Oczywiście wartość rozważanego strumienia jest zdominowana przez bodziec sprzężony.

Wybór wielkości fizycznych, które opisują stan termodynamiczny ośrodka glebowego nie jest jednoznaczny. W szczególności stan energetyczny wody glebowej może być opisywany przy wykorzystaniu różnie definiowanych potencjałów wody glebowej. Całkowity potencjał wody glebowej jest sumą potencjałów składowych uwzględniających różne fizyczne oddziaływania wody w ośrodku glebowym. W przypadku chemicznie czystej wody glebowej, składowe całkowitego potencjału wody glebowej będą następujące:

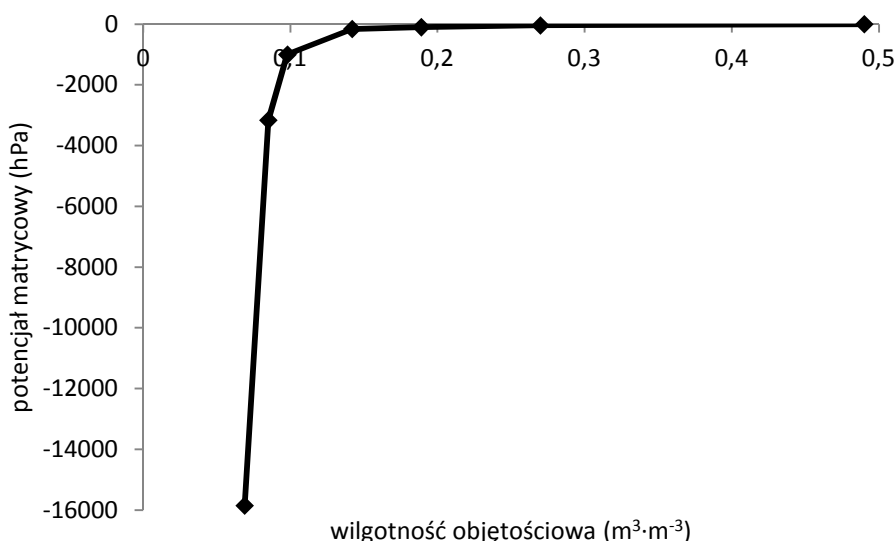
potencjał matrycowy ψ_m – związany z oddziaływaniem pomiędzy polarnymi cząsteczkami wody a materiałem glebowym i zjawiskami kapilarnymi w porach glebowych. Wartość tej składowej potencjału jest zawsze ujemna, wartość zerową przyjmuje potencjał wody glebowej w glebie całkowicie nasyconej wodą,

potencjał grawitacyjny ψ_g – związany z energią potencjalną wody w ziemskim polu grawitacyjnym,

potencjał ciśnieniowy ψ_p – związany z ciśnieniem hydrostatycznym. Składowa ta występuje w przypadku całkowitego nasycenia wodą profilu glebowego.

Obecnie najpowszechniej stosowaną w praktyce definicją potencjału wody glebowej jest przyjęta w latach 70. XX w. następująca definicja: potencjał wody glebowej – jest to praca w odniesieniu do ilości wody jaka musi być wykonana przez siły zewnętrzne aby przenieść nieskończenie małą ilość czystej wody ze stanu normalnego (z zasobnika wody czystej) do rozważanego miejsca w ośrodku glebowym. Powyższa definicja poddawana była krytyce i proponowano alternatywne bardziej poprawne pod względem formalnym definicje potencjału wody glebowej. Jednak jest ona powszechnie wykorzystywana i wydaje się być wystarczającą z praktycznego punktu widzenia.

Potencjał wody glebowej może być wyrażany w odniesieniu do jednostkowej: masy, objętości lub ciężaru, przyjmuje wtedy różne jednostki i zwyczajowo jest również oznaczany różnymi symbolami, odpowiednio: μ ($\text{Nm}\cdot\text{kg}^{-1}$), ψ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$) i h (m).



Rys. 2.1.1. Krzywa retencji wodnej

Składowa matrycowy potencjału wody glebowej ma bezpośredni związek z wilgotnością ośrodka glebowego. Niskie wartości potencjału matrycowego oznaczają niską wilgotność, wysokie wyższą wartość wilgotności. W stanie całkowitego nasycenia wodą ośrodka glebowego potencjał matrycowy przyjmuje wartość 0. Zależność funkcyjna pomiędzy wilgotnością objętościową gleby a potencjałem wody glebowej jest specyficzna dla danej gleby i nosi nazwę krzywej retencji wodnej (Rys. 2.1.1).

PIŚMIENNICTWO

- Corey A.T., Klute A., 1985. Application of the potential concept to soil water equilibrium and transport. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 3-11.
- Iwata S., 1972. On the definition of soil water potentials as proposed by the I.S.S.S. in 1963. *Soil Science*, 114(2), 88-92.

2.2. Fizyczna degradacja gleb i jej przeciwdziałanie

Jerzy Lipiec, Jerzy Rejman

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, Lublin

Fizyczna degradacja gleby jest jednym z ośmiu głównych zagrożeń środowiskowych zdefiniowanych w Europejskiej Strategii Tematycznej Ochrony Gleb (COM (2002) 179 final). Degradacja fizyczna obejmuje przemiany morfologiczne i morfometryczne struktury gleby w wyniku zagęszczania i naprężeń ścinających, spowodowanych przejazdami pojazdów i maszyn rolniczych oraz oddziaływań chemicznych jak zasolenie, a zwłaszcza ich alkalizacji (Blum 2011). Degradacja fizyczna gleby powodowana jest również przez erozję wodną, wietrzną i uprawową, a także tworzeniem się skorupy na powierzchni gleby. Erozja gleby jest procesem fizycznym, polegającym na odrywaniu i przemieszczeniu cząstek gleby pod wpływem energii dostarczonej do gleby przez deszcz, spływ powierzchniowy lub wiatr. W skali globalnej około 1,6 miliarda hektarów ziemi uprawnej podlega degradacji erozją, w tym ponad 1 miliard hektarów erozją wodną i około 550 milionów hektarów erozją wietrzną. Na kontynencie europejskim około 16% ogólnej powierzchni lądu (105 mln ha) jest zagrożone erozją wodną i 4% (42 mln ha) erozją wietrzną (dane bez Rosji) (EEA, 2012). W Polsce potencjalna erozja wodna występuje na około 29% ogólnego obszaru, przy czym erozja w stopniu od średniego do bardzo silnego na ok. 7% powierzchni kraju, natomiast 28% powierzchni kraju zagrożonych jest erozją wietrzną, w tym 11% w stopniu średnim i silnym (Józefaciuk i Józefaciuk, 1995). Erozja gleby jest również powodowana bezpośrednią działalnością człowieka, obejmującą przemieszczenie gleby podczas zabiegów uprawowych (tillage erosion), wynoszenie cząstek gleby wraz ze zbiorem roślin okopowych (harvest erosion) oraz wyrównywanie powierzchni pola przy pomocy ciężkiego sprzętu (land levelling). Fizyczna degradacja gleby ma negatywny wpływ na prawie wszystkie charakterystyki i procesy glebowe oddziałujące m.in. na ruch wody i składników odżywczych, temperaturę, wzrost roślin, faunę i mikroorganizmy glebowe.

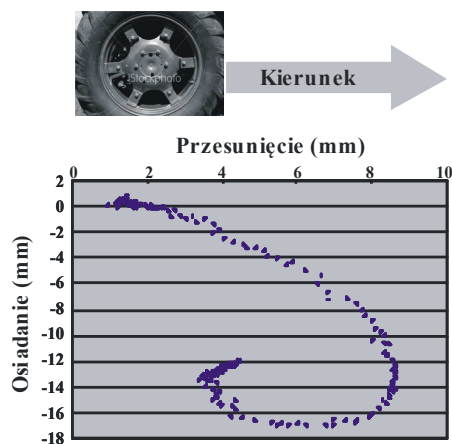
Zagęszczenie gleby

Zagęszczenie jest to proces powodujący odkształcenie wewnętrznej struktury, ściślejsze upakowanie cząstek glebowych i zmniejszenie objętości gleby. Powstaje ono w wyniku oddziaływania zarówno czynników naturalnych jak i antropogenicznych, związanych ze sposobem użytkowania gleb.

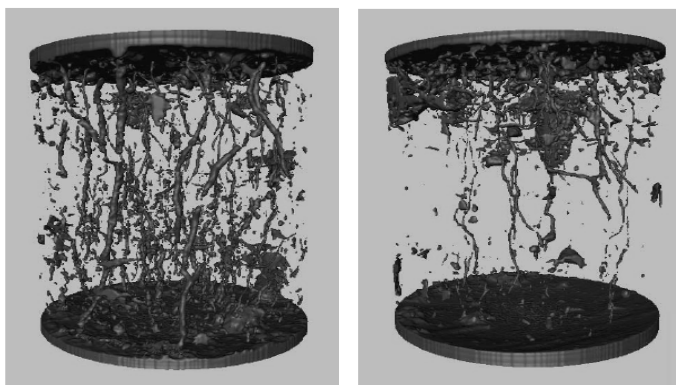
Głównymi czynnikami naturalnymi są procesy osiadania, kurczenie się gleb, ubijające oddziaływanie opadów deszczu, zagęszczające działanie sił kapilarnych oraz naprężenia pierwotne wyżej położonych warstw gleby i procesy glebotwórcze, związane z przemieszczaniem koloidów i wytrącaniem węglanów, związków żelaza, glinu i manganu oraz akumulacji półtoratlenków. Obecność warstw o różnej gęstości prowadzi do wzrostu poziomu anizotropii w profilu glebowym. Jest ona na ogół większa w glebach drobnoziarnistych niż gruboziarnistych (Assouline 2011). Głównymi czynnikami antropogenicznymi powodującymi zagęszczenie gleby są przejazdy maszyn rolniczych i związane z tym odkształcenia gleby. Szacuje się, że obecnie więcej niż 32 mln ha gleb w Europie i 68 mln na świecie jest trwale zdegradowana w wyniku zagęszczenia i powierzchnia ta szybko się zwiększa w ostatnich latach (Horn 2011).

Ważnym czynnikiem wzmagającym zagęszczenie gleby jest postępujący wzrost masy maszyn rolniczych i leśnych oraz częstotliwości ich stosowania, zwłaszcza w ciągu ostatnich 3-4 dekad. Obecnie maksymalna masa maszyn przekracza nawet 60 Mg. W wyniku ugniatającego działania pojazdów i maszyn rolniczych zmniejsza się zawartość makroporów ($>30 \mu\text{m}$) i ciągłość porów, powstaje struktura płytkowata gleby oraz zwiększa się anizotropia funkcji porów, co prowadzi do zwiększonych przepływów poziomych i erozji gleby. Rysunek 2.2.1 ilustruje ruch cząstek glebowych w przód i w dół pod oponą przejeżdżającego ciągnika, który zwiększa anizotropię struktury gleby. Stosowanie ciężkich maszyn prowadzi często do zagęszczenia i deformacji gleby w warstwie podornej.

Zagęszczenie gleby w warstwie ornej jest zwykle odwracalne z uwagi na rozluźniające oddziaływanie zabiegów uprawowych, aktywność mikrobiologiczną, cykle nawilżania i suszenia oraz zamarzania i rozmarzania gleb. W warstwie podornej natomiast skutki zagęszczenia gleby są długotrwałe i często nieodwracalne, ponieważ brak jest efektywnych sposobów przywrócenia makroporowatości gleby, z wyjątkiem procesów biologicznych, np. poprzez działania dżdżownic, które są zazwyczaj bardzo powolne i zależą od warunków edaficznych. Głęboka uprawa może przejściowo rozluźnić warstwę podorną, ale często rozluźniona gleba ponownie się zagęszcza w większym nawet stopniu niż przed głęboką uprawą. Ponadto jest kosztowna i często nieuzasadniona ekonomicznie. Badania porowatości gleby przeprowadzone w Skandynawii przy użyciu tomografu, wykazały, że zmniejszona objętość makroporów w glebie oznaczona w warstwie podornej (20-40 cm) gleby zagęszczonej przejazdami ciężkiego kombajnu ($0,015 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) w porównaniu do gleby nie zagęszczonej ($0,023 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), pozostawała istotnie mniejsza nawet po 14 latach od wykonania przejazdów (Rys. 2.2.2).



Rys. 2.2.1. Jednoczesne przemieszczenie cząstek glebowych w przód i w dół pod oponą przejeżdżającego ciągnika (Peng 2011)

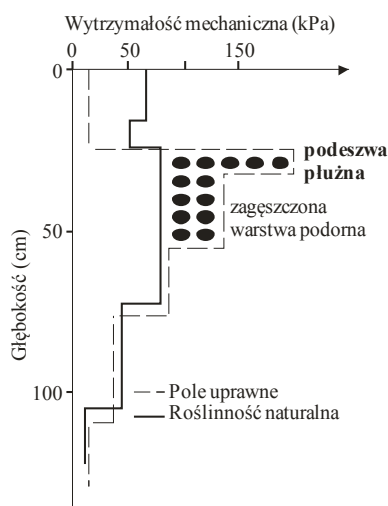


Rys. 2.2.2. Makropory (>0.5 mm) w kolumnach glebowych (wysokość 20 cm, średnica 20 cm) z warstwy 20-40 cm gleby gliniastej (Skane, Szwecja) użytkowanej standardowo (strona lewa) i po 4 przejazdach ciężkiego kombajnu do zbioru buraków cukrowych wykonanych 14 lat przed obrazowaniem tomograficznym gleby (strona prawa) (Schjønning i in. 2009)

Podatność gleby na zagęszczenie

Podatność na zagęszczenie zależy od wytrzymałości mechanicznej gleby (pre-compaction stress) (Horn and Fleige 2011). Gdy wartość naprężenia przekroczy wartość wytrzymałości mechanicznej gleby wtedy zagęszczenie gleby jest nieod-

wracalne. Wytrzymałość mechaniczna gleby (mierzona w laboratorium) pozwala określić dopuszczalne parametry pojazdów (np. całkowita masa, obciążenie osi, ciśnienie w ogumieniu), które mogą być stosowane bez ryzyka prowadzącego do nieodwracalnej degradacji gleby w różnych warstwach profilu glebowego. Wytrzymałość mechaniczna zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości iltu i zmniejszeniem wilgotności gleby i jest większa w glebach pod użytkami zielonymi lub uprawianych metodami uproszczonymi (np. uprawa bezorkowa, siew bezpośredni) niż w przypadku tradycyjnej uprawy płuźnej. Zmiany wytrzymałości mechanicznej gleby pod użytkiem zielonym i uprawnej ilustruje rysunek 2.2.3.



Rys. 2.2.3. Wytrzymałość mechaniczna gleby o uziarnieniu piasku gliniastego (precompression stress) w zależności od sposobu użytkowania (Horn i Fleige 2011)

Wskaźniki stanu zagęszczenia gleby

Najczęściej stosowanym parametrem do oceny stanu zagęszczenia gleby jest jej gęstość. Charakterystyczny stan zagęszczenia danej gleby odzwierciedla „gęstość naturalna”, do której gleba samoczynnie dąży ze stanu spulchnienia lub zagęszczenia (Wojtasik 2002). Zależy ona od składu granulometrycznego, zawartości węgla organicznego i węglanu wapnia oraz głębokości w profilu. Gęstość naturalna przydatna jest do porównania stanu zagęszczenia różnych jednostek systematycznych gleb.

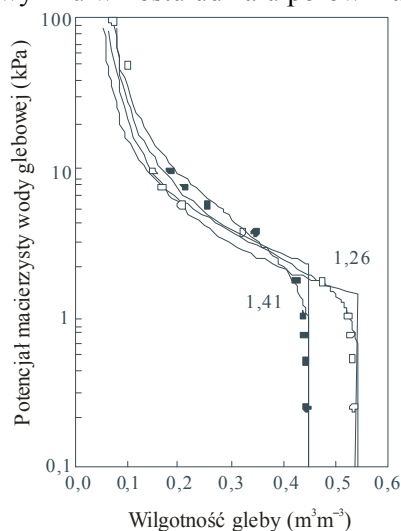
Przydatność gęstości jest ograniczona w przypadku porównywania stanu zagęszczenia gleb reprezentujących wyraźnie różne klasy granulometryczne, ponieważ zależy ona w dużym stopniu od uziarnienia gleby. Stąd taka sama wartość

gęstości może wskazywać różne stany zagęszczenia w różnych glebach. Na przykład gęstość $1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ wskazuje na stan luźny w glebie o uziarnieniu piasku luźnego i na stan mocno zagęszczony w glebie o uziarnieniu iłu i wysokiej zawartości próchnicy. Do porównania stanu zagęszczenia o odmiennym uziarnieniu przydatne są zagęszczenia relatywne, w których gęstość wyraża się w procentach gęstości standardowej (w przybliżeniu maksymalnej) danej gleby (Håkansson i Lipiec 2000). Gęstość standardowa może być wyznaczana edometrycznie stosując ciśnienie 200 kPa na glebę moką lub testem Proctora.

Wpływ zagęszczenia na właściwości i funkcje gleb

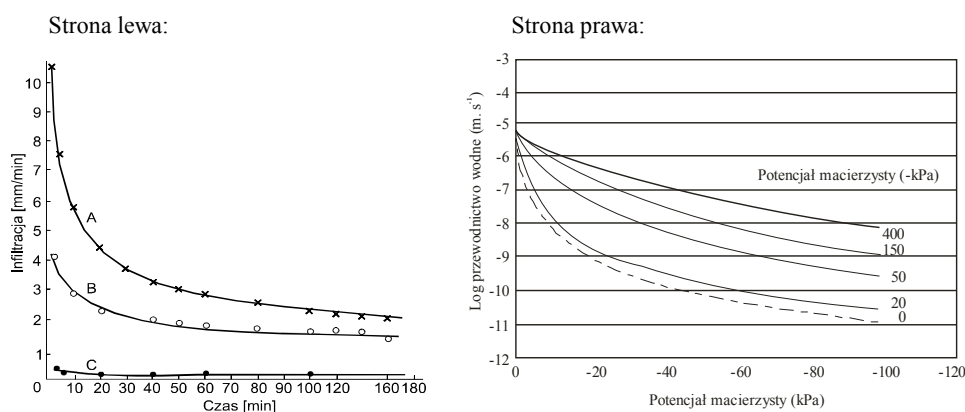
Zdolności retencyjne i przewodzące gleby

Zmniejszenie udziału porów dużych i zwiększenie udziału porów małych w wyniku zagęszczenia gleby wpływa istotnie na zdolności retencyjne gleby. Rysunek 2.2.4 (Assouline 2011) przedstawia krzywe retencji wody (pF) dla gliny piaszczystej o różnych gęstościach. Wzrost gęstości gleby z 1,26 do $1,41 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ spowodował spadek zawartości wody w stanie nasycenia gleby wodą (w wyniku zmniejszenia udziału porów dużych) i jej wzrost przy potencjale poniżej około -2 kPa (wartości bardziej ujemne) w wyniku wzrostu udziału porów małych.



Rys. 2.2.4. Mierzone krzywe zdolności retencyjnych gliny piaszczystej przy dwu gęstościach ($1,26$ i $1,41 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) oraz krzywe uzyskane przy użyciu modeli teoretycznych Brooksa i Coreya (cienka linia przerywana) i Assouline (cienka linia ciągła) (Assouline 2011)

Zmiany w strukturze porów w wyniku zagęszczenia gleby prowadzą również do zmniejszenia zdolności przewodzących gleby. Rysunek 2.2.5 ilustruje zmiany infiltracji wody do gleby zależnie od sposobu użytkowania i zagęszczenia gleby oraz współczynnika przewodnictwa wodnego w funkcji potencjału matrycowego gleby w zależności od wielkości nacisku jednostkowego na glebę. Zmniejszenie zdolności przewodzących zwiększa podatność gleb na erozję wodną gleb.



Rys. 2.2.5. Szybkość infiltracji gleby wytworzonej z lessu w zależności od sposobu użytkowania (strona lewa) A: ekosystem leśny, B: gleba orna, C: gleba orna intensywnie użytkowana przy użyciu ciężkich pojazdów i maszyn rolniczych (Dębicki i in. 1993) oraz współczynnika przewodnictwa wodnego w funkcji potencjału matrycowego gleby (strona prawa) (Horn 2011)

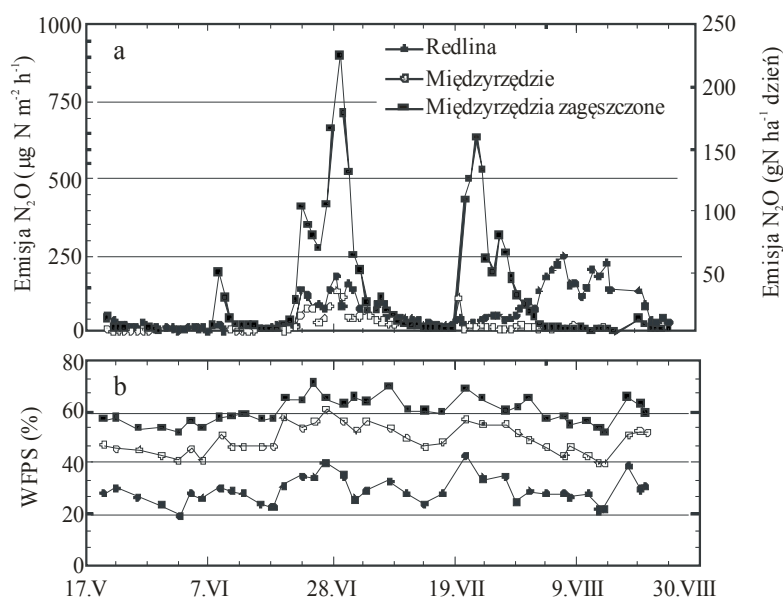
Właściwości cieplne gleby

Wraz ze wzrostem zagęszczenia gleby i ściślejszym upakowaniem cząstek glebowych zwiększają się wartości przewodnictwa cieplnego i pojemności cieplnej gleby. Wzrost ten prowadzi do zmniejszenia szybkości nagrzewania i ochładzania jak też dobowych zmian temperatury wierzchniej warstwy gleby. W okresie wczesnowiosennym niska temperatura gleby jest jednym z głównych czynników opóźniających początkowy wzrost roślin. W późniejszym okresie wegetacji, głównym czynnikiem kształtującym temperaturę gleby jest okrywa roślinna, niezależnie od gęstości gleby.

Wymiana gazów szklarniowych

Zmniejszenie zdolności przewodzących i natlenienia gleby zagęszczonej prowadzi do ograniczenia wymiany gazowej pomiędzy glebą i atmosferą oraz zmiany emisji gazów szklarniowych. Wiele badań wskazuje na zwiększoną zawartość i emisję podtlenku azotu (N_2O) z gleb zagęszczonych niż luźnych w wyniku

zmniejszenia porowatości aeracyjnej. Dlatego największe tempo emisji podtlenku azotu (hot spots) w słabo przepuszczalnych glebach zagęszczonych obserwuje się po opadach deszczu. Rysunek 2.2.6 ilustruje zwiększoną emisję N_2O z zagęszczonych międzyrzędzi pola pod ziemniakiem w okresach z podwyższoną objętością porów wypełnionych wodą po opadach deszczu. Tempo emisji podtlenku azotu zwiększa się wraz ze wzrostem nawożenia azotowego. Zagęszczenie gleby również zmniejsza zdolność usuwania metanu (CH_4) w wyniku utleniania przez bakterie metanotroficzne (Horn Manage Enc 2011), wykorzystujące CH_4 jako źródło węgla i energii (Stępniewska i in. 2004). Emisję podtlenku azotu i metanu jak też wymywanie z gleby zagęszczonej stymuluje spadek potencjału redoks poprzez wzmożoną redukcję NO_3^- do N_2O i CO_2 do CH_4 (w warunkach beztlenowych). Niedotlenienie powoduje również redukcję Fe ($+3$ do $+2$) i Mn ($+4$ do $+2$).



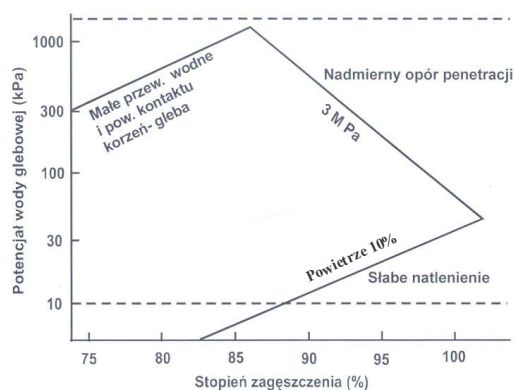
Rys. 2.2.6. Emisja N_2O i objętość porów glebowych wypełnionych wodą podczas sezonu wegetacyjnego ziemniaków (Flessa i in. 2002)

Wzrost i funkcjonowanie roślin

Właściwości fizyczne gleby warunkujące wzrost roślin

Konsekwencją nadmiernego zagęszczenia gleby są zmiany struktury i zdeteminowane przez nią właściwości fizyczne warunkujące wzrost i funkcjonowanie

systemu korzeniowego roślin (Lipiec 2002). Wśród nich szczególne znaczenie mają nadmierny opór mechaniczny, niewystarczające natlenienie i wilgotność gleby. Wartości oporu mechanicznego >3 MPa i porowatości powietrznej $<10\%$ przyjmowane są na ogół jako krytyczne dla wzrostu korzeni. Oddziaływanie tych czynników w glebie jest interakcyjne. Zakres potencjału wody glebowej, w którym natlenienie i opór mechaniczny nie ogranicza wzrostu korzeni, zmniejsza się wraz ze wzrostem gęstości gleby (Rys. 2.2.7). Zakres ten jest także używany do oceny warunków wzrostu roślin niezależnie od gęstości gleby i w literaturze angielskojęzycznej określany jest jako *non-limiting water range (NLWR)* lub *least limiting water range (LLWR)*. Przy niskim potencjale wody glebowej i wysokim stanie zagęszczenia głównym czynnikiem ograniczającym wzrost korzeni jest nadmierny opór mechaniczny (Rys. 2.2.7, prawy górny róg) podczas gdy w warunkach wysokiego potencjału wody glebowej i gęstości odpowiadających obszarowi w prawym dolnym rogu – niedobór tlenu. Niski współczynnik przewodnictwa wodnego gleby i ograniczona powierzchnia kontaktu pomiędzy korzeniami i glebą są najprawdopodobniej głównymi czynnikami ograniczającymi wzrost korzeni roślin w glebie luźnej przy niskich wartościach potencjału wody glebowej (obszar w lewym górnym rogu). Wyniki wskazują na to, że wraz ze wzrostem stopnia zagęszczenia gleby (stosunek gęstości aktualnej do maksymalnej danej gleby) zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia nadmiernego oporu mechanicznego lub niedotlenienia podczas sezonu wegetacyjnego, przy czym w latach suchych dominującym czynnikiem ograniczającym wzrost korzeni będzie nadmierny opór mechaniczny, a w latach mokrych – niedotlenienie strefy korzeniowej.



Rys. 2.2.7. Krytyczne wartości oporu mechanicznego (linia górna) i porowatości powietrznej (linia dolna) w funkcji stopnia zagęszczenia i potencjału wody glebowej w warstwie ornej gleby (Håkansson i Lipiec 2000)

W glebie bardziej zagęszczonej stosunkowo małe zmiany uwilgotnienia gleby prowadzą do znacznych zmian oporu mechanicznego i natlenienia, a tym samym do wzrostu systemu korzeniowego. Warto zwrócić uwagę, że linie krytycznych wartości oporu mechanicznego (3 MPa) i porowatości powietrznej (10%) na rysunku 2.2.7 przecinają linie potencjału wody glebowej -1500 i -10 kPa przy zbliżonych wartościach stopnia zagęszczenia (86-88%). Przy tych wartościach stopnia zagęszczenia plony roślin uprawnych są najwyższe. Relatywne zagęszczenie w porównaniu do gęstości gleby jest bardziej przydatnym parametrem w przewidywaniu oddziaływania przejazdów maszyn i narzędzi rolniczych na właściwości gleb i wzrost roślin przy użyciu modeli matematycznych (Lipiec i in. 2003).

Reakcja korzeni roślin

Wzrost stanu zagęszczenia gleby prowadzi do zmniejszenia długości i głębokości systemu korzeniowego roślin oraz odległości między najbliższymi korzeniami. Ponadto wykazano, że w glebie bardziej zagęszczonej wzrasta nierównomierność rozmieszczenia przestrzennego korzeni, związana z większą zmiennością struktury gleby. Konsekwencją tego jest brak korzeni w ogóle w niektórych fragmentach gleby i ich obfitość – w innych. Odległość między najbliższymi korzeniami jest ważnym czynnikiem warunkującym absorpcję wody i składników pokarmowych. Wykazano, że ilość wody pobranej na jednostkę długości korzeni grochu, kukurydzy, jęczmienia i ryżu jest większa w glebie umiarkowanie zagęszczonej niż luźnej. Wzrost ten był głównie wynikiem większej powierzchni kontaktu gleby z korzeniami roślin i zwiększonego współczynnika przewodnictwa wodnego. W większości badań zwiększona efektywność korzeni była niewystarczająca, aby skompensować zmniejszony system korzeniowy w wyniku zagęszczenia, czego efektem było zmniejszone całkowite zużycie wody przez rośliny. Podobny wpływ zagęszczenia gleby obserwowano w odniesieniu do pobierania składników pokarmowych. Mała powierzchnia kontaktu korzeni z glebą może być kompensowana wytwarzaniem większej ilości korzeni drobnych, przy mniejszym zużyciu asymilatów na jednostkę długości korzeni. Znajomość nierównomiernego pobierania wody przez korzenie roślin ma duże znaczenie w modelowaniu pobierania wody i składników odżywczych oraz ich rozmieszczenia w profilu glebowym (Lipiec i in. 2003).

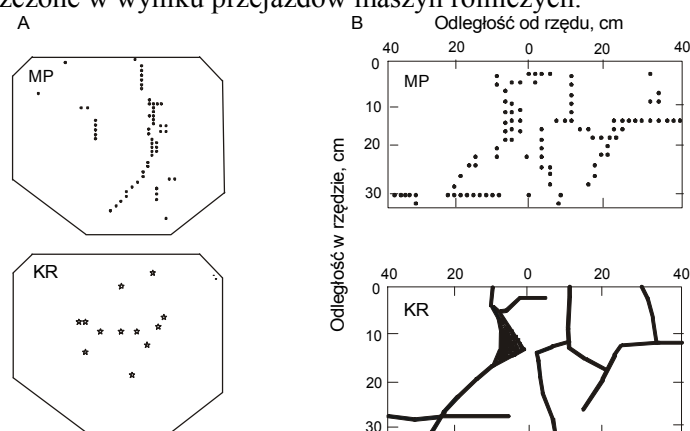
Nadmierny stopień zagęszczenia gleby wpływa istotnie na cechy anatomiczne korzeni roślin. Wykazano, że zmiany anatomiczne korzeni w glebie zagęszczonej związane były z kształtem ogólnym korzeni i porów glebowych. W korzeniach okrągłych deformacje komórek korzeni występowały głównie w korze pierwotnej podczas gdy w korzeniach spłaszczonych zarówno w korze pierwotnej jak i w walcu osiowym. Kształt i wielkość odkształceń wskazuje na dużą plastyczność

komórek korzeni w odpowiedzi na zagęszczenie gleby oraz na większą zmienność stanu zagęszczenia gleby wokół korzeni w glebie zagęszczonej niż luźnej.

Wzrost korzeni w profilu glebowym jest w znacznym stopniu modyfikowany przez warstwy zbite takie jak podeszwa płuzna czy poziomy genetyczne B. Warstwy te ograniczają wzrost korzeni głównie poprzez nadmierny opór mechaniczny i niewystarczające natlenienie. Negatywny wpływ tych warstw na wzrost korzeni zwiększa się wraz ze zmniejszeniem ich głębokości występowania i wzrostem miąższości. Wpływ ten może być złagodzony przez kompensacyjny wzrost korzeni w warstwach wyżej położonych, pod warunkiem ich dobrego zaopatrzenia w wodę i składniki pokarmowe.

Rola porów glebowych

Korzenie większości gatunków roślin nie są w stanie wnikać do porów mniejszych od ich nominalnej średnicy (Lipiec i in. 2012). Makropory lub pory większe od korzeni umożliwiają korzeniom omińnięcie obszarów o nadmiernym oporze mechanicznym i zwiększają w ten sposób potencjalne możliwości wzrostu korzeni. Natomiast są one tylko w małym stopniu rejestrowane przez penetrometry glebowe. Szczególne znaczenie mają pory skierowane pionowo, gdyż nie są one na ogół niszczone w wyniku przejazdów maszyn rolniczych.



Rys. 2.2.8. Rozmieszczenie makroporów i korzeni kukurydzy, A: doświadczenie wazonowe; B: doświadczenie polowe. MP = makropory; KR = korzenie (Lipiec i Hatano 2003)

Podobne rozmieszczenie przestrzenne makroporów i korzeni roślin na rysunku 2.2.8 potwierdza preferencyjny wzrost korzeni do makroporów (Lipiec i Hatano 2003). Udział korzeni zasiedlających istniejące makropory zwiększa się w niższej położonych i zwięzłych warstwach podornych, gdzie makropory stanowią często jedyne ścieżki wzrostu korzeni roślin. Objętość makroporów w słabo przepuszczalnych glebach użytkowanych rolniczo nie powinna być mniejsza niż $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Pory wytworzone przez dżdżownice i korzenie roślin poprzedzających, zwane biologicznymi, mają szczególne znaczenie w warstwach zagęszczonych (np. podszwa płuzna), w których wzrost korzeni jest jedynie możliwy przez te pory. Oddziałują one także korzystnie na wzrost korzeni w glebach wilgotnych, gdyż są one odwadniane przy większych potencjałach wody glebowej (większa wilgotność) i pozostają zatem wypełnione powietrzem przez dłuższy okres czasu. Ważną cechą tych porów jest to, że są one odporne na pionowy nacisk kół maszyn i narzędzi rolniczych i na procesy pęcznienia. Makropory otwarte na powierzchni gleby wywierają istotny wpływ na wzrost infiltracji wody do gleby (przepływ preferencyjny) oraz zmniejszenie wymywanego azotu i zanieczyszczenie wody gruntowej. Skierowane pionowo makropory wytworzone przez dżdżownice są stosunkowo odporne na zagęszczenie gleby i z tego względu ich zawartość jest ważnym wskaźnikiem jakości gleby. Uwzględnienie przepływu preferencyjnego w modelowaniu poprawia znacznie efektywność modeli w przewidywaniu wilgotności profilu glebowego i strat chemikaliów w wyniku wymywania. Występowanie ruchu wody jedynie w makroporach, przy zmniejszonej infiltracji przez szkielet glebowy, może prowadzić do ograniczonego zwilżenia strefy korzeniowej gleby.

W glebach drobnoziarnistych rozkład porów glebowych i wzrost korzeni zależą w dużym stopniu od wielkości agregatów glebowych. Wykazano, że wzrost korzeni jest zwykle słabszy w glebach złożonych z dużych niż małych (poniżej 3 mm) agregatów. Wewnętrzne części agregatów dużych, zwłaszcza zagęszczonych i wilgotnych, są w małym stopniu zasiedlane przez korzenie roślin.

Powyższe wyniki wskazują na to, że parametry charakteryzujące zmienność przestrzenną porowatości są ważnym uzupełnieniem do pomiarów penetrometrycznych lub gęstości gleby, używanych najczęściej do charakterystyki oporu mechanicznego dla wzrostu korzeni.

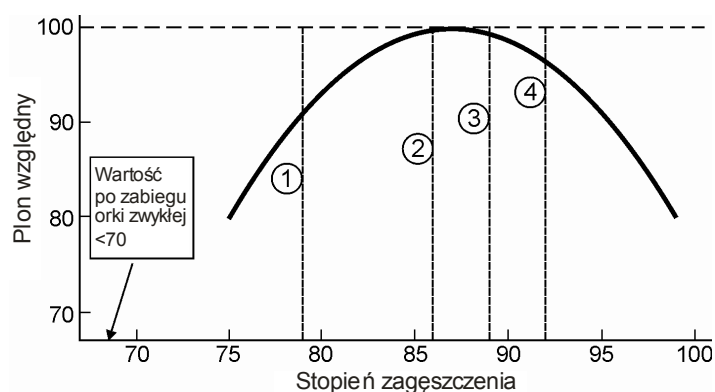
Reakcja części nadziemnych

Warunki glebowe w strefie korzeniowej wywierają istotny wpływ na transpirację pary wodnej poprzez regulację stopnia otwarcia szparek liści. Miarą otwarcia szparek jest opór dyfuzyjny liści. W licznych doświadczeniach stwierdzono wzrost oporu dyfuzyjnego liści wraz ze wzrostem stanu zagęszczenia gleby. Mechanizmy reakcji aparatów szparkowych na niekorzystne warunki fizyczne gleby nie są jeszcze dokładnie poznane. Dane literaturowe wskazują na to, że ważnymi czynnikami powodującymi zamknięcie aparatów szparkowych jest płytki system korzeniowy oraz zwiększona oporność hydrauliczna korzeni. Sygnały o warunkach stresowych w obrębie korzeni są prawdopodobnie przenoszone przez hormony wzrostu, a wzrost stężenia kwasu abscyzynowego (ABA) i obniżenie ci-

śnienia turgorowego w komórkach szparkowych prowadzą do zmniejszenia stopnia otwarcia szparek liści (Lipiec i in. 2013).

Plon roślin

Reakcja plonowania na stan zagęszczania gleby w warstwie ornej jest najczęściej paraboliczna z najwyższym plonem uzyskanym z gleby średnio zagęszczonej (Rys. 2.2.9). Natomiast w glebie o stosunkowo wysokim początkowym stanie zagęszczenia gleby w latach suchych plon może się zmniejszać wraz ze wzrostem stanu zagęszczenia gleby.



Rys. 2.2.9. Plon względny roślin w funkcji stopnia zagęszczenia gleby w warstwie ornej (5-25 cm) (stosunek aktualnej do maksymalnej gęstości gleby w %). Oznaczenia: 1) gleba nie zagęszczona, 2) jeden przejazd ciągnika o masie 2 Mg i ciśnieniu w oponach 70 kPa, 3) jeden przejazd ciągnika o masie 3-3,5 Mg i ciśnieniu w oponach 140 kPa, 4) cztery przejazdy ciągnika o masie 3-3,5 Mg i ciśnieniu w oponach 180 kPa, przejazdy wykonano ślad obok śladu (Håkansson i Lipiec 2000)

Nadmierny stan zagęszczenia gleby w warstwie ornej można usunąć poprzez coroczne zabiegi uprawowe, natomiast w warstwie podornej powodowane przez pojazdy o wysokim obciążeniu osi (≥ 10 Mg) może pozostawać przez wiele lat pomimo zamarzania gleby zimą (Håkansson 2005). Wykazano, że zagęszczenie warstwy ornej i podornej w wyniku jednego przejazdu kombajnu do zbioru buraków cukrowych o masie 38 Mg powoduje spadek plonu średnio o 0.5% w skali Europy (Horn 2011).

Wybrane metody badań

Szereg różnych metod jest używanych do badań reakcji porowatości i struktury agregatowej oraz korzeni roślin na zagęszczenie gleby (Lipiec i Hatano 2003).

Metody morfologiczne i morfometryczne zglądów glebowych umożliwiają określenie typu struktury, rzeczywistych wymiarów porów jak też powierzchni kontaktu korzeni z glebą. Przy użyciu tych metod wykazano, że zagęszczenie gleby prowadzi do zmniejszenia różnorodności struktury porów. Zaletą tych metod jest to, że eliminują one efekt histerezy, wpływający na objętość porów wyznaczanych na podstawie infiltracji oraz zależności potencjał wody-wilgotność gleby.

Objętość makroporów można wyznaczyć pośrednio na podstawie pomiarów infiltracji przy pełnym i niepełnym nasyceniu gleby wodą. Można też je obliczyć z zależności potencjał wody-wilgotność gleby. Wartości stosunków przepuszczalności do objętości makroporów lub do porowatości powietrznej są użytecznymi wskaźnikami ciągłości makroporów. Małe wartości tych stosunków dobrze charakteryzują zmniejszoną ciągłość makroporów w glebie zagęszczonej.

Zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej pozwala na ilościowe określenie zmienności przestrzennej porowatości i gęstości gleby wokół korzeni roślin. Porowatość gleby w 150 μm warstwie wokół korzeni kukurydzy była o 24% mniejsza niż szkieletu glebowego. Gęstość gleby wynosiła odpowiednio 1,80 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ i 1,54 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Badania modelowe wykazały, że gęstość gleby maleje według funkcji wykładniczej wraz z odległością od powierzchni korzeni, przy czym wartość wykładnika jest proporcjonalna do średnicy korzenia. Wpływ korzeni na gęstość gleby jest większy w glebie zagęszczonej, gdzie korzenie są zwykle grubsze (Lipiec i Hatano 2003). Stosowane ostatnio techniki tomografii komputerowej i magnetycznego rezonansu jądrowego o wysokiej rozdzielczości przestrzennej pozwalają na nieniszczące badania ilościowe porów glebowych i korzeni roślin w przestrzeni dwu i trójwymiarowej z uwzględnieniem deformacji gleby w wyniku zagęszczenia gleby. Również zastosowanie nowych kamer CCD i skanerów o wysokiej rozdzielczości umożliwia dokładną kwantyfikację struktury gleby, zależnie od sposobu jej użytkowania.

Zastosowanie źródła niskiej (np. Cs-137) i wysokiej (np. Am-235) energii gamma w tomografii komputerowej pozwala na nieniszczące i dokładne określenie rozmieszczenia przestrzennego gęstości i wilgotności gleby wokół korzenia roślin (Asseng i in. 2000) oraz trójwymiarowej wizualizacji korzeni na podstawie matryc dwuwymiarowych. Analiza promieniami rentgenowskimi przy użyciu skanera o dwu poziomach energetycznych tj. 80 kV i 120 kV pozwala na nieniszczące określenie rozmieszczenia przestrzennego gęstości i wilgotności gleby.

Sposoby ograniczenia zagęszczenia gleby

1. Wprowadzenie proekologicznych technologii uprawy konserwacyjnej (zamiast tradycyjnej) tj. zmniejszenie liczby przejazdów ciężkich maszyn rol-

niczych, dobór roślin rozluźniających glebę np. lucerna, koniczyna, groch, łubin i lędźwian, dostarczających dużo materii organicznej.

2. Zmniejszenie nacisku jednostkowego kół na glebę przez obniżenie ciśnienia w ogumieniu, stosowanie szerokich opon, kół bliźniaczych lub potrójnych i tym samym zwiększenie powierzchni styku opon z glebą.
3. Stosowanie szerokich i niskociśnieniowych opon, półgąsienic i gumowych gąsienic w ciągnikach i kombajnach.
4. Stosowanie stałych ścieżek przejazdowych.
5. Ograniczenie zabiegów agrotechnicznych i przejazdów maszyn, gdy gleba jest wilgotna.

Erozja gleb

Erozja wodna gleby

Głównymi czynnikami decydującymi o wielkości masy gleby przemieszczonej wskutek erozji wodnej są erozyjność opadu i spływu powierzchniowego oraz podatność gleby na erozję. Na intensywność erozji wodnej wpływają również czynniki takie, jak stan rozwoju okrywy roślinnej, nachylenie i długość stoku oraz zabiegi przeciwoerozyjne, obejmujące między innymi uprawę w poprzek stoku oraz mulczowanie. Relacje między wielkością erozji gleby oraz czynnikami erozyjnymi zostały ujęte w empirycznym modelu USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier i Smith 1978). W modelu USLE, erozyjność opadu i spływu powierzchniowego jest wyrażona iloczynem zsumowanej energii kinetycznej opadów cząstkowych i maksymalnej intensywności opadu w ciągu 30 minut, a podatność gleby na erozję (K) opisuje wielomianowe równanie regresji, obejmujące skład granulometryczny, zawartość substancji organicznej, klasę infiltracji i klasę struktury gleby:

$$K = [2,1 \cdot 10^4 (12-OM) M^{1,14} + 3,25 (S-2) + 2,5 (P-3)]/100 \quad (1)$$

gdzie:

M – (% frakcji 0,1-0,002 mm) · (% frakcji 0,05-0,002 mm + % frakcji 0,1-2 mm),

OM – % substancji organicznej,

S – klasa struktury,

P – klasa przepuszczalności.

Wartość wskaźnika K (w jednostkach amerykańskich) należy sprowadzić do jednostek układu SI (Mg, ha, h, ha⁻¹, MJ⁻¹, mm⁻¹) dzieląc ją przez 7,59. Zgodnie z równaniem empirycznym, gleby wykształcone z utworów pyłowych i piasz-

czystych należą do najbardziej podatnych na erozję, a gleby o dużej zawartości łu koloidalnego do najmniej podatnych.

Modele erozyjne, takie jak opisany powyżej USLE oraz PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment), są stosowane do oceny wielkości natężenia erozji wodnej w Europie (Van Rompaey i in. 2003). PESERA w przeciwieństwie do USLE jest modelem uwzględniającym aspekt hydrologiczny m.in. zawiera rozdział opadu na spływ powierzchniowy, ewapotranspirację oraz retencję wody w glebie. Wielkość natężenia erozji wodnej w Europie przedstawiono na rysunku 2.2.10. Zgodnie z modelem PESERA, największa erozja gleby ($20\text{-}50 \text{ Mg}\cdot(\text{ha}\cdot\text{rok})^{-1}$) występuje w krajach śródziemnomorskich, zwłaszcza w obszarach wyłączonych z uprawy rolniczej i pozbawionych w znacznym stopniu okrywy roślinnej. W terenach użytkowanych rolniczo, największe zagrożenie przez erozję wodną występuje w obszarach lessowych ($10\text{-}20 \text{ Mg}\cdot(\text{ha}\cdot\text{rok})^{-1}$), a spośród upraw w największym stopniu narażone są winorośl ($20 \text{ Mg}\cdot(\text{ha}\cdot\text{rok})^{-1}$) oraz kukurydza i rośliny okopowe ($14 \text{ Mg}\cdot(\text{ha}\cdot\text{rok})^{-1}$). Pomiary na poletkach erozyjnych w Polsce wskazują na roczne wielkości erozji w uprawach zbóż rzędu $0,3\text{-}1,2$; ziemniaka $0,1\text{-}34$ oraz buraka cukrowego $20\text{-}70 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Boardman i Poesen 2006). Maksymalne wielkości erozji obserwowano na glebach o różnym uziarnieniu, co wskazuje na decydujące znaczenie erozyjności opadu w wywoływaniu procesu erozji.

Wielkości erozji wodnej gleby szacowane w oparciu o modele przedstawiają stan zagrożenia gleb przez erozję wodną powierzchniową, podczas której cząstki gleby są odrywane przez krople deszczu i przenoszone przez spływ powierzchniowy. Podczas opadów o dużej intensywności oraz dużej wilgotności gleby dochodzi do rozwoju żłobin, rozcinających powierzchnię gleby. Erozja żłobinowa (linijna) charakteryzuje się zmianą charakteru spływu z laminarnego na laminarno-turbulencyjny i turbulencyjny. Funkcję odrywania i przenoszenia cząstek pełni wówczas spływ powierzchniowy, natomiast rola rozbryzgu ogranicza się do dostarczania materiału od żłobin. W wyniku erozji żłobinowej, powstają koryta erozyjne lub wąwozy efemeryczne (ephemeral gullies) o głębokości do kilku metrów. Z reguły są one zasypywane materiałem glebowym przez rolników, celem wyrównania powierzchni pola. W przypadku powstania głębszych form i ich utrwalenia w postaci wąwozów, obszary te są wyłączane z produkcji rolniczej. W terenach użytkowanych rolniczych występuje również solifluksja, spływanie warstwy gleby po zamrożonym stoku, obecnie rzadziej spotykana w związku z ociepleniem klimatu oraz osuwiska w terenach górskich.

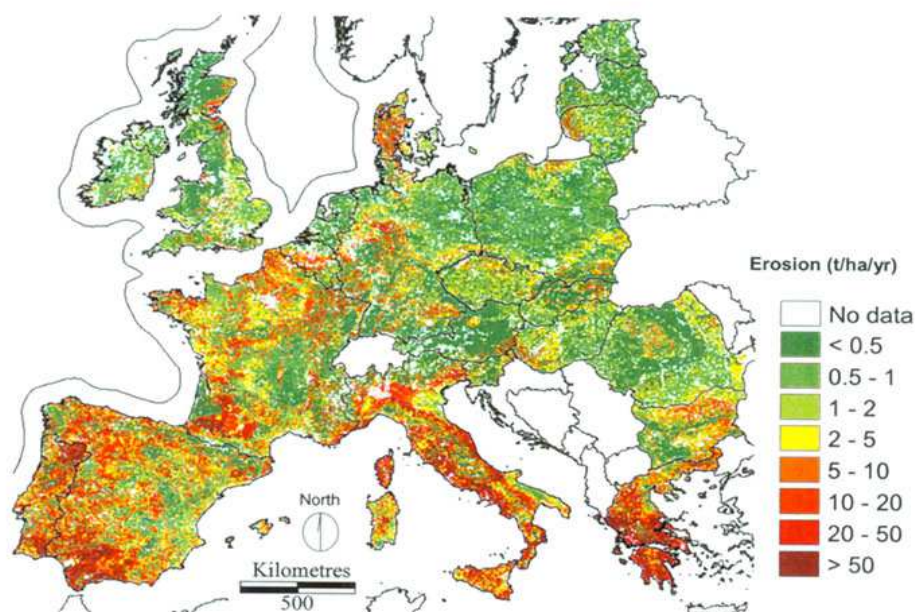


Figure 6: PESERA soil erosion estimates

Rys. 2.2.10. Średnia roczna wielkość erozji wodnej ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) w Europie oszacowana na podstawie modelu PESERA (Van Rompaey i in. 2003)

Erozja wietrzna gleby

Procesowi erozji wietrznej przypisywane jest mniejsze znaczenie w przemieszczeniu cząstek gleby niż erozji wodnej, aczkolwiek dane pomiarowe wskazują na porównywalne wielkości masy wyerodowanej gleby podczas obu procesów. Erozji wietrznej w skali globu ulega 500×10^6 Mg gleby rocznie, z czego 50% pochodzi z gleb terenów uprawnych, a roczna wielkość erozji wietrznej jest szacowana na $3\text{-}93 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Boardman i Poesen, 2006). Erozji wietrznej ulegają drobne cząstki gleby, substancja organiczna oraz składniki pokarmowe roślin. Straty roczne gleby w wysokości $40 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ są niezauważalne, a straty w zakresie $125\text{-}375 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (usunięcie lub akumulacja około 2,5 cm warstwy gleby) prowadzą do zniszczenia siewek pszenicy. W zależności od wielkości, cząstki gleby podczas erozji wietrznej podlegają pełzaniu (cząstki $>500 \mu\text{m}$), saltacji – unoszeniu i opadaniu cząstek na wysokość zazwyczaj 1 m ($70\text{-}500 \mu\text{m}$), krótkotrwałego ($20\text{-}70 \mu\text{m}$) i długotrwałego ($<20 \mu\text{m}$) zawieszenia w powietrzu. Cząstki krótkotrwanie zawieszane utrzymują się w powietrzu przez kilka godzin, długotrwanie

zawieszane przez kilka dni i są przenoszone na duże odległości. Erozja wietrzna występuje w obszarach nizinnych i górzystych, głównie na glebach piaszczystych pyłowych i torfowych. Sprzyjają jej duże pola, osuszanie gleb wskutek melioracji powodujące rozkład substancji organicznej i zmniejszenie stabilności agregatów, wyrównywanie nierówności w obrębie pola związane z wysokim stopniem mechanizacji uprawy roli oraz nadmierne wypasanie zwierząt. Erozja wietrzna najsilniej występuje na północnym Kaukazie, wschodniej Rosji, w pasie polodowcowym rozciągającym się od Wielkiej Brytanii do Polski oraz obszarze śródziemnomorskim. W Polsce średnia roczna wielkość erozji wietrznej oceniana jest na $5-10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a w ekstremalnych pojedynczych przypadkach w Karpatach i na Wyżynie Lubelskiej zaobserwowano transport eoliczny na krótkie odległości w ilości do $120 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Większe natężenie erozji wietrznej, rzędu $5-20 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, towarzyszące uprawie w warunkach przesuszenia warstwy ornej gleb piaszczystych stwierdzono na terenie Wielkopolski (Boardman i Poesen, 2006).

Erozja gleb spowodowana działalnością rolniczą

Erozja uprawowa

Erozja uprawowa jest definiowana jako przemieszczenie gleby w trakcie zabiegów uprawowych. Jest ono spowodowane większą odległością przemieszczenia i masą przemieszczonej gleby podczas zabiegu wykonywanego w dół stoku w porównaniu do wykonywanego pod górę stoku. Erozja uprawowa prowadzi do przemieszczenia gleby z wypukłych do wklęsłych elementów rzeźby. Występuje ona powszechnie i obejmuje wszystkie zabiegi uprawowe. Wielkość erozji uprawowej w Europie oceniana jest na $4-93 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Boardman i Poesen, 2006). Do oceny porównawczej wielkości erozji uprawowej stosowany jest wskaźnik przemieszczenia uprawowego gleby (k), (Govers i in. 1994):

$$k = -D \rho_b B \quad (2)$$

gdzie: D – głębokość orki (m), ρ_b – gęstość objętościowa gleby ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), B – stosunek średniej odległości przemieszczenia gleby (m) do nachylenia stoku ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$).

Przykładowe wartości wskaźnika przemieszczenia gleby przedstawiono w tabeli 2.2.1. Erozji uprawowej sprzyja wprowadzenie ciągników o dużej mocy, zwiększenie szerokości narzędzi rolniczych oraz prędkości i głębokości uprawy, a tym samym i energii dostarczanej do gleby.

Erozja uprawowa w chwili obecnej jest uważana za dominujący proces erozji gleb (Boardman i Poesen 2006). Jej udział w erozji całkowitej jest zróżnicowany i zależy nie tylko od sposobu uprawy mechanicznej, ale i od topografii rzeźby,

m.in. długości i nachylenia stoku. Erozja wodna dominuje na obszarach o długich stokach, natomiast erozja uprawowa w obrębie urozmaiconej rzeźby o krótkich stokach. Heckrath i in. (2005) uważają, że erozja uprawowa w obszarze polodowcowym Danii jest 10-krotnie większa porównaniu do erozji wodnej. Świadczy o tym duże przekształcenie budowy gleby w strefie opadów o niskiej erozyjności. Z przeprowadzonych badań wynika, że największe zagrożenie erozją uprawową charakteryzują się obszary młodo-glacialne i lessowe, o niewielkich różnicach wysokości względnej i dużym zróżnicowaniu mikrorzeźby.

Tabela 2.2.1. Wskaźnik przemieszczenia gleby podczas uprawy (k) za Zhang (2011)

Zabieg uprawowy	Wskaźnik przemieszczenia gleby ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{przejazd}^{-1}$)	Miejsce badań	Źródło
Orka płużna mechaniczna	330	USA	Lindstroem i in. (1992)
Orka płużna mechaniczna	234	Belgia	Govers i in. (1994)
Kultywatorowanie mechaniczne	111	Belgia	Govers i in. (1994)
Orka (zaprzęg zwierzęcy)	68	Ethiopia	Nyssen i in. (2000)
Orka (zaprzęg zwierzęcy)	89-108	Chiny	Quinne i in. (1999)

Erozja gleby podczas zbioru roślin okopowych

Największe straty gleby występują podczas zbioru buraków cukrowych ($17 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$), natomiast mniejsze podczas zbioru ziemniaków (średnio $2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$). Uprawy te stanowią ogółem 4.6% powierzchni gruntów ornych w Europie (Boardman i Poesen, 2006). Masa gleby wynoszona z pola jest uzależniona od wilgotności gleby w trakcie zbioru. Największe straty gleby występują na glebach o składzie mechanicznym glin oraz utworów pyłowych, mniejsze na glebach piaszczystych. Ta forma erozji zachodzi równomiernie na całej powierzchni pola, niezależnie od formy rzeźby.

Erozja gleby wskutek mechanicznego wyrównywania rzeźby

Wyrównywanie powierzchni pola przy wykorzystaniu ciężkiego sprzętu mechanicznego jest dość częstym zabiegiem stosowanym na gruntach użytkowanych rolniczo w niemal wszystkich krajach Europy. Prace niwelacyjne towarzyszyły komasacji gruntów ornych, zasypywaniu wąwozów efemerycznych lub naturalnych, tworzeniu tarasów polnych oraz przygotowywaniu pola pod nawadnianie. Obecnie zabiegi te są powszechnie stosowane podczas zakładania winnic oraz

plantacji drzew oliwkowych w terenach o znacznym zróżnicowaniu rzeźby (Boardman i Poesen 2006).

Degradacja gleby wskutek erozji

Degradacja gleby oznacza pogorszenie właściwości lub funkcji gleby uważanych za cenne pod względem użytkowania rolniczego. Skutki degradacji gleby pod wpływem erozji można podzielić na krótkotrwałe, ograniczone w czasie do kolejnego zabiegu uprawowego oraz długotrwałe, trudne lub niemożliwe do usunięcia przez zabiegi melioracyjne.

Krótkotrwałe skutki erozji gleb

Za główny krótkotrwały efekt degradacji gleby w wyniku erozji wodnej uznaje się skorupę powierzchniową, zagęszczoną przypowierzchniową warstwę gleby o grubości od kilku milimetrów do kilku centymetrów, powstającą podczas opadu lub nawadniania. Skorupa w porównaniu do gleby znajdującej się poniżej, charakteryzuje się zmniejszoną porowatością, obniżonym przewodnictwem wodnym i zwiększonym oporem na ścinanie podczas wysychania. Utrudnia ona wymianę ciepła, powietrza i wody między glebą a atmosferą. Powstanie skorupy jest wynikiem interakcji procesów fizycznych (rozpad agregatu, zagęszczenie warstwy gleby) i fizykochemicznych (dyspersja cząstek iłu związana z oddziaływaniem wody opadowej o niskim przewodnictwie elektrycznym na połączenia wewnątrz minerałów, oddziaływanie sił ssących między cząstkami gleby, prowadzące do upakowania rozproszonych cząstek iłu w zagęszczoną warstwę). Powstawanie skorupy jest procesem dynamicznym, obejmującym w początkowej fazie nawilżenie, rozpad i/lub deformację agregatu, przemieszczenie cząstek oraz zagęszczenie cienkiej przypowierzchniowej warstwy gleby (skorupa strukturalna). Podczas opadu skorupa utrzymuje się w stanie dynamicznej równowagi procesów niszczenia i odnawiania (skorupa erozyjna), a w końcowej fazie opadu podlega stabilizacji w wodzie stojącej (skorupa sedymentacyjna). Zdolność do infiltracji wody dla skorup erozyjnych i sedymentacyjnych zawiera się w zakresie od 0 do $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, a dla strukturalnych od 0 do $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Wyróżniane są dwa stany skorupy powierzchniowej gleby wilgotny (seal) i suchy (crust), charakteryzujące się zróżnicowaną wytrzymałością mechaniczną (Boardman i Poesen 2006).

Szybkość powstania skorupy strukturalnej oraz właściwości wodne i mechaniczne zależą od składu granulometrycznego gleby, zawartości materii organicznej i stabilności agregatów, mineralogii iłu, właściwości roztworu glebowego w tym zawartości sodu wymiennego oraz wilgotności przypowierzchniowej warstwy gleby. Szybkość powstawania skorupy zależy nie tylko od właściwości gleby, ale i erozyjności opadu. W Europie środkowej i północnej, w której przeważa-

ją opady o relatywnie małej erozyjności, zaskorupianie gleb występuje najczęściej w obszarach lessowych, na glebach lekkich obszarów polodowcowych oraz aluwiałach, natomiast w Europie południowej na każdej glebie.

Długotrwałe skutki erozji gleb

Głównym długotrwałym skutkiem erozji gleb jest modyfikacja budowy gleby (pedonu) oraz zróżnicowanie właściwości warstwy ornej gleby i podglebia w obrębie pola, obejmujące skład granulometryczny, zawartość i jakość próchnicy. Modyfikacja budowy gleby polega na utracie poziomów genetycznych lub ich części wskutek erozji lub nadbudowie profilu gleby o przemieszczony zerodowany materiał glebowy. Zróżnicowanie właściwości jest wynikiem wydobywania podczas uprawy roli materiału glebowego z głębszych poziomów gleby i rozprowadzania go po powierzchni gleby podczas uprawy i erozji wodnej. Stąd też głębokość gleby oraz rodzaj materiału tworzącego głębsze poziomy genetyczne gleby wywierają decydujące znaczenie na zróżnicowanie właściwości warstwy ornej gleb w terenach urzeźbionych. Modyfikacja budowy pedonu może być efektem długoletniego oddziaływania erozji uprawowej i wodnej/wietrznej lub krótkotrwałej celowej działalności człowieka, polegającej na wyrównywaniu rzeźby obszarów rolniczych.

Określenie stopnia przekształcenia pedonu stanowi podstawę wydzielenia klas erozji gleby. Klasyfikacja stosowana w USA obejmuje cztery klasy erozji o utracie <25; 25-75; >75% oraz całości poziomu A i E (*Soil Survey Division Staff*, 1993). W praktyce wydzielenie klas erozji odbywa się poprzez określenie udziału poziomu B w warstwie ornej. Gleby słabo zerodowane zawierają od 0 do 25% poziomu B, średnio zerodowane 25-75%, a silnie zerodowane >75%. W obszarach występowania gleb płowych wytworzonych z lessu jest stosowana klasyfikacja, w której utrata każdego poziomu genetycznego gleby oznacza zmianę klasy zerodowania (Turski i in., 1992). Gleba nieerodowana charakteryzuje się pełną sekwencją poziomów genetycznych gleby płowej, słabo zerodowana – utratą poziomu E, średnio – Bt1, silnie – Bt2, a bardzo silnie (całkowicie) zerodowana – BC. Gleby słabo zerodowane z uwagi na występowanie poziomu Bt1 bezpośrednio pod warstwą orną były dawniej błędnie klasyfikowane jako gleby brunatne. W aktualnie obowiązującej systematyce gleb Polski są one oznaczone, jako zerodowane gleby płowe.

Modyfikacja pedonu skutkuje zróżnicowaniem składu granulometrycznego w warstwie ornej gleby. Największe zróżnicowanie występuje w glebach płowych oraz płytkich glebach niecałkowitych, zalegających na podłożu o innym składzie mechanicznym. W glebach płowych wytworzonych z lessu, zawartość ilu w glebach nieerodowanych wynosi 9%, następnie zwiększa się wraz z wprowadzeniem do warstwy ornej materiału z poziomu Bt, dochodząc do 14-18% w glebach średnio i silnie zerodowanych, po czym ulega zmniejszeniu do 10-12%, gdy wydobywany

jest materiał z poziomów BC oraz C (Turski i in. 1992, Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2004). W glebach obszarów młodogłacjalnych zawartość iłu jest bardziej zróżnicowana i zawiera się od 10 do 60% w warstwie ornej (Heckrath i in. 2005). Na podobnie duże zróżnicowanie zawartości iłu wskazują badania prowadzone na płytkich lessach zalegających na utworach ilastych (Timlin i in. 1998).

Konsekwencją erozji gleb jest obniżenie zawartości węgla organicznego w warstwie ornej gleb erodowanych. Obniżenie zawartości próchnicy jest powodowane uwolnieniem substancji organicznej podczas rozpadu agregatów glebowych oraz przemieszczeniem substancji organicznej wraz ze sływem powierzchniowym do miejsc sedimentacji. Obniżenie zawartości próchnicy w warstwie ornej gleb erodowanych w odniesieniu do gleb nieerodowanych wynosi w glebach płowych wytworzonych z lessu 19-44.0% (Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2004, Licznar i in. 1998). Jednak jak wykazują badania Turskiego i in. (1992), zawartość próchnicy w glebach nieerodowanych i erodowanych może być w niewielkim stopniu zróżnicowana (1.52-1.66%). Obniżeniu zawartości próchnicy towarzyszą zmiany jakościowe próchnicy glebowej. W glebach erodowanych zmniejsza się zawartość kwasów huminowych, wzrasta kwasów fulwowych oraz zwiększa się udział związków nie w pełni zhumifikowanych, zaś kwasy huminowe charakteryzują się małą cząsteczką i niewiele różnią się od kwasów fulwowych.

Zmiany składu granulometrycznego oraz zawartości i jakości próchnicy wpływają na właściwości warstwy ornej gleby. Wzrost zawartości iłu koloidalnego w glebach erodowanych powoduje wzrost gęstości objętościowej warstwy ornej gleby, zmniejszenie jej porowatości, przewodnictwa wodnego oraz retencji wodnej (Turski i in. 1992, Licznar i in. 1998, Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2004). Pociąga to za sobą wzrost podatności gleby na zagęszczenie. Dalsza redukcja pedonu gleby polegająca na wprowadzeniu materiału z poziomu BC oraz C do warstwy ornej powoduje poprawę właściwości fizycznych gleby. Zwiększeniu ulega polowa pojemność wodna i retencja wody użytecznej oraz całkowita pojemność sorpcyjna i suma kationów wymiennych (Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2004).

Zróżnicowanie właściwości gleby w obrębie pola uprawnego

Procesy erozji prowadzą do zróżnicowania w rozmieszczeniu gleb w obrębie uprawnych terenów urzeźbionych. W starszych opracowaniach gleboznawczych dominował opis wskazujący na występowanie gleb nieerodowanych na wierzchołkach, erodowanych na stokach i deluwialnych u podnóży stoków. Potwierdzał on hipotezę o decydującym znaczeniu erozji wodnej w przekształceniu gleby. Wprowadzenie uprawy mechanicznej spowodowało erozję gleb w obrębie wierzchołków oraz złagodzenie rzeźby wierzchołków i stoków. Obecnie gleby nie erodowane najczęściej można spotkać u podnóży stoków, w miejscu równo-

wagi procesów erozji i akumulacji (Rys. 2.2.11). Rozmieszczenie gleb zależy nie tylko od natężenia procesów erozji wodnej i uprawowej, ale przede wszystkim od rzeźby pierwotnej. Najszybciej modyfikacja pedonu zachodzi w obszarach o niewielkich różnicach wysokości względnej i dużym zróżnicowaniu mikrorzeźby, do których należą obszary młodo-glacialne i lessowe.

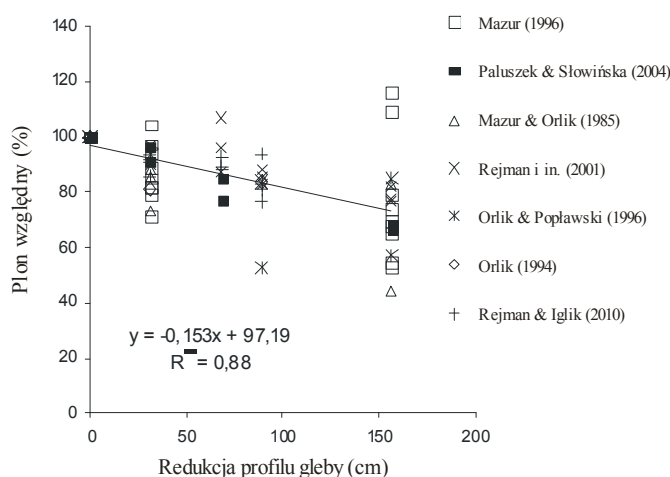


Rys. 2.2.11. Zróżnicowanie budowy gleby pługowej wytworzonej z lessu, gleba słabo zerodowana występuje w obrębie wierzchowiny, gleba nieerodowana u podnóża stoku, Płaskowyż Nałęczowski (Wyżyna Lubelska), fotografia własna

Degradacja gleby wskutek erozji a plon roślin

Jedną z metod oceny degradacji funkcji gleby wskutek erozji jest analiza zależności między redukcją budowy pedonu i plonowaniem roślin. Bakker i in. (2004) wyróżnia dwa rodzaje reakcji roślin, stopniowe obniżenie plonu wraz z redukcją pedonu oraz wzrost plonu w początkowej fazie produkcji pedonu (odpowiadającej włączeniu poziomu B do warstwy ornej) i obniżenie plonu wraz z dalszą redukcją miąższości gleby. Pierwszy rodzaj reakcji związany jest z ograniczoną dostępnością składników pokarmowych dla roślin, natomiast drugi z występowaniem deficytu wody lub fizycznych czynników ograniczających rozwój korzeni roślin w podglebiu (ilastym lub skale macierzystej). Średnie obniżenie plonu wynosi 4,3% na każde 10 cm utraty gleby. Relacja plon-redukcja pedonu nie jest stała i zmienia się wraz z warunkami pogodowymi, głównie wielkością opadów, ich rozkładem oraz ewapotranspiracją. Na glebach wytworzonych z lessu zalegającego na podłożu o dużej zawartości łu, wpływ redukcji pedonu na obniżenie plonu roślin stwierdzono jedynie w latach suchych, podczas gdy w latach wilgotnych plony na glebach

nieerodowanych i erodowanych były zbliżone (Timlin i in. 1998). W warunkach klimatyczno-glebowych Wyżyny Lubelskiej (gleby płowe wytworzone z lessu), największe plony uzyskuje się na glebach deluwialnych, słabo zerodowanych oraz nieerodowanych, mniejsze na średnio i silnie zerodowanych oraz najmniejsze na glebach bardzo silnie zerodowanych (Paluszek i Słowińska-Jurkiewicz 2004, Rejman i Iglík 2010). Średnie różnice między plonami na glebie nieerodowanej i bardzo silnie zerodowanej są największe w uprawie kukurydzy (40%) oraz jęczmienia jarego (30%) i mniejsze w uprawie pszenicy oraz jęczmienia ozimego (15-25%). Gleby bardzo silnie zerodowane oraz deluwialne charakteryzuje największa zmienność plonowania w porównaniu do pozostałych gleb (Rys. 2.2.12).



pluga obracalnego, zastąpienie orki płużnej przez uprawę bezorkową, wykonywanie głęboszowania, zadarnienie dróg spływu oraz stosowanie pasów zadrzewień.

Obecnie prowadzoną działalność rolniczą charakteryzują uproszczenia w płodozmianie (przechodzenie na monokulturę roślin zbożowych, rezygnacja z poplonów i wsiewek oraz roślin bobowatych), ograniczenie nawożenia organicznego oraz wynoszenie słomy z pól. Towarzyszy temu wzrost powierzchni upraw roślin warzywnych i krzewów owocowych, zapewniających słabą okrywą gleby w początkowym okresie wegetacji roślin. Warunki te obecnie stwarzają znacznie większe zagrożenie gleb przez erozję wodną i wietrzną niż w przeszłości. Zapobiec temu może zmiana sposobu uprawy roli, polegająca na rezygnacji z orki płużnej i zastąpienie jej uproszczoną konserwacyjną uprawą roli, z siewem bezpośrednim oraz mulczowaniem. System ten stwarza korzystne warunki do rozwoju życia biologicznego, głównie dżdżownic oraz zwiększenia zawartości substancji organicznej w glebie. W glebie pozostającej w systemie uproszczonej konserwacyjnej uprawy roli, liczba dżdżownic wynosi od 10 do 40 na 1 m² powierzchni. Kanalki wydrążone przez dżdżownice polepszają warunki infiltracji wody, zwiększając jej zapas w glebie i ograniczają spływ powierzchniowy. Podobny cel, zwiększenie zapasu wody, miała jesienna orka głęboka. Jednak nadal najważniejszym elementem ochrony gleby przed erozją pozostaje prawidłowa organizacja układu pól w obrębie zlewni oraz zadarnienie dróg spływu powierzchniowego.

PIŚMIENNICTWO

- Asseng S., Aylmore L.A.G., MacFall J.S., Hopmans J.W., Gregory P.J., 2000. Computer-assisted tomography and magnetic resonance imaging. In: Smit A.L., Bengough, A.G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S., van de Geijn, S.C. (Eds.), *Root Methods A Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 343-363.
- Assouline S., 2011. Bulk density of soils and impact on their hydraulic properties. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht,
- Bakker M.M, Govers G., Rounsevell M.D.A., 2004. The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena* 57, 55-76.
- Blum W.E.H., 2011. Physical degradation of soils, risks and threats. In: Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 562-563.
- Dębicki R., Gliński J., Lipiec J., Pukos A., Turski R., 1993. Soil strength, stability and structural state of Orthic luvisols under different land use. *Intern. Agrophysics*, 7, 155-161.
- EEA. 2012. Soil erosion (CLIM 028) – Assessment published Nov 2012. European Environment Agency (www.eea.europa.eu).
- Flessa H., Ruser R., Schilling R., Loftfield N., Munch J.C., Kaiser E.A., Beese F., 2002. N₂O and CH₄ fluxes in potato fields: automated measurement, management effects and temporal variation. *Geoderma*, 105, 307-325.
- Gliński J., Horabik J., Lipiec, J. (Eds.), 2011. *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York.

- Govers G., Vandaele K., Desmet P., Poesen J., Bunte K., 1994. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *European Journal of Soil Sciences* 45, 469-478.
- Håkansson I., Lipiec J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53, 71-85.
- Heckrath G., Djurhuus J., Quine T.A., Van Oost K., Govers G., Zhang Y., 2005. Tillage erosion and its effect on soil properties and crop yield in Denmark. *Journal of Environmental Quality*, 34, 312-324.
- Horn R., 2011. Management effects on soil properties and functions. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 447-455.
- Horn R., Fleige, H., 2011. Soil structure and mechanical strength. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 777-780.
- Józefaciuk C., Józefaciuk A., 1995. Erozja agroekosystemów. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, 1-168.
- Kodeks dobrej praktyki rolniczej, 2004. (red.: Duer I., Fotyma M., Madej A.). Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi oraz Ministerstwo Środowiska, Fundacja Programów Pomocy dla Rolnictwa, Warszawa, 1-96.
- Licznar M., Licznar S.E., T. Zawerbny T. 1998. Wpływ erozji na niektóre właściwości fizykochemiczne gleb lessowych Dolnego Śląska. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica*, 4A/98, 29-39.
- Lipiec J., Hatano R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116, 107-136.
- Lipiec J., Arvidsson J., Murer E., 2003. Review of modelling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. *Soil & Tillage Research*, 73, 15-29.
- Lipiec J., Doussan C., Nosalewicz A., Kondracka K., 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review *Int. Agrophysics* 27, 4, 463-477.
- Paluszek J., Słowińska-Jurkiewicz A., 2004. Problematyka jakości gleb wytworzonych z lessu podlegających erozji wodnej. *Acta Agrophysica – Rozprawy i Monografie* 5, 89-100.
- Peng X., 2011. Anisotropy of soil physical properties. In: Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht, 55-57.
- Rejman J., Iglík I. 2010. Topsoil reduction and cereal yields on loess soils of southeast Poland. *Land Degradation and Development*, 21, 401-405.
- Schjøning P., Heckrath G., Christensen, B.T., 2009. Threats to soil quality in Denmark: A review of existing knowledge in the context of the EU Soil Thematic Strategy. DJF Report Plant Science No. 143, The Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University.
- Soil Survey Division Staff, 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- Timlin D.J., Pachepsky Ya., Snyder V.A., Bryant R.B., 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 764-773.
- Turski R., Paluszek J., Słowińska-Jurkiewicz A. 1992. The effect of erosion on the spatial differentiation of the physical properties of Orthic Luvisols. *Int. Agrophysics* 6, 123-136.
- Van Rompaey A.J.J., Vieillefont V., Jones R.J.A., Montanarella L., Verstraeten G, Bazzoffi P., Dostal T, Krasa J, de Vente J., Poesen J., 2003. Validation of soil erosion estimates at European scale. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. European Soil Bureau Research Report No.13, EUR 20827 EN, 1-26.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Handbook 537. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C., 1-58.

2.3. Tlenowe uwarunkowania melioracji wodnych gleb uprawnych

Janusz Ostrowski

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Falenty

Gleba kształtuje się i rozwija w interakcji między substratem, z którego jest zbudowana a biosferą, dla której jest ośrodkiem życia – dostarczycielem wody, tlenu i składników pokarmowych. W naturalnych warunkach siedliskowych istnieje stan równowagi między biosferą a hydrosferą glebową, którą zapewniają właściwe proporcje trójfazowego układu gleb. Naruszenie tych proporcji jest jednym z ważniejszych czynników degradacji gleb i ich walorów rolniczo-produkcyjnych. Bezpośrednim sprawcą tej degradacji jest jednak nieprawidłowa gospodarka tlenem uzależniona od zawartości wody w profilu gleby.

Faza ciekła (woda) i faza gazowa (powietrze), mimo ścisłej współzależności z ukształtowanymi wymaganiami środowiska glebowego, tworzą układ antagonistyczny, destabilizujący stan homeostazy w glebie. Nadmiar tlenu (przy niedoborze wody stymulującym procesy utleniania) sprzyja degradacji organicznego komponentu gleby, natomiast nadmiar wody (przy niedoborze tlenu) prowadzi do degradacji mineralnych składników gleby powodowanej rozwojem procesów oksydoredukcyjnych. Takie ujęcie roli wody i tlenu w kształtowaniu właściwości i stanu środowiska glebowego wyznacza nowy etap holistycznego podejścia do rozumienia i parametryzowania warunków powietrzno-wodnych w glebach, ukierunkowującego, opartą na metodach agrofizycznych, diagnostykę tych warunków dla potrzeb ich melioracyjnej korekty. Powinna ona sprzyjać zarówno poprawie efektywności rolniczego użytkowania gleb, jak i przyczyniać się do ich ochrony przed degradacją spowodowaną niedoborem lub nadmiarem tlenu.

W oparciu o powyższe przesłanki można uaktualnić paradygmat melioracji oparty na podejściu objawowym, w którym regulacja zawartości wody w glebie jest głównym celem melioracji, na rzecz podejścia procesowego, w którym woda jest regulatorem gospodarki tlenowej gleby w celu zapobiegania jej hydrooksygenicznej degradacji.

Rolnicze i środowiskowe aspekty melioracyjnego kształtowania warunków ograniczających niedotlenienie gleb uprawnych

Siedliska naturalne mają zdolność ewoluowania sprzyjającego dostosowaniu się do warunków tlenowych panujących w glebie. Dla roślin uprawnych warunki te muszą być stabilizowane w procesie uprawy lub melioracji gleb.

Rośliny i mikroorganizmy glebowe mają do dyspozycji tlen we wszystkich trzech fazach gleby:

- w fazie gazowej jest on zawarty w powietrzu wypełniającym wolne przestrzenie w glebie (pory),
- w fazie ciekłej występuje jako składnik roztworu glebowego,
- w fazie stałej tlen stanowi składnik związków chemicznych tworzących mineralną i organiczną masę glebową.

Pobierają go z fazy ciekłej, w której uzupełniany jest z fazy gazowej (powietrza glebowego). Taki tryb pozyskiwania tlenu w warunkach niezbędnej jego podaży tworzy stan swoistej homeostazy środowiska glebowego, charakteryzującej właściwe stosunki powietrzno-wodne w glebie. Sprzyja on właściwemu przebiegowi zachodzących w glebie reakcji utleniania (oksydacji). Zapotrzebowanie na tlen przez korzenie i mikroorganizmy zależy od temperatury gleby oraz od okresu wegetacji i może osiągać wielkość do $300 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{dobe}^{-1}$ (Stępniewska 1988).

Zaburzenia tego stanu wywołują zwykle ilościowe zmiany fazy ciekłej, wyrażające się wzmożonym nasyceniem gleby wodą, albo opadową, albo przez podnoszenie się poziomu wody gruntowej lub niekiedy w drodze zalewów powierzchniowych. Przy pełnym zawodnieniu gleby, rośliny i mikroorganizmy mają jeszcze do dyspozycji tlen rozpuszczony w roztworze glebowym, a po wyczerpaniu jego zapasu mikroorganizmy zmuszone są do pozyskiwania tlenu z fazy stałej redukując tworzące glebę związki chemiczne. Procesy pozyskiwania tlenu ze składników mineralnych i organicznych gleby noszą miano procesów redukcyjnych. Ich ujemnym skutkiem jest degradacja gleb.

Całokształt procesów związanych z gospodarką tlenową w glebie nosi miano procesów oksydoredukcyjnych. Ich przebieg i charakter okazuje istotny wpływ na kształtowanie się siedlisk naturalnych oraz na przydatność gleb do rolniczego użytkowania. Nie tylko gleby uprawne, ale również siedliska naturalne mogą ulegać degradacji przy nagłych zakłóceniach trójfazowego układu w glebach spowodowanych wyparciem przez wodę powietrza z gleby. W przypadku ochrony tych siedlisk wymagana jest ingerencja człowieka poprzez stosowanie odpowiednich zabiegów melioracyjnych.

Granicznym wyznacznikiem prawidłowego natlenienia gleb jest zapas tlenu rozpuszczonego w roztworze glebowym przy całkowitym nasyceniu gleby wodą. Po jego wyczerpaniu występuje u roślin stres, który przy długotrwałym niedotlenieniu, mimo zdolności roślin do wytwarzania w korzeniach aerynychymy, może zakończyć się ich obumieraniem oraz patologicznymi zmianami części nadziemnej.

Czas, w ciągu którego w środowisku glebowym rozdysponowany jest tlen z roztworu glebowego w tych samych warunkach termicznych jest różny i zależy od aktywności biologicznej i genetycznych właściwości gleb. Ponieważ po wyczer-

paniu jego zapasu rozwijają się w glebie niekorzystne procesy redukcyjne, czas ten określa odporność gleb na redukcję budujących ją związków chemicznych.

Stan natlenienia gleby i zaawansowania oraz rodzaju procesów redukcji parametryzuje potencjał oksydoredukcyjny (Eh). Pojęcie to określa umownie napięcie elektryczne mierzone wobec elektrody o stałym potencjale i wyrażone w miliwoltach. W zależności od rozwoju procesów oksydoredukcyjnych wartości Eh wynoszą od +700 mV dla gleb dobrze natlenionych do -400 mV w glebach zredukowanych, długotrwale zalanych wodą.

W glebach natlenionych redukowany tlen uzupełniany jest w procesie aeraacji i przechodzenia do roztworu glebowego. W przypadku wyczerpania się jego zapasu w roztworze glebowym następuje kolejno redukcja azotanów (przy Eh +450 mV), połączeń tlenowych manganu (ok. +400 mV) i żelaza (+300 mV), a w przypadku głębokiej, długotrwałej redukcji (-150 mV) następuje rozkład siarczanów.

W warunkach intensywnej redukcji masy glebowej, oprócz zakłócenia procesu pobierania tlenu następuje również ograniczenie aktywnego pobierania przez rośliny wielu składników pokarmowych. Występuje natomiast wzmożone pobieranie przez rośliny zredukowanych form żelaza i manganu. Stany niedotlenienia, występujące nawet we wczesnych fazach rozwojowych roślin, pozostawiają trwałe ślady w postaci niekorzystnego składu mineralnego pozyskiwanego plonu, zarówno części wegetatywnych jak i nasion, a spadek plonu pozostaje w ściślejszej zależności z ilością dni, w których $Eh < +300$ mV.

W aspekcie rolniczym ważne są również przemiany azotu w glebie, wpływające na stopień jego wykorzystania przez rośliny, a tym samym na efektywność nawożenia azotowego. Proces redukcji związków azotu w glebie nie wywiera piętna na jej morfologicznym obliczu. Identyfikacja tego procesu jest więc możliwa tylko poprzez badania chemiczne. Zachodzące w glebie procesy redukcji azotanów mają też konsekwencje środowiskowe. Są one szczególnie groźne w przypadku ulatniania się N_2O do atmosfery, który wpływa na poziom stratosferycznego ozonu. W glebach kwaśnych wyczerpanie zapasu tlenu w roztworze glebowym o temperaturze $+20^\circ C$ może spowodować ubytek połowy obecnych w glebie jonów NO_3^- w ciągu 7 dni (Stępniewska 1988).

Parametryzacja odporności oksydoredukcyjnej gleb

Intensywność procesów oksydoredukcyjnych zależy od temperatury i miejsca ich występowania w profilu gleby. Wzmaga się ona wraz ze wzrostem temperatury gleby i maleje w głąb profilu glebowego. Z chemicznego punktu widzenia wiąże się z przenoszeniem elektronów, któremu towarzyszy określony potencjał elektrochemiczny mierzony w miliwoltach (potencjał redoks), a jego wartość maleje w miarę zaawansowania redukcji masy glebowej. Jest on więc sygnaliza-

torem stanu natlenienia gleby. Przyjęto, że parametryczne odróżnienie gleby nie-dotlenionej od natlenionej stanowi wartość $Eh = + 300$ mV. Czas tego spadku (wyrażony w dobach) Eh w glebie do tej wartości parametryzuje oksydoredukcyjną odporność gleb. Istota użycia odporności na redukcję chemiczną mineralnego substratu gleby jako temporalnego wskaźnika parametryzacji stanu jej natlenienia ma swoją głęboką wymowę ekologiczną i rozszerza holistyczne podejście do melioracji odwadniająco-nawadniających, bowiem roślina ginie nie od nadmiaru wody w glebie, lecz od niedoboru tlenu i odwrotnie, nie od nadmiaru tlenu, lecz niedoboru wody.

W IAPAN w Lublinie opracowano metodę parametryzacji oksydoredukcyjnej odporności gleb z uwzględnieniem jej zmienności w profilu gleby w zależności od temperatury. Polega ona na pomiarach potencjału redoks w czasie inkubacji próbek, w ustalonej temperaturze, przesianych przez sito 1 mm, w warunkach zalania wodą (przy stosunku wagowym gleby do wody równym 1:1), przy braku dopływu tlenu z powietrza atmosferycznego. Z wykreślonego dla każdej próbki glebowej przebiegu zmian potencjału redoks w czasie, wyznaczono wartość t_{300} . Oznaczenia odporności oksydoredukcyjnej wykonywano w trzech warstwach gleby: ornej, podornej i podglebia przy zróżnicowanej temperaturze badanej gleby:

- + 4°C – warunki termiczne nie sprzyjające wegetacji,
- + 10°C – ciepłota charakterystyczna dla inicjalnych faz rozwoju roślin uprawnych,
- + 15°C – średnia temperatura okresu wegetacji,
- + 20°C – temperatura gleby odpowiadająca warunkom pełnej wegetacji w miesiącach letnich.

Metodę tę przetestowano przy współdziałaniu IMUZ w skali kraju, na próbkach gleb z 1000 charakterystycznych profili mineralnych gleb ornich. Dokonano syntezy uzyskanych wyników, opublikowanej w formie Atlasu oksydoredukcyjnych, właściwości gleb ornich Polski, które pogrupowano według ich oksydoredukcyjnej odporności wyróżniając następujące grupy waloryzacyjne:

A. Gleby o nieznaczonej odporności – przy temperaturze większej od + 10°C ich Eh spada poniżej + 300 mV w czasie $t_{300} < 3$ dni, a przy temperaturze + 4°C $t_{300} > 10$ dni.

B. Gleby o ograniczonej odporności – spadek Eh poniżej + 300 mV przy temperaturze większej niż + 10°C następuje w czasie $t_{300} \approx 10$ dni a przy + 4°C w okresie dłuższym niż 10 dni.

C. Gleby o zróżnicowanej odporności, w których przy temperaturze gleby przekraczającej +10°C Eh obniża się poniżej + 300 mV przeważnie w czasie $t_{300} \approx 10$ dni, a przy + 4°C wartość tę osiąga po 15 dniach.

D. Gleby o wydłużonej (w czasie) odporności – $Eh < + 300$ mV przy temperaturze gleby + 20°C obniża się w ciągu $t_{300} > 3$ dni a przy + 4°C okres $t_{300} > 20$ dni.

Pogrupowanie gleb według tego podziału wskazuje, że najbardziej wrażliwe na procesy redukcyjne są rędziny. W grupie B znalazły się czarnoziemy i inne gleby lessowe, a w grupie C – czarne ziemie i mady. Gleby piaskowe i gliniaste wytworzone z utworów wodnolodowcowych i lodowcowych należą do najbardziej odpornych na rozwój procesów oksydoredukcyjnych.

Wrażliwość gleb na hydrooksygeniczną degradację i jej przestrzenne zróżnicowanie

Gospodarka wodna większości gleb orných Polski uwarunkowana jest tempem i rozmiarami zasilania wodą pochodzącą z opadów atmosferycznych lub ze spływu powierzchniowego. Taki typ gospodarki wodą przyjęto do modelowania ruchu wody i czasu jej stagnowania w profilu gleby. W warunkach polowych stan całkowitego wysycenia wodą porów glebowych, ograniczającego dostęp tlenu atmosferycznego, zależy od pojemności wodnej gleby, a czas, w ciągu którego uwalniane są pory „grawitacyjne” (makropory) od współczynnika przewodnictwa wodnego.

Przy znajomości oksydoredukcyjnej odporności gleb wyrażonej czasem t_{300} poszukiwanym parametrem jest więc czas, w ciągu którego gleba przejdzie od stanu pełnego nasycenia wodą do stanu uwilgotnienia odpowiadającego połowej pojemności wodnej PPW. Oznaczono go T_{ppw} i zdefiniowano jako czas samonattlenienia (poprzez napowietrzenie) gleby.

Matematyczny opis modelu grawitacyjnego odpływu wody z profilu glebowego opracowano w IAPAN w trakcie badań nad charakterystyką hydrofizycznych właściwości gleb orných Polski. Idea jego sformułowania opiera się na opisie ruchu wody przy pomocy jednowymiarowych równań różniczkowych pierwszego rzędu z uwzględnieniem gęstości strumienia wody zależnego od potencjału wody glebowej i współczynnika przewodnictwa wodnego, którego wartości obliczono za pomocą wzoru van Genuchtena. Dzięki matematycznemu zdefiniowaniu warunków brzegowych możliwe jest wyliczenie czasu T_{ppw} , w ciągu którego gleba, w rozpatrywanych warstwach profilu całkowicie nasyconych wodą (CPW), osiąga wilgotność odpowiadającą PPW.

Skwantyfikowania tego parametru dokonano w IA PAN badając przewodnictwo wodne gleb w trzech warstwach diagnostycznych (ornej, podornej i podglebia) o łącznej miąższości 100 cm dla $pF = 0$ odpowiadającego całkowitemu nasyceniu gleby wodą i $pF = 2,2$ odpowiadającego PPW w kilku tysiącach próbek o nienaruszonej strukturze charakteryzujących mineralne gleby orne Polski.

Mając wartości t_{300} i T_{ppw} można było skonstruować kryterium wrażliwości gleb na hydrooksygeniczną degradację wynikającą ze stosunku wyżej podanych parametrów. Graniczny jej wyznacznik to $T_{ppw} > t_{300}$ przy temperaturze gleby $+ 20^{\circ}\text{C}$, a z równania:

$$D_{ho} = t_{300}/T_{ppw} \quad (2)$$

można obliczyć wskaźnik potencjalnej wrażliwości gleb na hydrooksygeniczną degradację i użyć do waloryzacji rozpatrywanych gleb.

Stan anaerobiozy może obejmować całość lub część profilu gleby, albo nie występować wcale. Różnicuje to wrażliwość (podatność) gleb na rozwój tego procesu. Wykorzystując wskaźnik D_{ho} dokonano oceny wrażliwości gleb ornych na hydrooksygeniczną degradację przyjmując następujące oznaczenia i kryteria tej oceny:

N – gleby niewrażliwe na hydrooksygeniczną degradację, w których w całym profilu gleby wskaźnik $D_{ho} \geq 1$,

MW – gleby mało wrażliwe na hydrooksygeniczną degradację, w których warunek $D_{ho} < 1$ spełniony jest w jednej diagnozowanej warstwie (ornej, podornej lub podglebiu),

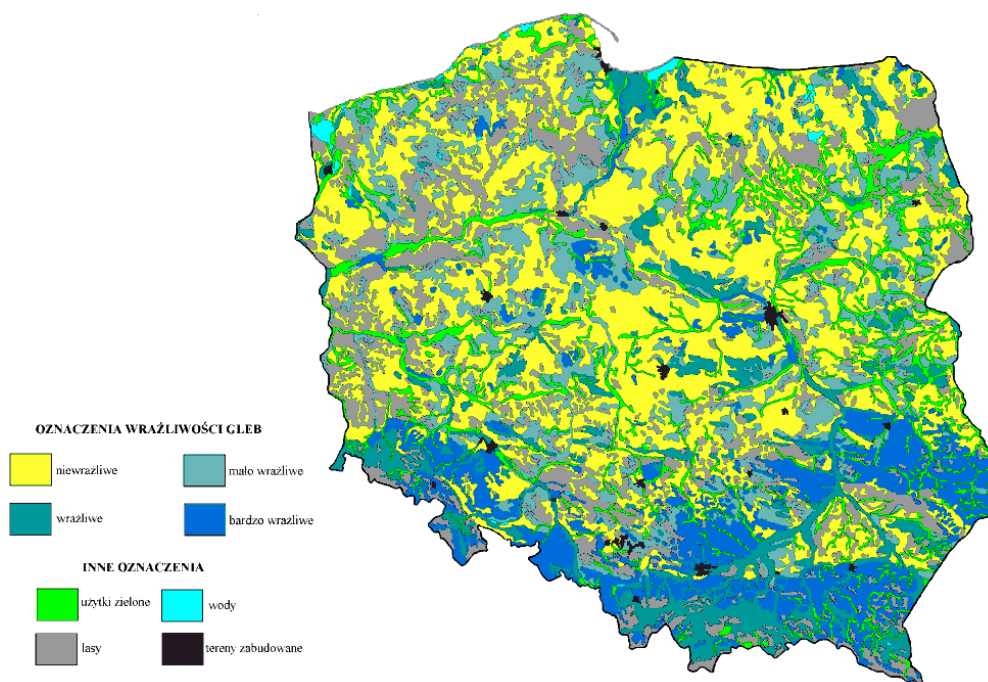
W – gleby wrażliwe na hydrooksygeniczną degradację, w których wskaźnik $D_{ho} < 1$ występuje w dwóch warstwach,

BW – gleby bardzo wrażliwe na hydrooksygeniczną degradację, w których $D_{ho} < 1$ występuje we wszystkich diagnozowanych warstwach profilu gleby.

Grupując gleby według uśrednionych wartości D_{ho} opracowano w IMUZ pogładową mapę potencjalnej wrażliwości gleb ornych na hydrooksygeniczną degradację (Rys. 2.3.1).

Analiza powyższego opracowania wykazała, że gleby najbardziej wrażliwe na hydrooksygeniczną degradację występują w strefie wyżyn południowych i podgórskiej części kraju, gdzie skały macierzyste stanowią lessy i utwory lessowate oraz wapienie, a także zlokalizowane na Niziu Polskim kompleksy czarnych ziem (np. błońsko-sochaczewskich, kujawskich, pyrzyckich). Występowanie gleb wrażliwych związane jest przeważnie z dwuczłonową, piaszczysto-gliniastą lub pyłowo-gliniastą (np. Równina Płocka) teksturą profili gleb, madami oraz górskimi glebami wietrzeniowymi. Gleby niewrażliwe na tę formę degradacji są przeważnie komponentem pokrywy glebowej na Niziu Polskim, reprezentowanym przez lekkie gleby piaskowe.

Przedstawiony parametr ma również wymowę praktyczną popartą uzasadnieniem ekologicznym i rolniczo-produkcyjnym, stanowiąc względnie obiektywne kryterium do melioracyjnej korekty gleb. Wyznacza bowiem dla przypadków $T_{ppw} > t_{300}$ czas, w ciągu którego należy odprowadzić z gleby wodę grawitacyjną ograniczającą dopływ do niej tlenu atmosferycznego.



Rys. 2.3.1. Mapa potencjalnej wrażliwości gleb ornych na hydrooksygeniczną degradację

Zasady melioracyjnego kształtowania gospodarki tlenowej gleb

Zasady melioracyjnego kształtowania gospodarki tlenowej gleb, jako rekapitulację przedstawionego materiału, przedstawiono w postaci uproszczonego schematu (Tab. 2.3.1). Przedstawia on powiązanie omówionych parametrów ze stanami trójfazowego układu gleby i jej zdolność produkcyjną, które wyznaczają potrzebę, rodzaj oraz cel korekty warunków powietrzno-wodnych w glebie za pomocą zabiegów melioracyjnych.

Jak wynika z tej tabeli, przedstawiony materiał skupia się głównie na badaniach i znaczeniu warunków określonych przez $Eh < + 600$ mV. Dla przypadków $Eh > + 700$ mV dominantę w odniesieniu do uprawianych roślin stanowi niedobór wody. Tak też parametryzowane są systemy nawadniające. Równoległe działania nawodnień gleb mineralnych jako czynnika chroniącego je przed nadmierną mineralizacją substancji organicznej oraz możliwością sekwestracji węgla wymaga

dalszych badań wyznaczających melioracyjną poprawę ekologicznej kondycji gleb uprawnych.

Tabela 2.3.1. Uproszczony schemat gospodarki tlenowej gleby

Stan trójfazowego układu gleby	Miernik natlenienia gleby E_h	Dyspozycyjne zapasy tlenu	Energetyczne reakcje utleniania i redukcji	Zdolność produkcyjna gleby	Melioracyjna optymalizacja warunków tlenowych
Nierównoważny z dominacją fazy gazowej nad ciekłą	$> +700\text{mV}$	Nadmiar tlenu produkcyjnego przy ograniczonej ilości nasyconego tlenem roztworu glebowego	Dominacja procesów utleniania i wzmożona mineralizacja materii organicznej	Ograniczona ubytkiem substancji organicznej	Konieczna przez stosowanie nawodnień utrzymujących stan PPW
Równoważny – odpowiadający PPW	$+700\text{ mV}$ $+600\text{ mV}$	Zrównoważony zapas tlenu produkcyjnego w powietrzu i w roztworze glebowym	Swobodne oddychanie tlenowe korzeni i mikroorganizmów glebowych	Optymalna dla danej gleby	Nie wymagana
Nierównoważny z nienaruszoną fazą stałą – odpowiadający CPW	$+600\text{ mV}$ $+400\text{ mV}$	Zapasy tlenu produkcyjnego ograniczone do roztworu glebowego	Oddychanie tlenowe korzeni i mikroorganizmów glebowych do wyczerpania dostępnego tlenu molekularnego w roztworze glebowym	Optymalna dla danej gleby z tendencją do ograniczenia	Dopuszczalna przez stosowanie odwodnień zapobiegających powstawaniu stanów CPW na glebach o bardzo wysokiej produktywności
	$+400\text{ mV}$ $+300\text{ mV}$	Zapasy tlenu nieprodukcyjnego dostępnego z redukcji azotanów	Beztlenowe oddychanie korzeni, pozyskiwanie tlenu przez mikroorganizmy z redukcji azotanów	Ograniczona nieprodukcyjnym ubytkiem azotu	Wskazana przez stosowanie ograniczających stany CPW i zapobiegających stratom nawozów azotowych
Nierównoważny z naruszeniem fazy stałej – odpowiadający CPW	$< +300\text{ mV}$	Zapasy tlenu nieprodukcyjnego z redukcji tlenków manganu i żelaza	Pozyskiwanie tlenu w procesie redukcji przez mikroorganizmy glebowe	Ograniczona toksykacją roztworu glebowego i obumieraniem korzeni	Konieczna przez stosowanie odwodnień likwidujących stany CPW i zapobiegających degradacji gleb

Zakończenie

Przedstawiony w tym rozdziale oryginalny materiał uzyskano w ramach kilkunastoletniej współpracy pracowników Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie i Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, których nazwiska znajdują się w przytoczonych niżej pozycjach literatury.

PIŚMIENNICTWO

- Gliński J., Stępniewski W., Łabuda S., 1983. Pobieranie tlenu i wydzielanie dwutlenku węgla w środowisku glebowym. *Problemy Agrofizyki*, 39, Ossolineum.
- Łabędzki L., Bąk B., Kanecka-Geszke E., Kasperska-Wołowicz W., Smarzyńska K., 2008. Związek między suszą meteorologiczną i rolniczą w różnych regionach agroklimatycznych Polski. *Woda Środ. Obsz. Wiej. Rozp. Nauk. Monogr.* Nr 25.
- Stępniewska Z., 1988. Właściwości oksydoredukcyjne gleb mineralnych Polski. *Problemy Agrofizyki*, 56, Ossolineum.
- Stępniewska Z., Stępniewski W., Gliński J., Ostrowski J., 1997. Atlas oksydoredukcyjnych właściwości gleb ornych Polski. IAPAN, IMUZ.
- Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002. Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornych Polski. *Acta Agrophysica, Rozprawy i Monografie.* 79.

2.4. Termodynamiczny opis niektórych procesów w roślinie

Bogusława Łapczyńska-Kordon

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Przedmiotem badań biotermodynamiki jest układ termodynamiczny – dowolny układ makroskopowy, którym może być pojedyncze ciało materialne zbudowane z dużej liczby atomów lub cząstek, albo też z dużej liczby dowolnych ciał (duża liczba elementów), które poddajemy badaniu (nie jedna cząsteczka wody, ale cząsteczka białka, nie jedna cząsteczka gazu, ale jeden mol tego gazu – 10^{23} cząsteczek). Układ termodynamiczny jest powiązany z otoczeniem wzajemnym oddziaływaniem. Oddziaływanie to polega na wymianie energii i masy. Ze względu na rodzaj kontaktu z otoczeniem wyróżniamy następujące formy układu termodynamicznego (Przestalski 2009):

- układ otwarty – może wymieniać z otoczeniem zarówno masę i energię,
- układ zamknięty – może wymieniać z otoczeniem tylko energię,
- układ adiabatyczny – jest szczególnym przypadkiem układu zamkniętego – nie może wymieniać z otoczeniem energii w formie ciepła,
- układ izolowany – nie wymienia z otoczeniem ani energii, ani masy.

Wszystkie organizmy żywe, a więc i rośliny, są układami termodynamicznymi otwartymi, ponieważ wymiana energii i masy z otoczeniem jest dla nich warunkiem koniecznym zachowania funkcji życiowych.

Dowolny układ termodynamiczny zawsze znajduje się w pewnym stanie, który, ze względu na kryterium stabilności w czasie energii całkowitej, może być stanem równowagi lub stanem nierównowagi. Stan równowagi może być (Przestalski 2009):

- pełny, gdy nie występują w nim żadne zmiany parametrów makroskopowych,
- niepełny, jeśli zostaną zaniedbane bardzo powolne zmiany (np. szklanka z wodą, która paruje w temperaturze pokojowej),
- stacjonarny – zachodzące w nim procesy nie zmieniają wartości makroskopowych parametrów układu.

Stan nierównowagi można opisać, jako stan, w którym zmiany parametrów są nagłe i duże (pojawienie się silnej fluktuacji) lub występuje istotna zmiana otoczenia układu. Jest stanem niestabilnym, który bez nakładu energii nie może być zachowany, ponieważ układ termodynamiczny spontanicznie wraca do stanu

równowagi. Czas potrzebny do zaniku zaburzenia i powrotu do stanu równowagi nazywa się czasem relaksacji lub zaniku fluktuacji.

Opis mikroskopowy układu termodynamicznego pozwala określić stan wszystkich jego elementów, ale nie jest w praktyce możliwy, dlatego w termodynamice stosuje się opis makroskopowy, który ogranicza się do podania niewielkiej liczby parametrów makroskopowych: intensywnych – mających charakter lokalny (temperatura, ciśnienie, gęstość), które w przypadku stanu równowagi, mają taką samą wartość w całej objętości układu. Najmniejsza liczba parametrów intensywnych, niezbędnych do opisu układu, określona jest liczbą stopni swobody układu. Drugi rodzaj parametrów stosowanych do opisu układu termodynamicznego, to parametry ekstensywne, które są proporcjonalne do masy układu (objętość, liczba moli, energia wewnętrzna, entalpia, entropia) (Dołowy 2005).

Jednym z najważniejszych pojęć termodynamiki jest energia (energia kinetyczna, potencjalna itp.). Istnieją dwie wielkości fizyczne, które są równoważne energii – praca i ciepło, które są sposobami przekazywania energii z jednego układu fizycznego do drugiego. Praca i ciepło określają przepływ energii. W ujęciu molekularnym praca jest przekazywaną energią, w celu uporządkowania ruchu cząstek, natomiast ciepło, powoduje ruch chaotyczny cząstek (Dołowy 2005).

Układ termodynamiczny jest opisywany za pomocą funkcji stanu takich jak: energia wewnętrzna U , entalpia H , entropia S , energia swobodna (potencjał termodynamiczny Helmholtza) F oraz entalpia swobodna, energia swobodna Gibbsa (potencjał termodynamiczny Gibbsa) G . Wartości tych funkcji zależą od parametrów makroskopowych, określających aktualny stan układu termodynamicznego.

Pierwsza i druga zasada termodynamiki pozwala na sformułowanie bilansu energetycznego analizowanego układu termodynamicznego.

Na podstawie pierwszej zasady termodynamiki można wyjaśnić, w jaki sposób dochodzi do zmiany energii wewnętrznej, która jest równoważna całkowitej energii układu termodynamicznego (energii kinetycznej, potencjalnej wszystkich elementów układu). Prawo to można przedstawić w następującej postaci (Przełstalski 2009):

$$\Delta U = W + Q \quad (1)$$

gdzie: W – praca bezwzględna (kJ), Q – ciepło (kJ).

Formalnie pierwsza zasada termodynamiki jest równoważna zasadzie zachowania energii – energia układu nie może być wytworzona z niczego. Niemożliwe jest również „zniszczenie” energii, energia jest przetwarzana z jednej postaci w drugą.

Na podstawie pierwszej zasady termodynamiki można wyjaśniać bilans energetyczny układu termodynamicznego działającego w izobarycznych lub i izoch-

rycznych warunkach. W procesie izobarycznym dostarczone ciepło do układu termodynamicznego, wykorzystywane jest na zmianę energii wewnętrznej oraz wykonanie pracy objętościowej, dążącej do zachowania stałego ciśnienia. Z tego wynika definicja nowej funkcji stanu – entalpii H:

$$\Delta H = \Delta U + p\Delta V \quad (2)$$

gdzie: p – ciśnienie (Pa), V – objętość (m³).

Z dostarczaniem ciepła do układu wiąże się pojęcie pojemności cieplnej, definiowanej jako ilość ciepła, jaką należy dostarczyć do układu, aby zwiększyć jego temperaturę o 1°C. W procesie izochorycznym pojemność cieplną definiuje się w następujący sposób (Przestalski 2009):

$$C_v = \frac{\partial U}{\partial T} \quad (3)$$

a w procesie izobarycznym:

$$C_p = \frac{\partial H}{\partial T} \quad (4)$$

Druga zasada termodynamiki odnosi się do funkcji stanu – entropii, S, wskazuje kierunek rozwoju procesów zachodzących w przyrodzie. Drugą zasadę termodynamiki można sformułować następująco:

„Zmiana entropii, będąca wynikiem nieodwracalnego procesu fizycznego zachodzącego w układzie izolowanym, jest zawsze dodatnia, $\Delta S \geq 0$ ”. W szczególności w procesie quasi-statycznym, przy założeniu, że jest odwracalny, zmiana entropii (Przestalski 2009):

$$dS = \frac{Q_{elem}}{T} \quad (5)$$

gdzie: T – temperatura bezwzględna, K.

W termodynamice statystycznej entropię definiuje się poprzez wprowadzenie pojęcia makrostanu i mikrostanu. Dla każdego układu termodynamicznego można określić pewien stan makroskopowy, który może być opisany zbiorem parametrów makroskopowych. Makrostan może być osiągnięty na wiele sposobów, poprzez tzw. mikrostan. Zgodnie z definicją podaną przez Boltzmana, entropia S układu termodynamicznego, znajdującego się w określonym stanie makroskopowym, może być opisana następującą zależnością (Przestalski 2009):

$$C = k \ln \Omega \quad (6)$$

gdzie: Ω – liczba możliwych mikrostanów układu termodynamicznego,
 k – stała Boltzmanna, równa $1,38 \cdot 10^{23} \text{ JK}^{-1}$.

Wprowadzono zatem inne funkcje termodynamiczne, umożliwiające dokładniejszy opis mikrostanu układu termodynamicznego (Ślósarek 2011):

- energię swobodną Helmholtza:

$$C = U - TS \quad (7)$$

- energię swobodną Gibbsa:

$$G = H - TS \quad (8)$$

Kierunek zmian wyznaczają tzw. potencjały termodynamiczne. Zmiany potencjałów termodynamicznych określają kierunek procesów zachodzących w układzie termodynamicznym. W termodynamice chemicznej, gdzie podstawowym układem termodynamicznym jest mieszanina cząstek różnego rodzaju, podstawowym potencjałem termodynamicznym jest energia swobodna Gibbsa. Dla układu otwartego jest on funkcją parametrów intensywnych – temperatury T , ciśnienia p oraz liczby cząsteczek określonego rodzaju n znajdujących się w mieszaninie chemicznej. Na podstawie tego równania wyprowadzono zależność nowej postaci, zwana równaniem Gibbsa-Duhema (Ślósarek 2011):

$$SdT - Vdp + \sum_i n_i d\mu_i = 0 \quad (9)$$

gdzie: n_i – liczba moli składnika i , μ_i – potencjał chemiczny składnika i .

Rośliny stanowią układ termodynamiczny otwarty, wielofazowy, o budowie tkankowej. Procesy termodynamiczne można rozpatrywać w pojedynczej komórce, jak też w tkankach i w całej roślinie pod wpływem wzajemnego oddziaływania otoczenia na układ termodynamiczny zachodzą w komórce, w tkankach a otoczeniem. Procesy te związane są z wymianą energii i masy w roślinie w wyniku procesów dyfuzyjnych oraz przemian chemicznych i fazowych w komórkach.

Roślina jest układem molekularnym nierównowagowym. Taki układ termodynamiczny dąży samorzutnie do osiągnięcia równowagi. Czas potrzebny na osiągnięcie procesu jest bardzo długi. Proces ten nie jest sekwencją przemian w całym układzie w sposób jednorodny. W układzie można określić obszary w przestrzeni rzeczywistej lub w przestrzeni stanów energetycznych, w których mechanizmy fizyczne doprowadzają układ do równowagi częściowej. Można

wyróżnić procesy bardzo szybkie, wolne i bardzo wolne. Druga zasada termodynamiki wskazuje kierunek tych przemian, ale nie umożliwia pełnego wyjaśnienia przemian zachodzących w układzie termodynamicznym, jakim jest organizm żywy. Wskazuje tylko na nieodwracalność procesów zachodzących w tym układzie (Przestalski 2009).

Takie możliwości dają nowe podejście, które nazywa się termodynamiką nierównowagową lub termodynamiką procesów nieodwracalnych. Analizuje ona układy makroskopowe, które osiągnęły etap częściowej równowagi i zakłada, że wszystkie prawa opisujące relacje pomiędzy parametrami makroskopowymi oraz funkcjami stanu określonymi w termodynamice klasycznej, obowiązują w stanach równowagi częściowej.

Zakłada się, że różnice pomiędzy stanem równowagi częściowej wybranego podukładu a stanem równowagi pełnej jest nieduża. Procesy, mechanizmy działające pomiędzy podukładem a pozostałą częścią układu termodynamicznego są powolne. Mechanizmy te regulują np. przepływem energii, w celu wyrównania temperatur, masy dla wyrównania stężeń cząsteczek lub ładunku, żeby zlikwidować np. napięcia elektryczne. Mechanizmy te opisuje liniowa termodynamika procesów nieodwracalnych. Relacja pomiędzy przepływem, strumieniem J_i a siłą termodynamiczną, którą może być: różnica temperatur, różnica stężeń, różnica potencjałów elektrycznych ma postać (Poniewski i in. 2008):

$$J_i = L_{ij} X_j \quad (10)$$

gdzie: L_{ij} – współczynniki kinetyczne lub fenomenologiczne, X_j – siły termodynamiczne.

Poszczególne przepływy mogą zachodzić w tym samym czasie i wzajemnie na siebie wpływać. Stopień sprzężenia q_{ik} pomiędzy przepływem i oraz k opisuje wzór:

$$q_{ik} = \frac{L_{ik}}{L_{ii}L_{kk}} \quad (11)$$

Zgodnie z zasadą Onsagera (zwaną czasami czwartą zasadą termodynamiki) pomiędzy współczynnikami kinetycznymi występuje zależność:

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (12)$$

W roślinie, jako jednym z układów biologicznych, wszystkie rodzaje przepływu mają istotne znaczenie dla życia rośliny. Przepływy te to głównie procesy dyfuzyjne i przepływ osmotyczny, jako szczególny przypadek dyfuzji, jeśli wystąpi różnica

stężeń w poszczególnych fragmentach układu. Proces dyfuzji jest opisany równaniem, które jest matematycznym zapisem II prawa Ficka (Ślósarek 2011):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D\nabla^2 c \quad (13)$$

gdzie: D – współczynnik dyfuzji translacyjnej, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, c – stężenie.

Znak minus oznacza, że równanie opisuje dyfuzję z obszarów o większym stężeniu do obszarów o mniejszym stężeniu.

Osmoza natomiast jest to proces fizyczny, który pojawia się na półprzepuszczalnej błonie umieszczonej pomiędzy dwoma roztworami koloidalnymi. Półprzepuszczalność błony oznacza, że przenikają przez nią z łatwością cząstki fazy rozproszonej. W organizmach żywych błonę półprzepuszczalną stanowi dwuwarstwowa błona lipidowa otaczająca komórkę. W komórkach tych organizmów wykształciły się zatem specjalne układy molekularne, zwane błonowymi układami transportującymi. Dla zobrazowania procesu osmozy można przeanalizować układ, którym jest naczynie przedzielone błoną półprzepuszczalną. Z jednej strony błony naczynie wypełnione jest substancją zbudowaną z małych cząsteczek A, łatwo przenikających przez błonę, a w drugiej części znajduje się substancja o dużych cząsteczkach B, co powoduje przepływ cząsteczek A na drugą stronę błony, Siłą termodynamiczną decydującą o przepływie masy w warunkach osmozy jest różnica potencjałów chemicznych jakichś cząsteczek A po obu stronach błony. Potencjał chemiczny cząsteczek A po stronie tej substancji opisuje wzór (Ślósarek 2011):

$$\mu_A = \mu_A^0 + \ln x_A \quad (14)$$

Ponieważ stężenie cząsteczek A po stronie składnika B jest małe, powoduje to ciągły ich napływ i wzrost objętości od strony składnika B i jednocześnie naprężenie błony półprzepuszczalnej. Napływ składnika A może zostać zahamowany jedynie oporem błony na odkształcenia. W ten sposób w błonie pojawia się naprężenie spowodowane ciśnieniem osmotycznym, w przypadku rośliny – turgor. Wartość tego ciśnienia określona jest prawem van Hoffa (Ślósarek 2011):

$$\Pi = \frac{RT}{M_B} C_B \quad (15)$$

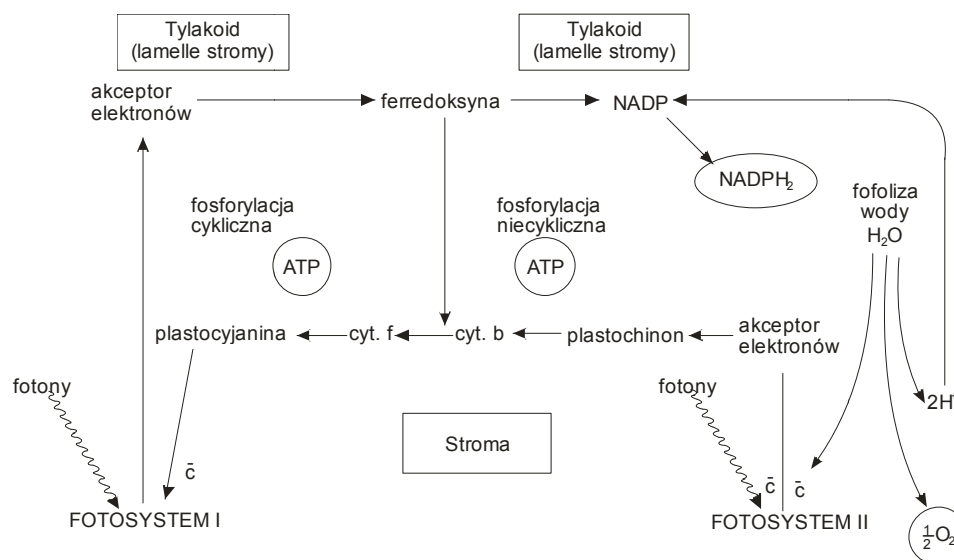
gdzie: C_B – stężenie makrocząsteczek B.

Odpowiednikiem błony półprzepuszczalnej w środowisku naturalnym jest błona lipidowa. Jeśli błona lipidowa oddziela komórkę od otoczenia bardzo ubożego w sole, następuje napływ wody do wnętrza komórki. Taki roztwór jest hipertonicznym. Komórki roślinne są zwykle hipertoniczne względem środowiska. Napływ wody do wnętrza tych komórek generuje ciśnienie wewnętrzne – turgor. W komórce za utrzymanie odpowiedniego turgoru jest wakuola, która jest otoczona błoną lipidową zwaną tonoplastem.

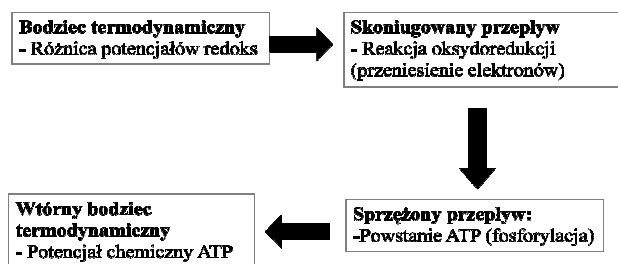
Podstawą bilansu energetycznego w organizmie żywym jest wymiana energii swobodnej ΔG , która opiera się na transformacji energii chemicznej zmagazynowanej w cząsteczkach – nośnikach energii. Za przykład takiej transformacji może posłużyć działanie tzw. motorów molekularnych, czyli białek takich jak miozyna, kinezyzna i dyneina, które konwertują energię chemiczną w energię mechaniczną. Zmagazynowana energia chemiczna wykorzystywana jest również do aktywnego transportu w pompach jonowych oraz w procesach biosyntezy (Ślósarek 2011).

Rośliny pozyskują energię, gromadzoną w nośnikach energii, w procesie fotosyntezy. Należą one do organizmów fototropicznych, w których proces transformacji energii świetlnej odbywa się w chloroplastach. Proces fotosyntezy definiuje się jako proces wychwytywania i magazynowania energii świetlnej, która w dalszym etapie jest wykorzystywana do podtrzymywania określonych procesów biochemicznych w komórce żywej. Do wychwytywania energii wykorzystywane są barwniki fotosyntetyczne, w szczególności cząsteczki chlorofilu, a procesy chemiczne towarzyszące przetwarzaniu energii świetlnej opierają się na reakcjach przenoszenia elektronu (Rys. 2.4.1).

Fotosynteza sprzężona jest z fosforylacją (biosyntezą ATP). Wydajność fotosyntezy i oddychania w komórce wynosi 20-30%, a pozostała część energii (70-80%) ulega rozproszeniu w postaci ciepła. W ujęciu biotermodynamiki jest to proces przetwarzania energii świetlnej w energię chemiczną. Zachodzące podczas tego procesu reakcje redoks zwiększają entropię, a więc potencjalnie, często też faktycznie, są samorzutne. W komórkach żywych, które stanowią układ termodynamiczny otwarty, reakcje redoks pozostają w powiązaniu z fosforylacją, która obniża entropię (Rys. 2.4.2) (Przestalski 2009).



Rys. 2.4.1. Przebieg procesu fotosyntezy Źródło: Dołowy 2005



Rys. 2.4.2. Schemat sprzężenia reakcji redoks z fosforylacją

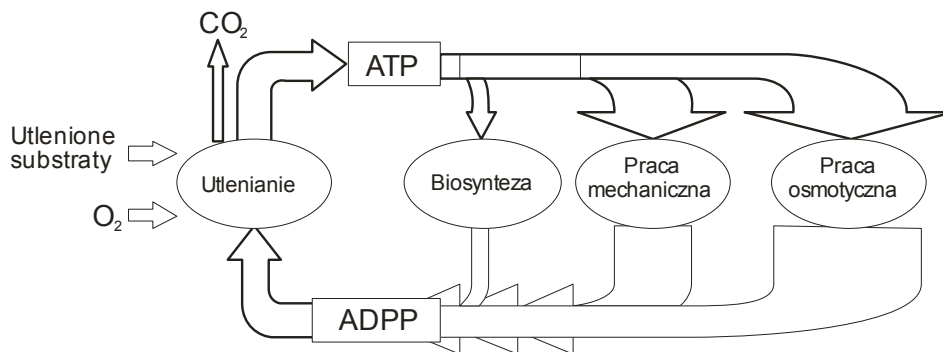
Ważnymi, z punktu widzenia termodynamiki, procesami zachodzącymi w roślinie są przewodzenie wody i transpiracja. Woda stanowi środowisko wszystkich reakcji chemicznych, zachodzących w roślinie, a także środek transportu wewnątrzustrojowego (substancji odżywczych, witamin, enzymów). Uczestniczy w regulacji parametrów układu takich jak: temperatura i ciśnienie osmotyczne. Utrzymuje też odpowiednie wymiary i kształty komórek, a zatem warunkuje jędrność komórki (tzw. turgor). Mechanizm przewodzenia wody związany jest ze zjawiskami osmozy i transpiracji, decydującymi o wymianie wody między komórką a jej środowiskiem zewnętrznym. Potencjał wody liści, który jest konsekwencją transpiracji – umożliwia transport wody do górnych części rośliny. Parcie korzeniowe, polegające na przemieszczaniu wody w kierunku naczyń, zwią-

zane z zużyciem energii przez roślinę, jest dodatkowym mechanizmem wymuszającym transport wody w kierunku liści, poprzez system naczyń przewodzących (Przestalski 2009).

Zmiana energii w układzie termodynamicznym jakim jest roślina, spowodowana jest wykonywaną pracą nad układem lub przez układ: chemiczną, związaną z biosyntezą wiązań w makrocząsteczkach, osmotyczną, określającą zdolność komórek do wychwytywania z otoczenia i gromadzenia w swym wnętrzu składników pokarmowych, umiejętność wychwytywania bądź wydalania jonów wbrew gradientowi stężeń (pompa jonowa) w różnych częściach samej komórki (np. mitochondria – cytoplazma, cytoplazma – jądro), mechaniczną, związaną np. z ruchami elementów komórki w czasie mitozy (Dołowy 2005). Część energii niewykorzystana do wykonania pracy ulega rozproszeniu w postaci ciepła.

Na rysunku 2.4.3 przedstawiono bioenergetykę, odnoszącą się do organizmów żywych, a zatem i roślin, w ujęciu globalnym:

Organizmy żywe, jakim są rośliny stanowią globalny system energetyczny, w którym zachodzące zjawiska mogą być wyjaśniane w oparciu o prawa termodynamiki klasycznej, chemicznej oraz termodynamiki nierównowagowej.



Rys. 2.4.3. Ogólny schemat systemu bioenergetycznego w organizmach żywych

PIŚMIENNICTWO

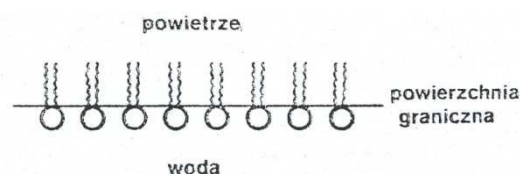
- Przestalski S., 2009. Elementy fizyki, biofizyki i agrofizyki. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Dołowy K., 2005. Biofizyka. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Ślósarek G., 2011. Biofizyka molekularna. Zjawiska. Instrumenty. Modelowanie. PWN, Warszawa.
- Poniewski M. E., Sado J., Staniszewski B., 2008. Termodynamika procesów nierównowagowych. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa.

2.5. Przenikanie substancji przez błony komórkowe

Stanisław Przestalski

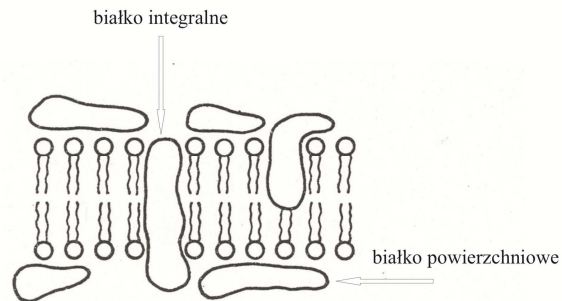
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Idea błon komórkowych (zwanymi też plazmatycznymi) powstała w połowie 19 w. na podstawie badań przenikania różnych substancji do wnętrza komórek roślinnych. Bezpośrednie stwierdzenie ich istnienia metodą mikroskopii optycznej było niemożliwe, ponieważ (jak się później okazało) zdolność rozdzielcza mikroskopu optycznego jest mniejsza od grubości błony. Badania przenikania pozwoliły natomiast zasugerować lipidowy charakter błony, ponieważ cząsteczki tłuszczów przechodziły łatwo przez błonę. Pierwszym fizycznym modelem błony, opartym na badaniach Langmuira, była warstwa monomolekularna powstająca spontanicznie (samoorganizacja) z lipidów na powierzchni wody (Rys. 2.5.1).



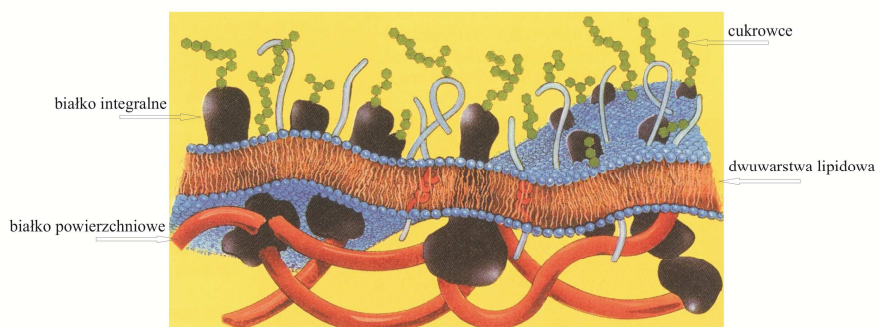
Rys. 2.5.1. Warstwa jednocząsteczkowa na powierzchni granicznej między wodą i powietrzem

Jednakże napięcie powierzchniowe lipidów jest znacznie większe od napięcia powierzchniowego warstwy powierzchniowej komórek i dlatego przyjęto, że błona komórkowa zbudowana jest z mieszaniny lipidów i białek; te ostatnie obniżają napięcie powierzchniowe. Powstały rozliczne modele błon, jednak żaden z nich nie tłumaczył zadowalająco przenikania wody i jonów przez błony rzeczywistych komórek. Sytuacja radykalnie się zmieniła w latach pięćdziesiątych XX wieku, kiedy to do badań wprowadzono mikroskopię elektronową. Dzięki niej udało się stwierdzić, że błona komórkowa w zasadzie zbudowana jest z dwumolekularnej warstwy lipidowej i białek dwóch rodzajów: białek powierzchniowych i białek integralnych, przy czym te ostatnie przechodzą przez błonę na wskroś (Rys. 2.5.2) i mogą transportować wodę i jony.



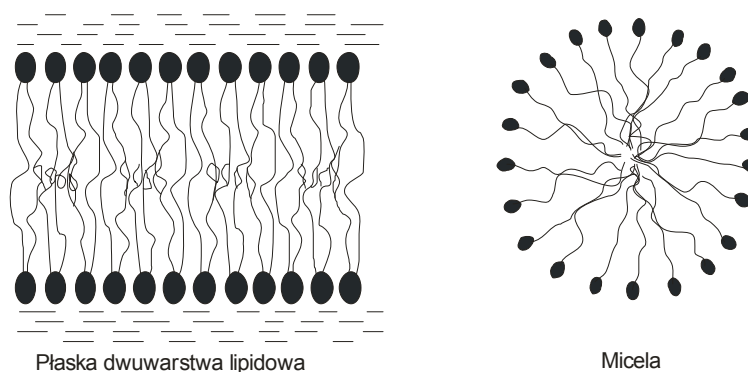
Rys. 2.5.2 Model mozaikowy błony

Również w tym czasie stwierdzono, że cząsteczki lipidów w dwuwarstwie lipidowej znajdują się w ruchu zarówno w powierzchni błony jak i we wnętrzu błony, co przenosi się na ruch białek w powierzchni błony i co nosi nazwę płynności błony. Błona komórkowa w ogólności jest tworem bardzo złożonym. Badania błon, zarówno ze względów podstawowych jak i praktycznych, rozwijają się na świecie intensywnie w tysiącach laboratoriów. Wykorzystuje się w nich całą plejadę metod fizycznych takich jak np. metodę warstw monomolekularnych, rentgenowskiej analizy strukturalnej, mikroskopii elektronowej, mikrokalorymetrii, spektroskopii jądrowego rezonansu magnetycznego i elektronowego rezonansu paramagnetycznego, spektrofotometrii FT IR, izotopowe, łątkową (patch clamp) i inne. W wyniku tych badań pojawił się tzw. model płynnej mozaiki, który po różnych modyfikacjach jest aktualny do chwili obecnej (Rys. 2.5.3). Wewnątrz żywej komórki znajduje się wiele różnych substancji; szacuje się ich liczbę (w zależności od rodzaju komórki) na 10^{12} - 10^{14} atomów, natomiast grubość błony wynosi średnio około 10 nm.



Rys. 2.5.3. Mozaikowy model błony biologicznej

Niezależnie od lipidów i białek występują w błonie różne atomy i cząsteczki (makrocząsteczki), woda, jony i inne. Są one zdolne do tworzenia różnych struktur i biorą udział w reakcjach biochemicznych. Przykładem struktur, jakie tworzą lipidy w zależności od kształtu ich cząsteczek są mono-i dwuwarstwy, micelle, liposomy i inne (Rys. 2.5.4).



Rys. 2.5.4. Struktury tworzone przez lipidy

Znaczenie błon. Do najważniejszych funkcji błon należą funkcje transportowe (oprócz funkcji ochronnych, bez których żadna komórka nie może istnieć, funkcji energetycznych odpowiedzialnych m. in. za oddychanie i fotosyntezę, funkcji elektrycznych odpowiedzialnych m. in. za powstawanie impulsów nerwowych). Funkcja transportowa związana jest z przenikaniem substancji przez błony plazmatyczne i błony organelli komórkowych. Do wnętrza komórek wnikają różne substancje, a więc cząstki pożywienia, w szczególności cząstki nawozów, leki i wiele innych, zarówno pożytecznych jak i szkodliwych. W stronę przeciwną transportowane są produkty rozkładu. Błona komórkowa reguluje ten transport zapobiegając autodestrukcji, jeśli tylko stężenia substancji toksycznych nie przekraczają określonych wartości. Jeśli natomiast wartość stężenia przekroczy możliwości obronne błony, ulega ona zniszczeniu, co w konsekwencji prowadzi do zniszczenia całej komórki oraz ewentualnie całego organizmu wielokomórkowego. Znajomość procesów membranowych i wykorzystanie tej znajomości jest coraz szersza w medycynie i ochronie środowiska, natomiast, jak sądzę, w naukach o żywieniu membranologia jest wykorzystywana poniżej swoich potencjalnych możliwości.

Przenikanie. Przenikanie substancji przez błony biologiczne żywych organizmów odbywa się stale. Procesy transportu w zależności od różnych czynników mają różny charakter. W celu uporządkowania problemu dzielimy je na kilka klas, przy czym w różnych opracowaniach te klasy są różne. W tym opracowaniu

wszystkie procesy dzielimy na procesy **przenikania biernego** i **procesy przenikania aktywnego**. Opisujemy je z reguły w oparciu o zasady termodynamiki. W szczególności, wykorzystując zasady liniowej termodynamiki procesów nieodwracalnych możemy procesy stacjonarne przedstawić w dość prosty sposób. Uważamy, że dany proces jest znany, jeśli znamy zależność strumienia I danej substancji od bodźca X wywołującego proces:

$$I = f(X) \quad (1)$$

Procesy bierne. Przenikanie bierne jest procesem niezależnym od zmian energetycznych, jakie zachodzą w badanym obiekcie. Do procesów biernych zaliczamy dyfuzję prostą, dyfuzję złożoną i dyfuzję ułatwioną. Procesy bierne zawsze są związane z dyfuzją (choć nie zawsze wyłącznie). W najprostszym przypadku, dyfuzji prostej, zależność strumienia od bodźca wyraża się I równaniem Ficka, które możemy zapisać w postaci:

$$I = L \cdot X \quad (2)$$

gdzie: L jest współczynnikiem fenomenologicznym odpowiadającym współczynnikowi dyfuzji, a X jest bodźcem dyfuzyjnym dc/dx , który jest gradientem stężenia c lub potencjału chemicznego μ .

W praktyce na ogół przyjmujemy, że dyfuzja prosta zachodzi wtedy, kiedy stężenie ciała rozpuszczonego jest bardzo małe. Drogą dyfuzji prostej mogą przenikać substancje rozpuszczalne w lipidach, wiele leków i inne.

Dyfuzja złożona odbywa się pod wpływem zarówno bodźca dyfuzyjnego jak i innych bodźców. Weźmy np. pod uwagę bodziec w postaci ciśnienia hydrostatycznego. W tym przypadku pojawią się dwa strumienie: strumień ciała rozpuszczonego i strumień wody, co dla procesów stacjonarnych można przedstawić następująco:

$$I_r = I_{rr}\Delta\mu_r + I_{rw}\Delta\mu_w \quad I_w = I_{wr}\Delta\mu_r + I_{ww}\Delta\mu_w \quad (3)$$

$I_r = I_{rr}\Delta\mu_r + I_{rw}\Delta\mu_w$ $I_w = I_{wr}\Delta\mu_r + I_{ww}\Delta\mu_w$ gdzie I_{rr} , I_{rw} , I_{wr} oraz I_{ww} są współczynnikami fenomenologicznymi, $\Delta\mu_r$ jest różnicą potencjałów chemicznych ciała rozpuszczonego, a $\Delta\mu_w$ różnicą potencjałów chemicznych wody. Ponieważ potencjały chemiczne nie są bezpośrednio mierzalne, więc równanie to przekształca się (w sposób który pomijamy), otrzymując równania równoważne:

$$I_D = L_{DD}\Delta\pi + L_{DV}\Delta P \quad (4)$$

$$I_V = L_{VD}\Delta\pi + L_{VV}\Delta P \quad (5)$$

gdzie: L_{DD} , L_{DV} , L_{VD} i L_{VV} są współczynnikami fenomenologicznymi, $\Delta\pi$ jest różnicą ciśnień osmotycznych, ΔP – różnicą ciśnień hydrostatycznych, I_D – stru-

mieniem dyfuzyjnym, I_V – strumieniem objętościowym (a więc strumieniem rozpuszczalnika wraz z ciałem rozpuszczonym, czyli całego roztworu). Wszystkie wyrazy w tych równaniach odpowiadają określonym procesom szczegółowym: $L_{DD}\Delta\pi$ opisuje dyfuzję prostą; $L_{DV}\Delta P$ opisuje przepływ ciała rozpuszczonego pod wpływem różnicy ciśnień hydrostatycznych (tzw. ultrafiltracja); $L_{VD}\Delta\pi$ oznacza przepływ objętościowy pod wpływem różnicy ciśnień osmotycznych (czyli osmozę); $L_{VV}\Delta P$ określa przepływ roztworu pod wpływem różnicy ciśnień hydrostatycznych (tzw. przepływ hydrauliczny).

Dobłą miarą selektywności błon jest stosunek

$$\sigma = -\frac{L_{VD}}{L_{VV}} \quad (6)$$

zwany współczynnikiem odbicia. Jeśli błona jest półprzepuszczalna (tzn. jest przepuszczalna wyłącznie dla rozpuszczalnika), to σ jest równe 1; w tym przypadku błona ma zdolność pełnego rozróżniania rozpuszczalnika od ciała rozpuszczonego. W rzeczywistych błonach, które są przepuszczalne i dla rozpuszczalnika i ciała rozpuszczonego:

$$\sigma_L = \frac{L}{L} \quad (7)$$

Zdolność do rozróżniania między rozpuszczalnikiem i ciałem rozpuszczonym jest zmniejszona i ciało rozpuszczone może również (choć z inną prędkością aniżeli rozpuszczalnik) przepływać przez błonę. Jeśli natomiast $\sigma = 0$, to selektywność błony zanika całkowicie. Rozważania tu przedstawione odnoszą się nie tylko do komórek, ale mogą być wykorzystywane w zagadnieniach makroskopowych, np. w oczyszczalniach ścieków.

Dyfuzja ułatwiona (bierny transport nośnikowy). Pewne substancje przenikają biernie przez błonę niezgodnie z prawami dyfuzji prostej i złożonej, tzn. nie wymagają dostarczenia energii metabolicznej, a zależność między strumieniem i bodźcem nie jest liniowa. Przykładem może służyć transport glukozy poprzez błony erytrocytów. Zachodzi on z dużą prędkością w porównaniu z prędkością poprzez warstwę lipidową i charakteryzuje się nasyceniem. Ten rodzaj transportu tłumaczmy istnieniem nośników. Jeśli wszystkie nośniki zostaną zaangażowane w proces transportu, to zwiększenie strumienia substancji transportowanej nie może przyspieszyć procesu. Nośnikiem jest substancja, która razem z substancją transportowaną przenika biernie błonę, a następnie się od niej odłącza. Oprócz nośników ruchomych istnieją nośniki nieruchome o kształcie kanału; to są kanały bierne różniące się zasadniczo od kanałów aktywnych, które występują w procesach transportu aktywnego.

Transport aktywny substancji przez błony odgrywa szczególnie znaczącą rolę w funkcjonowaniu żywych organizmów, ponieważ kontroluje podstawowe procesy bioenergetyczne, takie jak fosforylacja fotosyntetyczna, fosforylacja oksydacyjna, aktywne przenikanie jonów, węglowodorów, aminokwasów i ma decydujące znaczenie w powstawaniu impulsów nerwowych, skurczu mięśnia i wielu innych procesach biologicznych. Transport aktywny definiujemy jako transport substancji związany z nakładem energii metabolicznej. Na ogół proces aktywny odbywa się w kierunku od stężenia mniejszego do stężenia większego, a energia zużyta na realizację takiego procesu może pochodzić np. z takiego źródła, jakim jest hydroliza ATP. Kanały zarówno w biernym transporcie nośnikowym, jak i w transporcie aktywnym uformowane są z białek, ale działają różnie.

W podsumowaniu można zauważyć, że błona komórkowa i jej funkcje (w szczególności funkcja transportowa) decydują o zachowaniu się żywej komórki i układów wielokomórkowych, a więc ostatecznie o życiu.

PIŚMIENNICTWO

- Przestalski S., 1983. Błony biologiczne. Biblioteka Wiedzy Współczesnej „Omega”. Wiedza Powszechna. Warszawa.
- Przestalski S., 2009. Elementy fizyki, biofizyki i agrofizyki. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego. Wrocław.

2.6. Układ gleba-roślina-atmosfera jako kontinuum

Cezary Sławiński, Jaromir Krzyszczak, Krzysztof Lamorski

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

DEFINICJA – „*Kontinuum gleba-roślina-atmosfera*” jest konceptem, w którym środowisko traktowane jest jako droga transportu wody oraz energii z gleby, z udziałem roślin i zwierząt do atmosfery.

Po raz pierwszy pojęcie „kontinuum gleba-roślina-atmosfera” (SPAC – Soil-Plant-Atmosphere-Continuum) użyte zostało w roku 1966 przez Philipa (Philip, 1966). Zgodnie z jego koncepcją, SPAC zawiera trzy główne podsystemy – glebę, biocenozę (fitocenozę oraz zoocenozę) oraz otaczającą je atmosferę – tworząc jeden, fizycznie zintegrowany, dynamiczny system, w którym procesy przepływu energii oraz obiegu materii zachodzą równocześnie. Wymienione podsystemy odgrywają jednak zupełnie odmienną rolę w „kontinuum gleba-roślina-atmosfera”.

Relacje gleba-woda-roślina

Rola gleby w „kontinuum gleba-roślina-atmosfera” jest kluczowa. W warunkach naturalnych na glebę wpływają głównie czynniki klimatyczne. Należą do nich na przykład, temperatura powietrza, nasłonecznienie, prędkość wiatru czy procesy ewaporacji wody z powierzchni gleby. Wymienione czynniki wpływają na zmiany temperatury gleby. Należy zaznaczyć, że stopień nasłonecznienia wpływa jedynie na tempo wzrostu temperatury gleby, podczas gdy inne czynniki mogą wpływać na tempo tak jej wzrostu, jak i spadku (w zależności od panujących w danej chwili warunków klimatycznych). Z kolei temperaturę gleby determinują jej właściwości: pojemność cieplna oraz przewodność cieplna. Zwykle, w warunkach naturalnych, warunki transportu ciepła są różne dla różnych miejsc w profilu glebowym, co spowodowane jest przestrzennymi niejednorodnościami właściwości cieplnych gleby. W wyniku tego powstaje przestrzenny rozkład temperatur w glebie. Jednocześnie strumień masy zależy nie tylko od temperatury gleby, ale również od gradientu tej temperatury i sieci porów, która jest bardzo skomplikowana i którą niezwykle ciężko jest poprawnie opisać. Do innych mechanizmów transportu masy i energii w glebie można zaliczyć: dyfuzję płynu molekularnego, dyfuzję par molekularnych, przepływ kapilarny, transport konwekcyjny, procesy ewapotranspiracji i kondensacji wraz z utajonym przepływem ciepła, przepływ hydrodynamiczny oraz ruch wymuszony grawitacją. Dominują-

cy w danym materiale w określonych warunkach klimatycznych mechanizm transportu jest zwykle nieznan. Bardziej prawdopodobne jest, że transport masy i energii jest wynikiem kombinacji wielu bądź przynajmniej kilku mechanizmów. Obecnie nie istnieje ogólna teoria transportu którą można byłoby zastosować do opisu ciał porowatych we wszystkich możliwych warunkach. Z powodu powyższych komplikacji konkretne modele wymagają wielu założeń ograniczających ich stosowalność, a także dużej ilości danych eksperymentalnych do walidacji.

Na podsystem związany z glebą składają się trzy główne składniki: cząstki stałe (minerały i materia organiczna), woda z rozpuszczonymi w niej substancjami chemicznymi oraz powietrze. W zależności od rozkładu granulometrycznego i struktury gleby, zawartość procentowa powyższych składników może być znacząco różna. Jednocześnie rośliny, a właściwie ich systemy korzeniowe, do rozwoju wymagają stanu subtelnej równowagi między trzema wymienionymi głównymi składnikami gleby. W szczególności równowaga pomiędzy fazą ciekłą a gazową jest niezwykle istotna, ponieważ odpowiada za aktywność korzeni. Pomimo, iż gleba nie jest czynnikiem niezbędnym dla wzrostu roślin – rośliny można uprawiać hydroponicznie, w warunkach sztucznych, wykorzystując jedynie odpowiednio przygotowane pożywki wodne (wodę z roztworami nawozów) – to jednak zazwyczaj uprawiane są one w glebie. Dlatego też to właśnie właściwości gleby silnie wpływają na wzrost i plonowanie roślin. Wpływ ten jest dwojaki – bezpośredni, poprzez zależność zawartości wody i składników odżywczych w glebie, oraz pośredni, poprzez zmiany w procesie napowietrzania. Zmiany w procesie napowietrzania gleby modyfikują nie tylko ilość tlenu dostępnego dla korzeni, ale modyfikują również zakres zmian temperaturowych gleby oraz wpływają na transport, absorpcję i przekształcanie składników odżywczych.

Z kolei woda odgrywa kluczową rolę w procesach wzrostu roślin. Podstawą procesu wzrostu i rozwoju roślin są podziały komórek (wzrost embrionalny), a następnie ich wydłużanie się (wzrost elongacyjny). Ten ostatni proces zachodzi w momencie, gdy każda para utworzona w wyniku podziału komórki zaczyna wchłaniać wodę. Dzięki zwiększeniu plastycznej rozciągliwości ściany komórkowej wskutek rozluźniania wiązań pomiędzy makrocząsteczkami materiałów budulcowych, rosnące ciśnienie wewnętrzne może spowodować rozszerzanie się elastycznych ścian nowo powstałych komórek. Następnie rozciągnięte ściany komórkowe zostają wzmocnione kolejnymi warstwami celulozy. Rośliny pobierają wodę z gleby wykorzystując system korzeniowy. Do opisu procesów transportu wody poprzez system gleba-roślina-atmosfera niezbędna jest znajomość składowych potencjałów wodnych w rozważanym układzie oraz mogących zmieniać się tak w czasie, jak i przestrzeni, gradientów tych potencjałów. Sama informacja o potencjale wodnym gleby, który zdefiniowany jest jako ilość energii potrzebnej do całkowitego usunięcia wody z gleby, nie pozwala na wnioskowanie o zawarto-

ści wody w glebie. Wynika z tego, że gdy rozważany jest rozwój roślin oraz ich nawadnianie, informacja o potencjale wodnym powinna być uzupełniona informacją o objętościowej zawartości wody. Dla każdego typu gleby objętościowa zawartość wody oraz potencjał wodny są ze sobą powiązane w charakterystyczny sposób. Graficznie związek pomiędzy powyższymi wielkościami prezentowany jest w postaci krzywych retencji wodnej.

Podsystem fitocenozy pełni w systemie gleba-roślina-atmosfera funkcję transportu wody z gleby do atmosfery. Rośliny pobierają wodę wykorzystując głównie system korzeniowy (Baranowski i in. 2005). Można wyróżnić kilka etapów przemieszczania wody w roślinie, czyli: absorpcję wody przez system korzeniowy w procesie osmozy i jej transport przez korzenie do ksylemu, następnie transport poprzez ksylem w kierunku liści (na odległościach często przekraczających kilka metrów), a na końcu proces transpiracji. Rośliny transpirują w największym stopniu przez aparaty szparkowe (ok. 75-90% transpiracji ogólnej), ale także poprzez zewnętrzną powierzchnię liścia (transpiracja kutykularna) oraz przez przetchlinki (transpiracja przetchlinkowa). Niewielka ilość wody bierze udział w reakcjach biochemicznych zachodzących w roślinie oraz jest transportowana poprzez łyko do komórek, w których zachodzi proces fotosyntezy. Kluczowe znaczenie dla transportu wody z gleby do rośliny, a następnie, w wyniku transpiracji, do atmosfery mają dwa procesy, jeden pasywny a drugi aktywny. Proces pasywny zachodzi w przypadku intensywnej transpiracji. Na intensywność transpiracji wpływa różnica pomiędzy wartościami potencjału wody w roślinie a pary wodnej w atmosferze. Potencjał wodny pary wodnej w atmosferze, przy 50% wilgotności względnej i temperaturze 20°C, wynosi -94.1 MPa, natomiast potencjał wodny w liściach roślin może wynosić minus kilka MPa w takich samych warunkach atmosferycznych. Tak duża różnica potencjałów sprawia, że atmosfera staje się 'pompą' i warunkuje transport wody z roślin do otaczającego je powietrza. Ubytek wody w roślinach uzupełniany jest przez nie wodą zawartą w glebie. Woda paruje z roślin poprzez pory w ścianach komórkowych mezofilu oraz kutikuli. W porach tych, w wyniku napięcia powierzchniowego, tworzą się meniski wklęsłe. To z kolei obniża ciśnienie poniżej atmosferycznego i wymusza transport wody w górę rośliny poprzez ksylem. Ciśnienie powodowane przez zjawiska kapilarne może wynosić nawet -3 MPa. Powyższy mechanizm nosi nazwę kohezyjnego mechanizmu pobierania i transportu wody przez rośliny. Mechanizm aktywny związany jest z kolei ze zjawiskiem parcia korzeniowego. Zjawisko to jest wynikiem różnic potencjału wodnego roztworu w ksylemie korzeniowym (wyższe stężenie) a roztworu glebowego w glebie (niższe stężenie). Za transport wody z gleby do korzeni odpowiedzialny jest przepływ osmotyczny. W przypadku gdy zasolenie gleby jest duże, stężenie roztworu w korzeniach może być znacznie niższe niż stężenie roztworu glebowego. Roślina nie jest wtedy

w stanie pobierać wody z gleby. Absorbacja wody z gleby jest również utrudniona w przypadku dużej wartości współczynnika potencjalnej ewapotranspiracji i jednocześnie niewielkiej dyfuzyjności wody glebowej. Wtedy, pomimo dużej różnicy w potencjałach wodnych gleby i rośliny, tempo przemieszczania wody w kierunku korzeni może być zbyt małe. Powoduje to ograniczenie ewapotranspiracji i sprawia, że roślina poddawana jest stresowi wodnemu. Aby wyjaśnić zjawisko parcia korzeniowego, zaproponowanych zostało wiele modeli, na przykład teorię półprzepuszczalnych membran, teorię grawi-osmotyczną czy teorię oporową transportu wody.

Zagadnienie skali

Wybór sposobu opisu oddziaływań pomiędzy procesami zachodzącymi w „kontinuum gleba-roślina-atmosfera” zależy niewątpliwie od rozważanej skali. Wraz z rosnącym rozmiarem przestrzennym zorganizowanego zachowania gleba-roślina (np. osuszanie gleby i/lub zamykanie aparatów szparkowych) (Anderson i in. 2003), wzrasta również wpływ powierzchni gleby na warunki atmosferyczne oraz cyrkulację. W opozycji do powyższego procesu stoi system sprzężeń zwrotnych, które zmniejszają czułość przypowierzchniowych strumieni na zmiany warunków powierzchniowych. W modelach zwiększanie skali przestrzennej opiera się na uchwyceniu sprzężeń zwrotnych między powierzchnią gleby a atmosferą oraz wpływu niejednorodności powierzchni gleby na strumienie powierzchniowe. Jednocześnie istotne jest uchwycenie dynamiki atmosferycznej warstwy granicznej, która wraz z rosnącą skalą przestrzenną ma coraz większy wpływ na obserwowane zjawiska, a która zależy od wymiany turbulencyjnej ciepła i momentu pędu, oraz od czynników wielkoskalowych takich jak prędkość osiadania w atmosferze. Z kolei zmniejszanie rozważanej skali przestrzennej pozwala na odpowiednią parametryzację mało-skalowych procesów fizycznych, które zachodzą w skalach nie dających się poprawnie rozwiązać używając standardowych siatek obliczeniowych w modelach wielko-skalowych.

Wymiana gazowa w systemie gleba-roślina-atmosfera

Gleba odgrywa istotną rolę w wymianie gazowej w ekosystemach lądowych. W ostatnich latach przeprowadzonych zostało wiele badań w celu oszacowania emisji gazów cieplarnianych w różnych ekosystemach lądowych oraz zidentyfikowania kluczowych czynników sterujących emisją gazów. Dużym utrudnieniem jest fakt, że obserwowane strumienie różnią się nie tylko między ekosystemami, ale także w obrębie ekosystemów obserwuje się znaczną ich zmienność przestrzenną, jak i czasową. W związku z tym modelowanie odgrywa kluczową rolę w skalowaniu wyników uzyskanych poprzez monitoring stosunkowo niewielkich

obszarów na powierzchni większe – regiony, a finalnie nawet na skalę globalną. Dzięki modelowaniu będziemy jednocześnie w stanie przewidzieć skutki następujących zmian klimatycznych, a także zaplanować zmiany w zagospodarowaniu terenów na poczet przyszłych emisji gazów cieplarnianych.

Głównym komponentem zapotrzebowania gleby na tlen jest mikrobiologiczne oddychanie gleby oraz oddychanie korzeni roślin (Stępniewski i in. 2005). Wkład do oddychania pochodzący od mezofauny, a także ilość tlenu potrzebnego do reakcji chemicznych zachodzących w glebie, jest zwykle znikomy i zazwyczaj w rozważaniach pomijany. Dlatego też termin zapotrzebowania gleby na tlen jest używany zamiennie z tempem oddychania gleby. Z kolei tempo oddychania gleby jest często wyrażane jako produkcja dwutlenku węgla przez glebę, ponieważ w warunkach oddychania aerobowego objętość pochłanianego tlenu jest równa objętości produkowanego dwutlenku węgla. Intensywność oddychania korzeni roślin jest o dwa rzędy większa niż mikrobiologiczne oddychanie gleby. A więc korzenie są kanałami wyższego zapotrzebowania na tlen wbudowanymi w znacznie mniej aktywną matrycę glebową. Zapotrzebowanie gleby na tlen zmniejsza się wraz z głębokością, ponieważ tak mikrobiologiczne oddychanie gleby, jak i gęstość korzeni, maleją wraz z głębokością.

Strumienie masy w systemie gleba-roślina-atmosfera

Wciąż posiadamy ograniczoną wiedzę na temat szczegółów dotyczących strumieni masy w systemie gleba-roślina-atmosfera. Kilka lat temu (Schroll i Kuehn 2004) opracowana została metoda oraz system pomiarowy do określania bilansu masy związków organicznych oznaczanych izotopem C14 węgla. W metodzie tej wykorzystane zostały lizymetry do oszacowania strumieni węgla C14 pochodzących z gleby oraz roślin. Inne metody wykorzystywały śledzenie stabilnych izotopów tlenu w celu uzyskania informacji o wykorzystaniu wody w drzewach orzechowych (Lauteri i in. 2006) oraz śledzeniu izotopów jodu w roślinach (Muramatsu i in. 1995). Ważnym aspektem transportu związków chemicznych w systemie gleba-roślina-atmosfera jest zjawisko fitoremediacji. W badaniach dotyczących izomeru 1,4-dioksanu (Ouyang 2002), przeprowadzonych z zastosowaniem idei kontinuum roślina-gleba-atmosfera, wykazano akumulację tej zanieczyszczającej środowisko substancji na bardzo różniącym się stopniu w liściach różnych roślin. Ideę SPAC wykorzystano również w badaniach fluktuacji węgla i azotu w warunkach polowych (Mueller i in. 1997). Strumienie masy oraz składniki przemiany zostały określone modelem DAISY i porównane do danych pomiarowych. W zależności od miejsca pomiarowego zaobserwowany został różny współczynnik aktywności mikrobiologicznej.

Modelowanie transportu masy i energii w SPAC

Do opisu procesów fizycznych zachodzących w systemie gleba-roślina-atmosfera wykorzystuje się fizyczne równania materiałowe wyrażające zasady zachowania pędu, masy oraz energii. Do rozwiązania równań wynikających z praw zachowania i opisujących wybrane zjawisko, na przykład transportu wody, soli oraz ciepła w glebie, czy odkształcenia gleby oraz zmiany jej gęstości w wyniku działań kultywacyjnych człowieka, niezbędna jest wiedza na temat współczynników kinetycznych opisujących badany obiekt. Ponadto, w celu weryfikacji, niezbędna jest znajomość dynamiki badanej właściwości fizycznej, na przykład wilgotności gleby, jej zasolenia, temperatury, oraz parametrów agroklimatycznych takich jak opad, radiacja, wilgotność powietrza czy temperatura. Dlatego też monitorowanie parametrów badanych układów jest nieodzowne. Jednocześnie modelowanie transportu masy i energii w systemie gleba-roślina-atmosfera wymaga uwzględnienia wielu różnych mechanizmów transportu w układzie porowatym jakim jest gleba, w roślinach oraz z roślin do otaczającej je atmosfery. I dlatego modelowanie SPAC jest niezwykle trudnym zadaniem, ponieważ wiele procesów, na przykład transport wody i pary wodnej, ciepła, powietrza glebowego, rozpuszczonych soli i innych związków chemicznych, może zachodzić jednocześnie oraz na siebie wpływać. To, które z nich odgrywają istotną rolę w modelowanym układzie, zależy od rodzaju zagadnienia, które chcemy badać.

Do najogólniejszego sformułowania opisu transportu w wielofazowym i wieloskładnikowym układzie porowatym wykorzystuje się termodynamiczny opis procesów nierównowagowych. Częstkowe równania różniczkowe opisujące procesy nierównowagowe po uproszczeniach mogą zostać sformułowane jako nieliniowe równania adwekcyjno-dyfuzyjne ze źródłami. Transport wody i ciepła to podstawowe procesy, które muszą zostać uwzględnione niezależnie od rozważanego problemu fizycznego. Dzieje się tak, ponieważ prawie wszystkie parametry fizyczne gleby zależą od jej wilgotności oraz/lub jej temperatury, z kolei warunki nieizotermiczne w glebie wpływają na większość zjawisk transportu w glebie. Transport wody opisywany jest równaniem Richardsa:

$$C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(K(h)\nabla(h-z)) \quad (1)$$

gdzie: h jest potencjałem wody w glebie wyrażonej w jednostkach wysokości słupa wody (m H₂O), z jest odległością od poziomu referencyjnego (przyjmuje wartości dodatnie w dół) (m), $C_w(h) \equiv \frac{\partial \theta}{\partial h}$ jest różniczkową funkcją pojemności wodnej gleby (1·m⁻¹), θ jest objętościową zawartością wody w glebie (m³·m⁻³), a $K(h)$ jest funkcją przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej (m·s⁻¹).

Z kolei za transport ciepła w glebie odpowiadają dwa mechanizmy: przewodzenie ciepła oraz promieniowanie cieplne. Strumień ciepła wytwarzany przez te mechanizmy proporcjonalny jest do gradientu temperatury gleby. Średnia wartość funkcji przewodnictwa cieplnego opisuje glebowe właściwości transportu ciepła. Poza przewodnictwem i radiacją, transport ciepła może zachodzić również na sposób konwekcyjny, w wyniku przemieszczania się wody w profilu glebowym. Równanie opisujące ten typ transportu ma postać:

$$C_v(h) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(h, T) \nabla T) - c_{iw} \rho_{iw} \bar{q} \cdot \nabla T \quad (2)$$

gdzie $C_v(h)$ jest objętościową pojemnością cieplną ($J \cdot m^{-3} K^{-1}$), T to temperatura, $\lambda(h, T)$ to przewodność gleby ($W \cdot m K^{-1}$), c_{iw} jest ciepłem właściwym wody (J/kgK), a ρ_{iw} jest gęstością wody ($kg \cdot m^{-3}$). \bar{q} to prędkość Darcy'ego wyrażająca prędkość ruchu wody w glebie, opisywana równaniem:

$$\bar{q} \equiv K(h) \nabla(h - z) \quad (3)$$

Podsumowanie

Idea „kontinuum gleba-roślina-atmosfera” (SPAC) traktuje układ złożony z gleby, biocenozy oraz atmosfery jako zintegrowany, dynamiczny system, będący sumą wszystkich składników (w tym również zoocenozy). Oznacza to, że wchodzące w skład podsystemy oraz zachodzące w nich procesy powinny być rozważane jako składniki i procesy w SPAC osadzone, wzajemnie przenikające się, połączone ze sobą i od siebie zależne. Dzieje się tak dlatego, iż dynamiczne właściwości jednego z podsystemów SPAC mają wpływ na wszystkie inne podsystemy. Składniki i procesy mogą być rozpatrywane w różnych skalach czasu lub przestrzeni a ich matematyczny opis może różnić się w zależności od istotności składników i procesów w danej skali.

PIŚMIENNICTWO

- Anderson M.C., Kustas W.P., Norman J.M., 2003. Upscaling and downscaling – a regional view of the soil-plant-atmosphere continuum. *Agronomy Journal*, 95, 1408-1423.
- Baranowski P., Usowicz B., Walczak R.T., Mazurek W., 2005. Evapotranspiration into the Boundary Layer of the Atmosphere. Institute of Agrophysics Polish Academy of Sciences, Lublin. Poland.
- Lauteri M., Alessio G.A., Paris P., 2006. Using oxygen isotopes to investigate the soil-plant-atmosphere hydraulic continuum in complex stands of walnut. *Acta Horticulturae*, 223-230.
- Mueller T., Jensen L.S., Magid J., Nielsen N.E., 1997. Temporal variation of C and N turnover in soil after oilseed rape straw incorporation in the field: simulations with the soil-plant-atmosphere model DAISY. *Den. Ecological Modelling*, 99(2,3), 247-262.

- Muramatsu Y., Yoshida S., Ban-Nai T., 1995. Tracer experiments on the behavior of radioiodine in the soil-plant-atmosphere system. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 194(2), 303-310.
- Ouyang Ying, 2002. Phytoremediation: modeling plant uptake and contaminant transport in the soil-plant-atmosphere continuum. *Journal of Hydrology (Amsterdam, Netherlands)* 266(1-2), 66-83.
- Philip J.R., 1966. Plant Water Relations: Some Physical Aspects. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 17, 245-268.
- Schroll R. Kuehn S., 2004. Test System To Establish Mass Balances for ¹⁴C-Labeled Substances in Soil -Plant-Atmosphere Systems under Field Conditions. *Environmental Science and Technology*. 38(5), 1537-1544.
- Stępniewski W., Stępniewska Z., Bonnicelli P.B., Gliński J., 2005. *Oxygenology in outline*. Institute of Agrophysics, Lublin.

3. WŁAŚCIWOŚCI

3.1. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na ich biosferę

Małgorzata Brzezińska, Magdalena Frąc

Instytut Agrofizyki PAN im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Biosfera gleb

Gleba jest istotnym elementem biosfery, obejmującej powierzchniowe obszary Ziemi, w których występują organizmy żywe. Umożliwia rozwój korzeni roślin i jest środowiskiem życia różnorodnych mikroorganizmów oraz mikro- i mezofauny. Drobnoustroje pełnią szczególną rolę, będąc integralnym składnikiem gleby. Rozkładają resztki roślinne, przekształcają materię organiczną, uruchamiają składniki pokarmowe roślin, uczestniczą w biologicznym wiązaniu azotu atmosferycznego i przemianach wszystkich pierwiastków niezbędnych do życia, rozkładają toksyczne substancje organiczne, biorą udział w formowaniu struktury gleby i utrzymaniu stabilności agregatów glebowych. Dżdżownice i inni przedstawiciele mezofauny przemieszczają masy gleby, poprawiają strukturę i warunki wodno-powietrzne oraz dostarczają substancji organicznej.

Właściwości fizyczne i fizykochemiczne gleby oraz czynniki fizyczne działające na glebę mają silny wpływ na rozmieszczenie, liczebność i procesy życiowe bytujących w niej organizmów. Populacje zasiedlające daną glebę określają charakterystyczny dla niej poziom aktywności biologicznej, a podobieństwo właściwości fizycznych i fizykochemicznych różnych gleb (m.in. zawartości materii organicznej, składu granulometrycznego, pH) determinuje również ich właściwości biologiczne. Na przykład w zakwaszonych glebach dominują bakterie acidofilne i grzyby, zaś przy wysokich wartościach pH rozwijają się alkalofile. Gleby piaszczyste, z reguły zawierające niewiele materii organicznej zasiedlone są mniej liczną populacją, z przewagą tlenowców, zaś w podmokłych glebach organicznych dominują beztlenowce. Przyjmuje się również, że gleba jest oligotroficzna, uboga w składniki pokarmowe. Dlatego każda dodatkowa substancja organiczna, np. resztki roślinne, bardzo silnie stymuluje aktywność biologiczną, prowadząc do powstania obszarów podwyższonej aktywności (*hot-spots*). Szczególnie atrakcyjne dla drobnoustrojów są strefy oddziaływania korzeni roślin z uwagi na wydzieliny korzeniowe charakteryzujące się bardzo zróżnicowanym składem chemicznym, zwłaszcza bogactwem związków organicznych. Dlatego też liczebność drobnoustrojów w rizoferze jest wielokrotnie wyższa, niż w pozostałych obszarach gleby. Gleby o strukturze agregatowej, zasobne w związki próchniczne i minerały ilaste są liczniej zasiedlone, ponieważ drobnoustroje pre-

ferują drobne pory o średnicy 0,8-3 μm , w których są chronione przed działaniem niekorzystnych czynników. Z powodu swych niewielkich wymiarów (objętość pojedynczej komórki bakterii wynosi ok. 1 μm^3), znaczna ilość mikroorganizmów może zasiedlać stosunkowo niewielką masę gleby. W każdym gramie gleby żyją miliardy komórek bakterii i niewiele mniej grzybów, glonów i pierwotniaków. W żyznych glebach biomasa samych bakterii i grzybów może przekraczać tysiąc $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Tab. 3.1.1). Szacuje się, że opisane dotąd gatunki bakterii i grzybów glebowych (ok. 70 tys.) stanowią jedynie ok. 5% całego zespołu mikroorganizmów zasiedlających środowisko glebowe, a przypuszczalnie ponad 1,5 mln gatunków pozostaje jeszcze do identyfikacji (Metting 1993, Anderson 2003).

Tabela 3.1.1. Przybliżona liczebność organizmów żywych w warstwie powierzchniowej żyznej gleby (wg: Metting 1993)

Organizmy glebowe	Liczebność		Biomasa $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$
	na m^2	na gram	
Bakterie	10^{13} - 10^{14}	10^8 - 10^9	300-3000
Promieniowce	10^{12} - 10^{13}	10^7 - 10^8	300-3000
Grzyby	10^{10} - 10^{11}	10^5 - 10^6	500-5000
Głony	10^9 - 10^{10}	10^3 - 10^6	10-1500
Pierwotniaki	10^9 - 10^{10}	10^3 - 10^5	5-200
Nicienie	10^6 - 10^7	10 - 10^2	1-100
Dżdżownice	30-300		10-1000
Inne bezkręgowce	10^3 - 10^5		1-200

Naturalnymi czynnikami fizycznymi silnie wpływającymi na procesy biologiczne w glebie są temperatura i wilgotność zmieniające się w cyklach dobowych, sezonowych i rocznych. Zakres temperatury umożliwiającej życie jest szeroki, od -10°C do $+110^\circ\text{C}$. W glebie bytują drobnoustroje psychrofilne i mezofilne, a w specyficznych ekosystemach również termofilne. Większość drobnoustrojów glebowych przystosowała się do naturalnej zmienności wilgotności gleby i jest w stanie przetrwać okresy niedoboru wody. Wilgotność gleby reguluje jednak dostępność nie tylko wody, ale również składników pokarmowych oraz gazów, w tym tlenu cząsteczkowego (O_2). W odniesieniu do wymagań tlenowych, mikroorganizmy glebowe dzieli się na obligatoryjne tlenowce, fakultatywne beztlenowce, mikroaerofile z optimum O_2 w zakresie 2-10% obj. oraz obligatoryjne beztlenowce, dla których reaktywne formy tlenu są toksyczne. Drobnoustroje tlenowe wykazują maksimum aktywności życiowej przy wilgotności odpowiadającej około 60% pełnej pojemności wodnej gleby. Aktywność ta ulega osłabieniu zarówno przy obniżaniu wilgotności gleby (w wyniku ograniczenia dyfuzji substratów

pokarmowych gdy wody jest zbyt mało), jak przy jej podwyższaniu (w tym wypadku w wyniku ograniczenia szybkości dyfuzji tlenu – dyfuzja gazów w wodzie wypełniającej pory glebowe przebiega ok. 10 000 razy wolniej, niż w powietrzu) (Gliński i Stępniewski 1985, Paul i Clark 2000, Gliński i in. 2011).

Nadmierne uwilgotnienie gleby, a szczególnie zalanie wodą, istotnie zmienia warunki życia mikroorganizmów. Wskutek dość szybkiego wykorzystania O_2 przez tlenowce i fakultatywne beztlenowce następuje hipoksja, stan obniżonego natlenienia. Tlen pozostały jeszcze w zamkniętych przestrzeniach i rozpuszczony w wodzie również wkrótce ulega wyczerpaniu, a przedłużające się zalanie prowadzi do wytworzenia anoksji. Brak tlenu implikuje postępującą redukcję układu, mającą odzwierciedlenie w obniżaniu potencjału oksydoredukcyjnego (redoks, Eh). Im więcej jest łatwo dostępnej materii organicznej oraz im wyższa jest temperatura, tym szybsze są te procesy. Po wyczerpaniu O_2 tlenowce przyjmują postać form przetrwalnych lub giną, a dominować zaczynają beztlenowce fakultatywne. Ze względu na naturalną zmienność warunków wodno-powietrznych gleby, względne beztlenowce stanowią ważny składnik mikroflory glebowej (ok. 10^7 komórek na gram gleby). Beztlenowce fakultatywne oddychają tlenem – jeśli jest dostępny – lub wykorzystują utlenione formy pewnych związków nieorganicznych, gdy O_2 ulegnie wyczerpaniu. Do tej grupy należy większość bakterii denitryfikujących – uczestniczących w dysymilacyjnej redukcji azotanów (V) (NO_3^-) do N_2O i N_2 np. *Bacillus* i *Pseudomonas*, a także bakterie redukujące mangan (Mn^{4+} do Mn^{2+}) i żelazo (Fe^{3+} do Fe^{2+}). O ile zawartość azotanów i manganu w glebie zazwyczaj jest relatywnie niska, to różne formy Fe są w glebie dosyć powszechne, przez co pełnią rolę specyficznego ‘buforu’ zabezpieczającego glebę przed zbyt szybkim spadkiem potencjału redoks. Przedłużające się zalanie i niedotlenienie gleby może jednak doprowadzić do spadku potencjału redoks aż do niskich, ujemnych wartości. Procesy te przebiegają przy udziale obligatoryjnych beztlenowców, takich jak bakterie redukujące siarczany oraz metanogenne *Archaea* (produkujące metan, CH_4). W warunkach beztlenowych rozwijają się również bakterie fermentujące (np. *Clostridium*), dla których ostatecznym akceptorem elektronów są związki organiczne. Gdy po okresie zalania nastąpi odprowadzenie nadmiaru wody i osuszenie gleby, umożliwiające jej przewietrzenie, następuje ponowny rozwój populacji tlenowców i stopniowe utlenienie form zredukowanych. Powrót do stanu natlenienia zachodzi szybciej w glebach luźniejszych i wykazujących strukturę agregatową, niż w ciężkich glebach gliniastych. Długotrwałe warunki beztlenowe charakterystyczne są dla obszarów mokradeł i pól ryżowych (Gliński i Stępniewski 1985).

Poziom aktywności enzymatycznej gleby bezpośrednio odzwierciedla intensywność procesów metabolicznych drobnoustrojów glebowych, a zmiany funkcji życiowych organizmów glebowych uznawane są za wczesny sygnał obniżenia lub

poprawy jakości gleby. Biochemiczne wskaźniki jakości gleby uważane są za bardziej dynamiczne i czułe, niż wskaźniki fizyczne i chemiczne (Frąc 2012). Aktywność enzymatyczna gleby istotnie koreluje z innymi wskaźnikami (np. biomasa drobnoustrojów, respiracją, zawartością C_{org}).

Enzymy należące do grupy hydrolaz, np. amylaza, celulaza, fosfataza często mają formę zewnątrzkomórkową. Ulegają wówczas immobilizacji na minerałach ilastych i materii organicznej, szczególnie silnie w glebach charakteryzujących się wysokim kompleksem sorpcyjnym. Immobilizacja powoduje pewną utratę aktywności enzymów, lecz chroni je przed denaturacją i całkowitą utratą czynności katalitycznej. Hydrolazy silniej reagują na zmianę dostępności substratów czy inhibitorów, pH i temperaturę, niż na warunki wodno-powietrzne gleby. Natomiast aktywność wewnątrzkomórkowych oksydoreduktaz regulowana jest również przez stan natlenienia gleby. Regulacja ta zawsze wynika z potrzeb energetycznych komórek. Oddychanie tlenowe jest najbardziej efektywne, zaś wykorzystanie alternatywnych akceptorów dostarcza komórce nawet kilkakrotnie mniej energii. Dla zaspokojenia potrzeb energetycznych drobnoustroje aktywują wówczas potrzebne szlaki enzymatyczne. Enzymami ulegającymi silnej stymulacji w warunkach niedotlenienia są dehydrogenazy (Brzezińska 2004, Gliński in. 2011). Obecne są w każdej żywej komórce i biorą bezpośredni udział w metabolizmie oddechowym, zatem test aktywności dehydrogenaz jest powszechnie stosowany w badaniach statusu i jakości gleby. Osiąga wysokie wartości w glebach żyznych i zasobnych, a ulega obniżeniu wskutek zanieczyszczenia lub zakwaszenia.

Mikroorganizmy żyjące w glebie reagują na czynniki fizyczne i fizykochemiczne podobnie do mikroorganizmów żyjących w innych środowiskach i hodowanych *in vitro*. Charakterystyczne dla gleby jest to, że osłabieniu lub zahamowaniu wzrostu określonej populacji towarzyszy rozwój innych gatunków czy grup troficznych, dla których zmiana warunków będzie korzystna. Złożoność i heterogenność układu glebowego zapewniają więc ciągłość procesów biogeochemicznych pomimo zmiennych warunków środowiskowych.

PIŚMIENNICTWO

- Anderson T.H., 2003. Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. Agriculture, Ecosys. Environ. 98, 285-293.
- Brzezińska M., 2004. Aeration status of soil and enzyme activity. W: Soil-Plant-Atmosphere Aeration and Environmental Problems (J. Gliński, G. Józefaciuk, K. Stahr, Eds), IA PAN, Lublin, 55-60.
- Frąc M., 2012. Ocena mikologiczna osadu z oczyszczalni ścieków mleczarskich oraz jego wpływ na różnorodność funkcjonalną mikroorganizmów glebowych. Acta Agrophysica Monographiae, IA PAN, 113-122.

- Gliński J., Horabik J., Lipiec J., 2011. Encyclopedia of Agrophysics, Springer, AA Dordrecht, The Netherlands.
- Gliński J., Stępniewski W., 1985. Soil Aeration and its role for Plants. CRC, Boca Raton, Florida.
- Metting F.B.Jr., 1993. Structure and Physiological Ecology of Soil Microbial Communities. In: Soil Microbial Ecology (Metting F.B.Jr. Ed.) Marcel Dekker, Inc., New York. Chapter 1, 3-25.
- Paul E.A., Clark F.E., 2000. Mikrobiologia i Biochemia Gleb. Przekład: E. Kurek i J. Kobus. Wydawnictwo UMCS, Lublin.

3.2. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na chemizm gleby

Jean Diatta, Witold Grzebisz

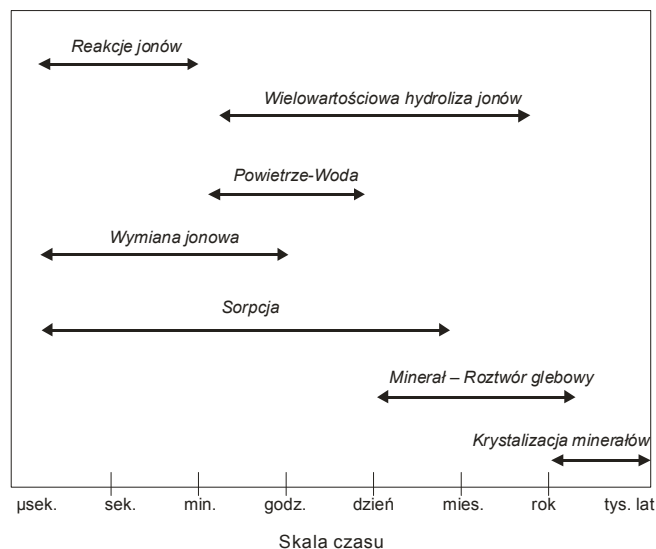
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Terminologia

W literaturze fachowej jak i popularnonaukowej, pojęcia chemizm gleby (z ang. *soil chemical processes*) i chemia gleby (z ang. *soil chemistry*) używane są zamiennie. Pierwsze opisuje procesy, przemiany, przemieszczanie i kinetykę poszczególnych związków chemicznych, drugie natomiast wyraża stan, ilość, jakość substratów i produktów geochemicznych. Należy, jednak zaznaczyć, że w praktyce, przedstawiane opracowania i opis danych empirycznych są często „fuzją” wyżej wymienionych pojęć, co jednakże ułatwia wyjaśnienie zjawisk zachodzących w heterogennym środowisku jakim jest gleba.

Środowisko glebowe jest miejscem dynamicznego współdziałania trzech faz: stałej (ang. – *solid phase – s*), roztworu glebowego (ang. – *soil solution*) oraz gazowej (ang. – *gaseous phase – g*). Roztwór glebowy traktuje się jako fazę ciekłą gleby (z ang. – *aqueous phase – aq*), która poprzez wymianę energii i materii współdziała z fazą gazową oraz licznymi sub-fazami stałymi. Zmiany w składzie chemicznym roztworu glebowego są wynikiem dynamiki procesów zachodzących między fazą stałą a gazową. Stan równowagi między procesami i w konsekwencji składem roztworu glebowego jest funkcją czasu (Rys. 3.2.1) i właściwości fizyczno-chemicznych koloidów glebowych i zawartych w fazach gleby jonów.

Z agrochemicznego punktu widzenia, badania nad chemizmem gleby skupiają się przeważnie na poszukiwaniu zależności zachodzących między frakcją składnika obecną w fazie stałej glebie (*Quantity*) a aktualnie zawartą w roztworze glebowym (*Intensity*). Oba terminy wymagają określenia merytorycznego i zdefiniowania wzajemnej zależności funkcjonalnej (Grzebisz, 2008). *Quantity (Q)*, czyli przyswajalność, oznacza tę część składnika mineralnego gleby, którą roślina może potencjalnie pobrać lub pobiera w sezonie wegetacyjnym. *Intensity (I)*, oznacza tę część składnika mineralnego gleby, którą roślina może pobrać w danym momencie wzrostu i wyrażona jest jako jego dostępność. Do tej frakcji zalicza się składniki, których efektywny współczynnik dyfuzji jest większy od $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pojemność buforowa (*Buffering Capacity – BC*) oznacza zdolność gleby do utrzymania (uzupełniania) stałej zawartości składnika mineralnego w roztworze glebowym.



Rys. 3.2.1. Paradygmat czasu niezbędnego do osiągnięcia stanu równowagowego podstawowych procesów reakcji w środowisku glebowym

Wymiana i równowaga jonowa w glebie

Kompleks sorpcyjny i jego komponenty

Fizyczne i chemiczne procesy zachodzące w glebie należy charakteryzować w odniesieniu do wielkości glebowego kompleksu sorpcyjnego, czyli pojemności wymiennej gleby w stosunku do kationów (PWK). Jest to kluczowy parametr gleby, którego rozmiar jest wypadkową interakcji między koloidami mineralnymi, organicznymi (Tab. 3.2.1) oraz odczynu.

Tabela 3.2.1. Pojemność wymienna poszczególnych minerałów i substancji organicznych gleby (Schroeder 1984)

Rodzaj koloidu	Ładunki ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)		Udział ładunków (%)		PWK ($\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$)
	Ujemne	Dodatnie	Stałe	Zmienne	
Kaolinit	12	4	5	95	5-20
Illit, chloryt	40	0	80	20	20-50
Montmorylonit, smektyt	100	0	95	5	80-120
Wermikulit	120	0	95	5	100-150
Tlenki Al, Fe; alofany	5	5	0	100	do 100
Próchnica	300	0	10	90	200-500

Wśród wszystkich jonów biorących udział w tworzeniu PWK, największy udział stanowią kationy zasadowe (Ca, Mg, K i Na). Najczęściej spotykany stopień wysycenia zasadami gleb Polski waha się od 30 do 90%. W glebach lekkich nie powinien on być mniejszy od 40%, a w ciężkich od 70%. Optymalne wysycenie kompleksu sorpcyjnego gleby średniej kationami powinno kształtować się jak: 65% Ca^{2+} , 10% Mg^{2+} , 5% K^+ i 20% H^+ (Al^{3+}). Stan ten ulega niekorzystnym zmianom agrochemicznym, gdy zwiększa się nadmiernie udział kationów kwaśnych, a także gdy wzrastają dysproporcje wewnątrz kationów, na korzyść wapnia.

Wymiana i równowaga jonowa w glebie – podstawa procesów

W glebie, jako układzie heterogenicznym, stan idealnej równowagi procesów chemicznych nie jest w istocie rzeczy osiągalny. Oznacza to, że reakcje opisane w „stanie równowagi” opierają się na umownym, „zrównoważonym” układzie, w którym procesy elektrochemiczne, zachodzące między fazą stałą a roztworem glebowym można opisać w formie (Diatta i in. 2006):

$$\mu_{XEC}(\text{roztwór gleby} - aq) = \mu_{XEC}(\text{sorbowany} - s) \quad (1)$$

Elektrochemiczny potencjał (μ_{XEC}) danego kationu X w fazie stałej gleby lub roztworze glebowym przedstawia równanie:

$$\mu_{XEC} = \mu_{XC} + Z_X FE \quad (2)$$

gdzie:

- μ_{XC} – potencjał chemiczny kationu ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$),
- X, E – potencjał elektryczny, (V – volt),
- F – stała Faradaya ($96485,31 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$),
- C – Kulomb $\sim 6\,241\,506 \times 10^{18} e$,
- Z_X – wartościowość kationu.

Podstawiając równanie (2) do (1) uzyskuje się zależność:

$$\mu_{XC(s)} + Z_X FE_{(s)} = \mu_{XC(aq)} + Z_X FE_{(aq)} \quad (3)$$

Po przekształceniu, ta zależność przybiera formę:

$$\mu_{XC(s)} - \mu_{XC(aq)} = Z_X F(E_{(aq)} - E_{(s)}) \quad (4)$$

Z uwagi na szczególną rolę jaką odgrywają jony wapnia (Ca^{2+}), potasu (K^+) oraz magnezu (Mg^{2+}) w chemizmie gleby, zapis stanu równowagi elektrochemicznej dla jonu wapnia (Ca^{2+}) jest następujący:

$$\mu_{CaC(s)} - \mu_{CaC(aq)} = Z_{Ca} F(E_{(aq)} - E_{(s)}) \quad (5)$$

Łącząc równania (4) i (5), otrzymujemy:

$$\frac{\mu_{XC(s)}}{Z_X} - \frac{\mu_{CaC(s)}}{Z_{Ca}} = \frac{\mu_{XC(aq)}}{Z_X} - \frac{\mu_{CaC(aq)}}{Z_{Ca}} \quad (6)$$

Biorąc pod uwagę termodynamiczną podstawę przemian, jakim podlegają zarówno jony K^+ jak i Ca^{2+} , glebę można traktować jako układ „idealny”, opisany funkcją:

$$\mu_{KC(aq)} = \mu^{\circ}_{KC(aq)} + RT \ln(K)_{(aq)} \quad (7)$$

gdzie:

$\mu^{\circ}_{KC(aq)}$ wyraża potencjał chemiczny w warunkach standardowych ($J \cdot mol^{-1}$),

R – stała gazowa ($8,31451 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$),

T – temperatura absolutna, ($^{\circ}K$),

$(K)_{(aq)}$ – aktywność K w roztworze glebowym ($mol \cdot L^{-1}$).

W stanie równowagi między jonami Ca^{2+} i K^+ w fazie stałej i w roztworze glebowym, potencjały chemiczne obu układów można przedstawić w formie równania energii swobodnej Gibbs'a w warunkach standardowych (ΔG°):

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln \left[\left(\frac{K_{(aq)}^{\frac{1}{Z_K}}}{1} \right) \left(\frac{K_{(s)}^{\frac{1}{Z_K}}}{Ca_{(s)}^{\frac{1}{Z_{Ca}}}} \right) \right] \quad (8)$$

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln Q_{eq} \quad (9)$$

Składnik Q_{eq} (równanie 9) wyraża równowagową, stałą termodynamiczną wymiany. Dla Ca i K (w stanie równowagowym) można je zapisać w postaci:

$$Q_{eq} = \frac{\alpha K_{(s)} \alpha Ca_{(aq)}^{\frac{1}{2}}}{\alpha [\frac{1}{2} Ca_{(s)}] \alpha K_{(aq)}} = Q_V \quad (10)$$

Równanie (10) nosi nazwę równania Vanselova a Q_V oznacza stałą Vanselova. Q_V wyraża względne powinowactwo jonów K^+ względem Ca^{2+} . Dla $Q_V = 1$, gleba nie wykazuje żadnego powinowactwa do obu kationów, czyli K^+ i Ca^{2+} . Natomiast dla $Q_V > 1$, gleba wykazuje większe powinowactwo w stosunku do K^+ a dla $Q_V < 1$, większe powinowactwo dla Ca^{2+} .

Dynamikę K w fazie stałej i roztworze glebowym można przedstawić za pomocą równania Gapona (1933), które opiera się na założeniu, że jony K^+ , w obec-

ności jonów Ca^{2+} , przechodzą do roztworu glebowego, jako wynik zmiany pojemności buforowej gleby:

$$\frac{K^{(s)}}{\frac{1}{2}Ca^{2+(s)}} = Q_G \frac{K^{(aq)}}{[Ca^{2+(aq)}]^{1/2}} \quad (11)$$

gdzie: Q_G – termodynamiczna stała równowagi Gajona.

Na podstawie równania (11) Fotyma i in. (1987, za Woodruff 1955) przedstawił koncepcję molarnej energii wymiany K w roztworze glebowym po zwiększeniu stężenia Ca według algorytmu:

$$dF = 5701 \log \frac{K_{(aq)}}{Ca_{(aq)}}, \quad 5701 = 9,63 R T \quad (12)$$

gdzie: dF – wolna energia wymiany (J).

Sparks (1988, za Beckett i in. 1964-1972) wprowadził do równania (11) także Mg^{2+} uzyskując wyrażenie, które pozwala na obliczenie współczynnika aktywności (*Activity Ratio* – AR):

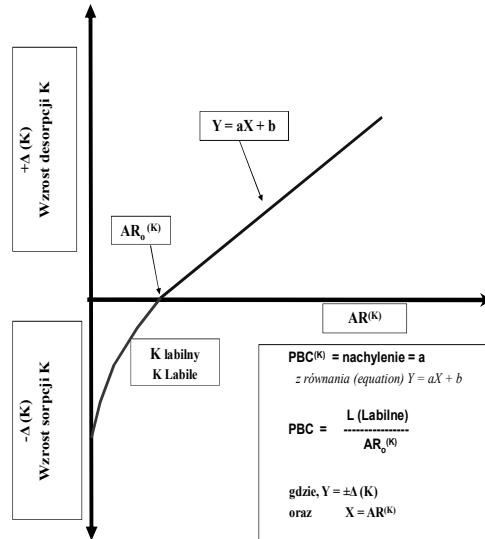
$$AR = \frac{K_{(aq)}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})_{(aq)}^{1/2}} \quad (13)$$

Współczynnik aktywności AR informuje o względnej aktywności jonów K^+ w stosunku do jonów Ca^{2+} i Mg^{2+} . Zależność między tymi parametrami przedstawia rysunek 3.2.2 (Diatta i in. 2006).

Kontrola i regulowanie chemizmu gleb

Czynnikami najsilniej kształtującymi chemizm gleb, zwłaszcza uprawnych, są nawożenie (dopływ) oraz wyniesienie z plonami, a także wymywanie (straty) składników mineralnych. Zmiany chemiczne, które zachodzą w glebie są także pochodną potencjału gleby do magazynowania (*kontrola* – Q) i udostępnienia (*regulowania* – I) roślinom różnych jonów. Ta prawidłowość jest możliwa do kwantyfikowania w stosunku do jonów potasu, wapnia i magnezu.

Z praktycznego punktu widzenia należy oczekiwać, że wzrost pojemności wymiennej gleby w stosunku do kationów (PWK) w celu utrzymania „krytycznego” AR^K prowadzi jednocześnie do zwiększania ilości wymiennego (dostępnego) potasu.



Rys. 3.2.2. Zależność między potasem wiązany (sorbowany) a jego stężeniem równowagowym w roztworze glebowym

Zatem gdy K, Ca, Mg wymienne reprezentują największy udział w PWK, to w stanie równowagi ustala się zależność (Diatta i in. 2006):

$$K_{(s)} = Q_G(PWK - K_{(s)}) * AR^K \quad (14)$$

z tym, że,

$$(PWK - K_{(s)}) = \frac{1}{2}Ca_{(s)} + \frac{1}{2}Mg_{(s)} \quad (15)$$

gdzie: s oznacza fazę stałą gleby (*solid phase*).

Bardzo ważną rolę w dynamice procesów termodynamicznych w glebie odgrywają warunki wilgotnościowe (nadmiar lub niedobór wody), a zwłaszcza odczyn. Wskaźnik CAB, czyli równowagi wapniowo-glinowej (ang. CAB – *Calcium-Aluminium-Balance*) umożliwia dokonanie oceny stopnia oddziaływania rozpuszczalnego wapnia i glinu w różnych zakresach pH gleb:

$$CAB = \log_{10} \frac{Ca}{Al}, \text{ gdzie } Ca \text{ i } Al \text{ reprezentują aktywności molowe.}$$

Środowisko glebowe, sprzyjające wegetacji roślin uprawnych roślin, wymaga wartości $CAB > -0,81$, co tym samym oznacza większą kontrolę Ca nad Al. Gdy,

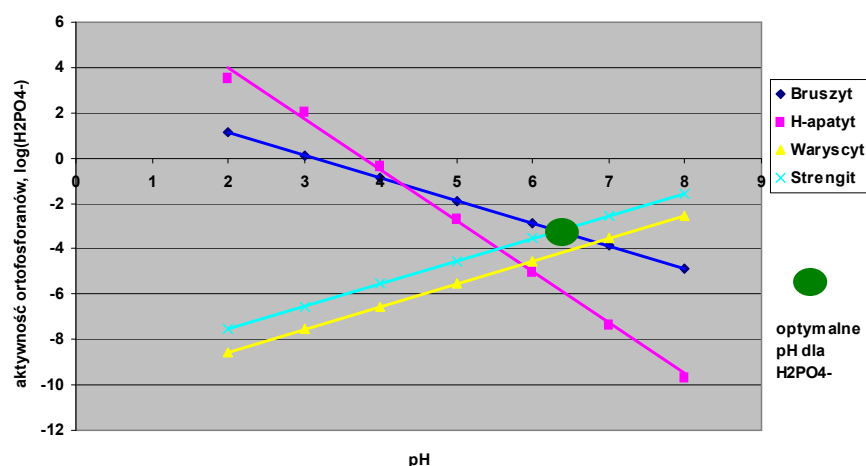
wskaźnik ten kształtuje się $< -1,21$ obserwuje się degradację środowiska glebowego, co wynika z większego stopnia zakwaszenia (Al dominuje nad Ca).

Fosfor w glebie – ortofosforany i odczyn

Ortofosforany i odczyn

Jony ortofosforanowe, H_2PO_4^- i HPO_4^{2-} są podstawowym składnikiem mineralnym podlegającym procesom rozpuszczania i wytrącania związków fosforu w roztworze glebowym. Przebieg tych reakcji jest uzależniony od występowania minerałów zawierających fosfor a ściślej od odczynu gleby. Zatem, na glebach o:

- odczynie obojętnym i alkalicznym reakcje są przeważnie kontrolowane przez *bruszyt* (CaHPO_4), *hydroksyapatyt* [$(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH})$];
- odczynie kwaśnym przez: *waryscyt* (AlPO_4) oraz *strengit* (FePO_4).



Rys. 3.2.3. Minerale kontrolujące aktywność dostępnego fosforu w roztworze glebowym (Grzebisz 2012)

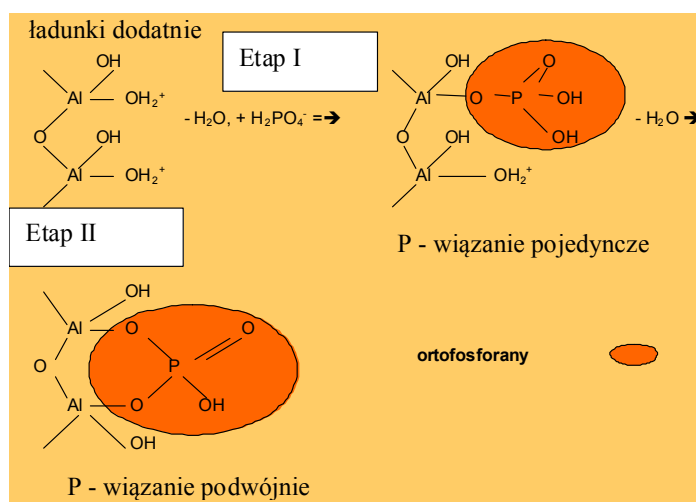
Z rysunku 3.2.3 wynika, że wzrost pH gleby bardzo silnie zmniejsza aktywność jonów H_2PO_4^- , lecz jednocześnie wzrasta rozpuszczalność związków związanych z żelazem i glinem. Optymalna wartość pH dla H_2PO_4^- wynosi 6,3. Powyżej tej wartości stężenie jonów ortofosforanowych ogranicza *bruszyt*, a poniżej *strengit*.

Sorpcja, Retrogradacja, „Starzenie”

Przemiany związków fosforu w glebie mają charakter wieloetapowy, w których przeważają mechanizmy zarówno fizyczne jak i chemiczne. Konsekwencją tej złożoności jest nazewnictwo, które wywołuje nieraz szum informacyjny. O ile

sorpcja (*sorption*) wyraża najczęściej proces przyrostu fazy stałej niezależnie od rodzaju adsorbenta i adsorbentu, o tyle retrogradacja (*retrogradation*), ściśle przepisana jonom ortofosforowym, oznacza przejście tych ostatnich z form rozpuszczalnych i aktywnych w nierozpuszczalne. Jednym słowem jest to sorpcja. Starzenie (z ang. *ageing*) oznacza retrogradację, jako proces zależny od czasu.

Sorpcja specyficzna zachodzi w szerokim zakresie odczynu, od obojętnego po kwaśny, wykazując spadek ilościowy wraz ze wzrostem pH gleby. Istotą adsorpcji specyficznej jest mechanizm wymiany anionowej, który przebiega wieloetapowo (Rys. 3.2.4). W pierwszym etapie procesu zachodzi wymiana grupy OH^- , na powierzchni adsorbenta z anionem H_2PO_4^- z roztworu glebowego (Etap I). W rezultacie powstaje tzw. *wiązanie pojedyncze*. Kolejny etap polega na deprotonacji jednej z grup OH , zaadsorbowanego uprzednio ortofosforanu (Etap II). Proces ten zachodzi nawet w warunkach niskiego pH gleby. Ostatecznie powstaje *wiązanie podwójne*. Przyjmuje się, że wiązania podwójne wykazują większą stabilność i są opisywane szeroko w literaturze, jako tzw. proces „starzenia”.



Rys. 3.2.4. Schemat specyficznej adsorpcji ortofosforanów w glebach kwaśnych

Geochemiczne przemiany makro i mikrośladników oraz materii organicznej są ściśle związane z kontrolą i regulowaniem stężeń zarówno Ca jak i Al. Większość zakłóceń w równowadze jonów między fazą stałą a roztworem glebowym bezpośrednio oddziałuje na chemizm gleb.

PIŚMIENNICTWO

- Diatta J., Kociałkowski Z., Grzebisz W., 2006. Evaluation of potassium quantity intensity parameters of selected Polish agricultural soils. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities (EJPAU), Agronomy*, 9(4), 1-14.
- Fotyma M., Mercik S., Faber A., 1987. *Chemiczne Podstawy Żyzności Gleb i Nawożenia*. PWRiL.
- Grzebisz W., 2008. *Nawożenie Roślin Uprawnych. 1. Podstawy Nawożenia*, PWRiL.
- Schroeder D., 1984. *Soils, Facts and Concepts*. IPI, Bern/Switzerland.
- Sparks D. L., 1988. *Kinetics of Soil Chemical Processes*. Academic Press, Inc. San Diego, California 92101.

3.3. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na efektywność nawożenia roślin uprawnych

Witold Grzebisz

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Hierarchia czynników plonotwórczych – kategorie plonów

Wzrost i plon rośliny uprawnej (P) jest wynikiem współdziałania czynników plonotwórczych: genetycznych (G), środowiskowych (Ś) i agrotechnicznych (A):

$$P = G \cdot \dot{S} \cdot A \quad (1)$$

Czynniki plonotwórcze ze względu na wagę – hierarchię wpływu na procesy wzrostu i plonowanie roślin uprawnych, dzieli się na:

1. Definiujące: a) roślinne – odmiana, b) środowiskowe: promieniowanie, temperatura, zawartość CO₂ w łąnie.
2. Ograniczające: a) woda, b) azot, c) żywieniowe, agrotechniczne i ekonomiczne, warunkujące efektywność produkcyjną wody i azotu.
3. Redukujące: a) choroby, b) szkodniki, c) zanieczyszczenie środowiska.

Czynniki pierwszej grupy są niezależne od rolnika, lecz to on decyduje o wyborze odmiany. Woda i azot, jako nadrzędne czynniki wzrostu, kształtują rozdział asymilatów między części rośliny w okresie jej wegetacji. Gospodarka wodą w siedlisku warunkuje pobieranie azotu. Czynniki żywieniowe (makro- i mikro-składniki) i agrotechniczne, jako drugoplanowe czynniki wzrostu, warunkują pobieranie i przetwarzanie azotu w biomasę i plon użytkowy. Niedostateczna ochrona roślin prowadzi do utraty plonu, bez względu na stan gospodarki azotem.

Na podstawie wagi czynników plonotwórczych wyróżnia się trzy kategorie plonów: a) potencjalny, b) maksymalny, c) rzeczywisty. Plon potencjalny określa **potencjał plonowania gatunku**, zawarty w genomie, do wydania plonu użytkowego. Przykładowo, potencjał plonowania kukurydzy szacuje się na 32 t·ha⁻¹, a obecne odmiany plonują od 10 do 20 t·ha⁻¹. **Plon maksymalny** definiuje potencjał plonowania odmiany w ściśle określonych warunkach środowiskowych, pod warunkiem minimalizacji stresów abiotycznych i biotycznych. **Plon rzeczywisty** odzwierciedla aktualny wpływ czynników siedliskowych, agrotechnicznych i ekonomicznych na plonowanie uprawianej odmiany.

Produktywność wody i azotu – plon maksymalny

W danych warunkach siedliska ilość dostępnej wody warunkuje pobieranie i przetworzenie azotu w biomasę. Wyprodukowana przez roślinę masa (W) jest funkcją ilości wody (T) i ewapotranspiracji (ET), (Grzebisz 2008):

$$W = T \cdot (k/VPD) \quad (2)$$

Biomasa rośliny uprawnej składa się z dwóch części, masy korzeni (r) oraz nadziemnej, której tylko część, oznaczana jako indeks żniwny (HI, ang. harvest index), stanowi plon użytkowy. Algorytm plonu użytkowego:

$$P = [W \cdot (1 - r) \cdot HI] \cdot 10 \quad (3)$$

- W, P – biomasa, plon użytkowy ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ s.m.),
- T, k – transpiracja, ($\text{g H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2}$); stała zużycia wody (kPa),
- VPD – deficyt prężności pary wodnej w atmosferze, (kPa),
- 1-r – frakcja masy nadziemnej, (wartość niemianowana, < 1,0),
- HI – indeks plonu użytkowego, (wartość niemianowana, < 1,0),
- 10 – współczynnik przeliczeniowy plonu z $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ na $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Równania 2 i 3 pozwalają wyznaczyć potencjał siedliska do produkcji plonu użytkowego. Poniżej przedstawiono sposób wyliczenia plonu pszenicy ozimej warunkowanego gospodarką wodą w łanie (Grzebisz, 2008).

Założenia: T = 500 mm; k = 4,5 kPa; VPD = 2 kPa; 1-r = 0,9; HI = 0,50.

Obliczenia: $W = 500 \cdot 4,5 / 2 = 1125 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ s.m.; $P = (1125 \cdot 0,9 \cdot 0,5) \cdot 10 = 506,25 \cdot 10 = 5062,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ s.m. = (5062,5/0,85) = 5 956 kg ziarna $\cdot \text{ha}^{-1}$.

Ilość azotu, zgromadzona przez roślinę uprawną w okresie wegetacji, oraz jego rozdział między część użytkową, a plon uboczny, wyznacza wielkość plonu. Na tej podstawie algorytm plonu przyjmuje postać (Grzebisz, 2008):

$$P = N_{\text{upt}} \cdot (NHI/G_N) \rightarrow N_{\text{upt}} = P \cdot G_N / NHI \quad (4)$$

- P – plon użytkowy, $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$;
- N_{upt} – całkowita akumulacja azotu w czasie zbioru, $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$;
- G_N – koncentracja azotu w ziarnie, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,
- NHI – azotowy indeks plonu, wartość niemianowana, < 1,0.

Plon pszenicy, spełniający normy jakościowe, winien zawierać 22,5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ w ziarnie (= 0,0225 $\text{kg} \cdot \text{kg}$ s.m. ziarna) a indeks żniwny azotu, NHI (ang. nitrogen harvest index) na poziomie 75% (0,75). Zapotrzebowanie łanu pszenicy na azot dla plonu 6 t ha^{-1} ziarna, zakładając 500 mm dostępnej wody, wynosi:

$$N_{\text{upt}} = 6000 \cdot 0,0225 / 0,75 = 135 / 0,75 = 180 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \quad (5)$$

Pobranie przez pszenicę wyliczonej ilości azotu jest warunkiem koniecznym uzyskania plonu, wynikającego z wartości produkcyjnej siedliska o wymaganej jakości technologicznej. Analogiczne wyliczenie, przeprowadzone dla pozostałych roślin uprawianych w gospodarstwie, jest pierwszym elementem racjonalnego planu nawozowego, istotnym dla kontroli efektywności azotu.

Azot wirtualny

Azot dostępny (N_d) dla uprawianej rośliny w danym sezonie wegetacyjnym składa się z trzech podstawowych form: a) mineralnej, obecnej w glebie na początku wegetacji (N_{min}), b) mineralizowanej w okresie wegetacji (N_{pot}), c) wprowadzony do gleby w nawozach mineralnych (N_f):

$$N_d = N_{min} + N_{pot} + N_f \quad (6)$$

Azot nawozowy, jako czynnik krytyczny w okresie wegetacji podlega: a) pobraniu przez roślinę (N_p), b) uwstecznieniu w glebie (N_t), c) stratom (N_s):

$$N_f = N_p + N_t + N_s \quad (7)$$

Fracje N_t w szczególności oraz N_s mogą być potencjalnie wykorzystane przez roślinę w okresie wegetacji. Czynniki ograniczającymi są niedobory: a) dostępnej wody, b) składników mineralnych w krytycznych fazach formowania plonu. Operacyjna ocena produktywności N_f opiera się na kalkulacji wskaźnika jakim jest produktywność jednostkowa azotu, PFP_N (ang. partial factor productivity of fertilizer N), czyli masa plonu (P) na jednostkę N w nawozie (D_N):

$$PFP_N = P/D_N \quad (8)$$

Obliczenie wartości lub trend wskaźnika przeprowadza się na podstawie danych wieloletnich dla wariantów nawozowych o różnych dawkach azotu lub na podstawie średnich statystycznych plonów z wielolecia. Dla pszenicy w Polsce w latach 1986-2012 średnia wartość tego wskaźnika w całym okresie wynosiła 53 a średnia dla 4-tej kwarty (PFP_{Nc} , optymalne warunki wodne), 70 kg ziarna $kg N^{-1}$ (Diatta i Grzebisz 2012). Oszacowane na podstawie PFP_{Nc} plony pszenicy wyniosły 5,13, podczas gdy rzeczywiste – 3,71 $t \cdot ha^{-1}$. **Różnica między plonem maksymalnym (wirtualnym) a rzeczywistym wyznacza wielkość wirtualnie utraconego plonu, P_w .** Nieefektywny, niewykorzystany plonotwórczo w okresie wegetacji składnik, czyli **azot wirtualny**, oblicza się z algorytmu:

$$N_w = P_w/PFP_{Nc} \quad (9)$$

W wieloleciu 1986-2012 utracony plon pszenicy wyniósł $1420 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, a więc N_w dla $\text{PFP}_{Nc} = 70 \text{ kg} \cdot \text{kg N}^{-1}$ kształtował się na poziomie $20,3 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Czynniki drugoplanowe – koncepcja poziomów wysycenia

Zadaniem rolnika nie jest zastosowanie dodatkowej dawki azotu, kompensującej N_w , lecz działania na rzecz przetworzenia tej ilości azotu w plon. Istotą gospodarki azotem jest, bowiem optymalne zaopatrzenie uprawianej rośliny w azot w krytycznych fazach formowania elementów struktury plonu. Każdy czynnik produkcyjny, który warunkuje pobieranie i przetworzenie azotu w biomasę a następnie w plon, poprawia efektywność N_f . Zgodnie z **prawem wysycenia** wielkość plonu rzeczywistego (P) aktualnie uprawianej rośliny wynika ze stopnia niedoskonałości warunków wzrostu wyrażonego iloczynem względnej wartości poziomów wysycenia czynników wzrostu (Grzebisz, 2009):

$$P = A \cdot [(1 - X_N) \cdot [(1 - X_P) \cdot [(1 - X_K) \cdot \dots \cdot (1 - X_n)]]] \quad (10)$$

A – plon maksymalny, $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$,

X – względny stopień niedoboru czynnika produkcji, $\leq 1,0$,

N, P, K, n – czynniki produkcyjne: azot, fosfor, potas, pozostałe.

W pierwszym etapie oceny efektywności czynnika produkcyjnego należy określić stan niedoboru składnika w środowisku wzrostu. Tylko przy optymalnym stanie zaopatrzenia rośliny (stan wysycenia = 0,95-1,0) czynnik drugoplanowy nie ogranicza działania azotu. Niedobór potasu w zbożach, ograniczając gospodarkę azotem w okresie od strzelania w źdźbło do dojrzałości wodnistej, prowadzi do zmniejszenia liczby ziarniaków na jednostce powierzchni. Niedobór fosforu od kwitnienia do dojrzałości woskowej ziarniaka, zmniejsza masę ziarniaka.

Efektywność plonotwórczą trzech podstawowych składników żywieniowych, azotu (N), fosforu (P) i potasu (K) przedstawia poniższe rozumowanie. Potencjał plonowania współczesnych odmian pszenicy wynosi $10\ 000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Maksymalne przyrodniczo wykorzystanie azotu mineralnego w glebie kształtuje się na poziomie 85% (0,85). Aktualny stosunek składników w nawozach mineralnych i naturalnych ($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}$) w Polsce kształtuje się jak 1:0,4:0,5. W optymalnych warunkach glebowo-pogodowych winien kształtować się jak 1:0,33:0,66, a w niekorzystnych (lata z częstymi suszami), jak 1:0,5:1,0. Zatem w pierwszym przypadku czynnikiem w niedoborze jest potas, dla którego wartość X_K wynosi – 0,24 (= 0,66-0,5/0,66). W drugim wariancie oba składniki występują w niedoborze, wynosząc dla X_P – 0,2 a dla X_K – 0,5. Prognoza plonów pszenicy (równanie 9) przedstawia się następująco:

1. Lata optymalne: $P = 10\,000 \cdot [(1-0.15) \cdot (1-0) \cdot (1-0.24)]$
 $= 10\,000 \cdot (0.85 \cdot 0.76) = 10\,000 \cdot 0.646 = 6\,460 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.
2. Lata niekorzystne: $P = 10\,000 \cdot [(1-0.15) \cdot (1-0.2) \cdot (1-0.5)]$
 $= 10\,000 \cdot (0.85 \cdot 0.8 \cdot 0.5) = 10\,000 \cdot 0.34 = 3\,400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Pierwsza wartość mieści się w zakresie plonów maksymalnych w Polsce, a druga przedstawia stan zbliżony do rzeczywistego, ujawniający się w latach suchych.

PIŚMIENNICTWO

- Grzebisz W., 2008. Nawożenie roślin uprawnych. Tom 1. Podstawy nawożenia. PWRiL, Poznań.
- Grzebisz W., 2009. Nawożenie roślin uprawnych, T.2. Nawozy i systemy nawożenia. PWRiL.
- Grzebisz W., Diatta J., 2012. Constraints and Solutions to Maintain Soil Productivity: A Case Study from Central Europe. (Ed. Whalen J.): "Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management – A Global Perspective", 159-182.

3.4. Wpływ właściwości fizycznych i fizykochemicznych gleb na produkcję i emisję gazów glebowych

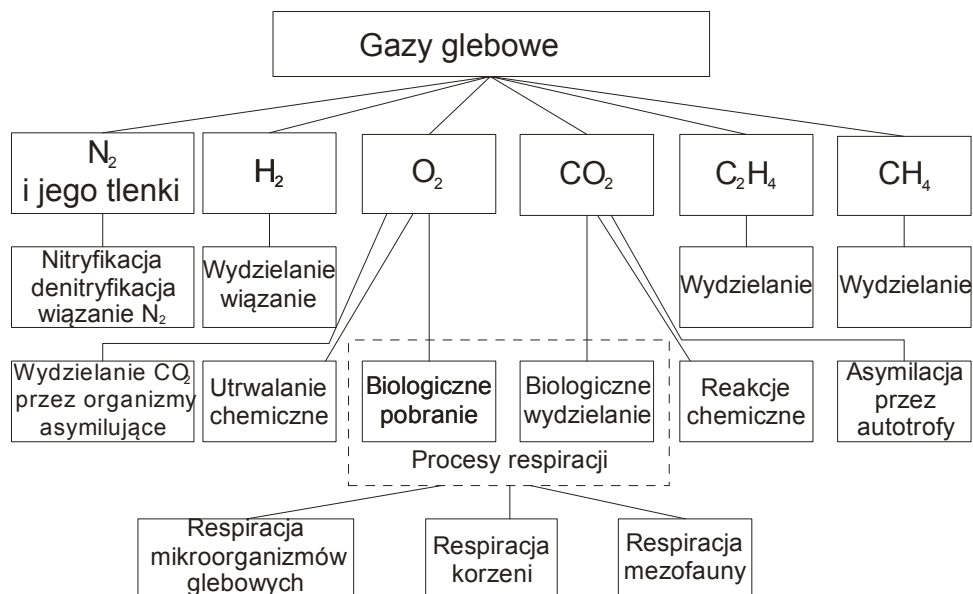
Teresa Włodarczyk

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Gleba jest głównym źródłem dwutlenku węgla (CO_2), metanu (CH_4), i podtlenku azotu (N_2O), których emisja zależy od czynników środowiskowych gleby. W środowisku tym występuje intensywne wytwarzanie, przekształcenie i pochłanianie wielu gazów, których transport odbywa się „do” i „z” atmosfery. Do najważniejszych gazów glebowych należy tlen (O_2), niezbędny do oddychania korzeni i ważny w metabolizmie drobnoustrojów i wielu procesach biochemicznych i chemicznych oraz CO_2 , produkt oddychania tlenowego korzeni roślin, mikroorganizmów, mezo- i makrofauny, jak również drobnoustrojów beztlenowych. Powietrze gleby zawiera ponadto szereg gazów występujących w ilościach śladowych, takich jak N_2O , tlenek azotu (NO) i dwutlenek azotu (NO_2), etylen (C_2H_4), amoniak (NH_3) i siarkowodór (H_2S). CH_4 w warunkach tlenowych występuje w glebie w śladowych ilościach, podczas gdy w warunkach podmokłych i obfitych odpadów może zajmować znaczną część powietrza glebowego. Zależnie od stanu napowietrzania, gleba może być źródłem lub absorbentem takich gazów jak CH_4 i N_2O (Stępniewski i Stępniewska 2009, Włodarczyk i in. 2005). Procesy pochłaniania i wydzielania gazów w glebie wiążą się z przemianami O_2 , CO_2 , N_2 i jego tlenków, H_2 , CH_4 , C_2H_4 i niektórych innych węglowodorów (Rys. 3.4.1).

CO_2 , CH_4 i N_2O są produkowane i pochłaniane w glebie głównie przez drobnoustroje, które zmieniają stężenie tych gazów. Działalność drobnoustrojów glebowych przebiega pod wpływem wielu czynników środowiska glebowego, do których należą m. in.: temperatura, wilgotność, dostępność węgla, substancje odżywcze, kwasowość, potencjał redoks (E_h), topografia terenu, struktura gleby, pokrywa roślinna i zagospodarowanie przestrzenne. Tempo produkcji i pochłaniania gazów, dyfuzja, przepływ masy oraz wypłukiwanie rozpuszczonego gazu w glebie, są głównymi czynnikami kontrolującymi wymianę gazów pomiędzy glebą i atmosferą. Globalne atmosferyczne stężenie CO_2 , CH_4 oraz N_2O w okresie przed rewolucją przemysłową wynosiło odpowiednio około 280 ppm, 715 ppb, i 270 ppb, i wzrosło do około 379 ppm, 1774 ppb, i 319 ppb w roku 2005 (Forster i in. 2007).

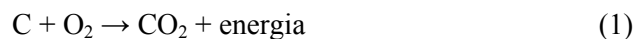
Stan napowietrzania gleby wpływa nie tylko na emisję takich gazów jak CO_2 , CH_4 , N_2O , ale również emisję NH_3 , NO_x i C_2H_4 .



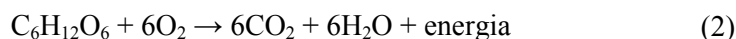
Rys. 3.4.1. Procesy związane ze składem powietrza (Gliński i Stępniewski 1985)

CO₂

Liczne procesy biochemiczne są odpowiedzialne za produkcję CO₂, między innymi heterotroficzne oddychanie tlenowe, denitryfikacja, fermentacje, utlenianie CH₄ lub jego produkcja. CO₂ jest produkowany w glebie w procesie heterotroficznego oddychania w celu uzyskania energii w wyniku rozkładu materii organicznej (M.O.) oraz oddychania korzeni roślin. Emisja CO₂ jest nazywana oddychaniem gleby. CO₂ produkowany jest również podczas oddychania zwierząt i roślin. Wytwarzanie CO₂ w glebie w warunkach tlenowych jest bezpośrednio związane z pobieraniem tlenu. Zatem wszystkie czynniki wpływające na pobór tlenu wpływają również na emisję CO₂. Proces oddychania tlenowego można zapisać najogólniej następującym równaniem (Gliński i Stępniewski 1985):



W przypadku glukozy:

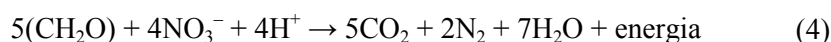
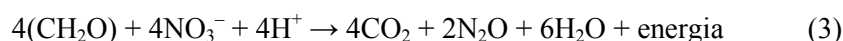


Biorąc pod uwagę komplementarny charakter wykorzystania tlenu i wytwarzania CO₂, ich suma w powietrzu gleby wynosi zwykle około 20% objęścio-

wych. Oznacza to, że również ich przepływy między glebą a atmosferą są w przybliżeniu równe. Stężenie tlenu w powietrzu gleby zmniejsza się wraz z głębokością, podczas gdy CO₂ zwiększa się. Skład powietrza gleby jest czynnikiem decydującym dla metabolizmu drobnoustrojów i roślin, dla wielu reakcji utleniania-redukcji oraz utlenienia licznych składników pokarmowych w glebie, jak również płodności gleby i wydajności upraw.

W warunkach anoksji CO₂ może być wytwarzany bez zużycia tlenu (suma O₂ i CO₂ > 20%), a emisja CO₂ z gleby przekracza pobraną ilość O₂. Długotrwałe niedotlenianie (hipoksja) gleby zmniejsza emisję CO₂, co prowadzi do akumulacji węgla w glebie. Ostatecznym akceptorem elektronów w procesie oddychania tlenowego jest O₂. Natomiast przy oddychaniu beztlenowym, funkcję tę pełnią utlenione związki nieorganiczne, np.: NO₃⁻, Fe₂O₃, MnO₂, SO₄⁻, H₂ oraz utlenione związki organiczne (Stępniewski i Stępniewska, 2009).

Reakcje oddychania azotanowego w procesie denitryfikacji:



Aktywność drobnoustrojów i korzeni roślin stanowią o intensywności wydzielania CO₂ z gleby, na którą składa się wiele czynników. Najważniejszym z nich jest ilość i jakość M.O. w glebie, która jest największym stabilnym rezerwuarem C w glebie, a rozkład której przyczynia się do zmian stężenia CO₂ w atmosferze. Ilość M.O. zależy od równowagi pomiędzy produkcją pierwotną i szybkością rozkładu. Pomimo możliwości utrzymywania długiego okresu stanu równowagi, jeśli rozkład M.O. przekracza proces humifikacji, C z M.O. staje się bardzo dużym potencjalnym źródłem CO₂ (Kuzyakov 2006).

Temperatura gleby jest bardzo ważnym czynnikiem środowiska, wpływającym na ilość emisji CO₂ z gleby. Równocześnie susza w glebie powoduje znaczący spadek emisji CO₂. Następujący po niej gwałtowny deszcz, wywołuje epizodyczną wzmożoną emisję CO₂ z gleby. Różne rodzaje gleb mają różne relacje między wydzielaniem CO₂, temperaturą i wilgotnością gleby. Struktura, wilgotność i temperatura wpływają znacząco na emisję CO₂ z gleby w czasie sezonu wegetacyjnego. Obecność pyłu i łu na ogół zmniejsza tempo rozkładu M.O., zmniejszając w ten sposób emisję CO₂ do atmosfery. Korzenie roślin oddziałują także na mineralizację M.O. poprzez obniżenie wilgotności. W suchej glebie obniżenie wilgotności spowodowane wzrostem roślin zmniejsza wydzielanie CO₂ (Paul i Clark 2000).

Aktywność zespołu drobnoustrojów zasiedlających glebę i ich zdolność adaptacji do zmieniających się warunków glebowych, jest kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na emisję CO₂ i sekwestrację C.

Orka jest jednym z ważniejszych czynników zwiększających emisję CO₂, większe napowietrzenie gleby stymuluje aktywność mikrobiologiczną gleby, ponadto rozpad makro agregatów sprzyja rozkładowi mniej stabilnej M.O. Obserwuje się też krótkookresowy, nagły wzrost emisji CO₂, uwięzionego w porach glebowych.

Znaczącym źródłem CO₂ jest proces fermentacji metanowej zachodzący w glebie w warunkach beztlenowych, jako produkt uboczny towarzyszący produkcji CH₄.

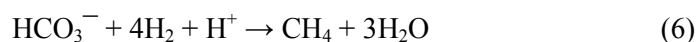
CH₄

CH₄ powstaje w procesie fermentacji metanowej. Jest to proces mikrobiologiczny, podczas którego złożone substancje organiczne przekształcane są do CH₄ i CO₂. Przebiega on w warunkach beztlenowych, w ekosystemach naturalnych oraz sztucznie stworzonych przez człowieka, w czterech etapach: hydrolizy, kwasogenezy, octanogenezy oraz metanogenezy. Przykładowe reakcje procesu metanogenezy z różnych substratów:

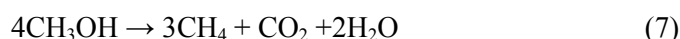
- Kwasu octowego:



- H₂ i CO₂ oraz mrówczanu:



- Metanolu, metyloaminy lub siarczku dimetylowego:



W przypadku kwasu octowego bilans masowy pokazuje, że około 72% CH₄ produkowanego jest z kwasu octowego, a pozostała część powstaje z redukcji CO₂, przy udziale mikroorganizmów. W atmosferze metan występuje w ilościach śladowych. Do znaczących, naturalnych źródeł emisji CH₄ zaliczamy m.in.:

- tereny podmokłe,
- oceany oraz zbiorniki wody słodkiej,
- erupcje wulkaniczne i pęknięcia skorupy ziemskiej,
- zwierzęta przeżuwające i termity – fermentacja celulozy w procesie trawienia.

Naturalne źródła stanowią około 30% emisji globalnej, czyli 100-200 Tg rocznie.

Do antropogenicznych źródeł metanu zaliczane są:

- wydobycie węgla, gazu ziemnego i ropy naftowej,
- transport i przetwórstwo bogactw naturalnych,
- hodowla zwierząt domowych,
- pola ryżowe,
- wysypiska i oczyszczalnie ścieków,
- spalanie materii organicznej.

Ogromna większość występującego w atmosferze metanu produkowana jest przez bakterie beztlenowe, rozkładające materię organiczną, nazywane bakteriami metanogennymi. Procesy te zachodzą zarówno w ekosystemach naturalnych jak i antropogenicznych. Przeważająca część emisji antropogenicznej ma pochodzenie biologiczne, a tylko niewielka część powstaje w wyniku niecałkowitego spalania związków organicznych.

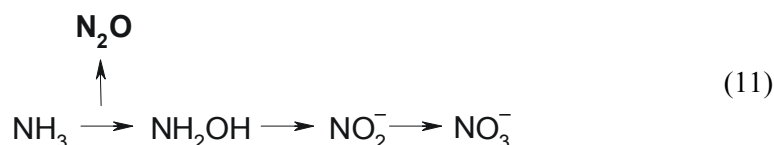
Wilgotność jest jednym z najważniejszych czynników środowiskowych gleby, wpływających na emisję CH_4 z gleby. Znacząca jest również rola tkanek aerenchymy roślin ryżu oraz innych roślin, które są w stanie transportować nagromadzony metan z rizosfery do atmosfery, drogą wewnętrznego przepływu poprzez rośliny. Podczas wegetacji ryżu, aerenchyma jest główną drogą transportu CH_4 , ze względu na utrudnioną jego dyfuzję do atmosfery spowodowaną zalaniem gleby. Odwodnienie pola ryżowego w końcowej fazie jego wegetacji, powoduje wzmożoną emisję CH_4 na skutek usunięcia bariery w postaci wody i bezpośredniej jego dyfuzji z gleby do atmosfery. Zalane pola uprawne ryżu stanowią 25% udziału w globalnej emisji metanu do atmosfery.

Generalnie, metan produkowany w glebach zalanych transportowany jest do atmosfery drogą dyfuzji z miejsca jego tworzenia a następnie uwalniany do atmosfery, po wysyceniu roztworu przez bąbelkowanie, jak również drogą wewnętrzną poprzez rośliny (Stępniewska i in. 2004).

N_2O

N_2O pochodzi ze źródeł naturalnych oraz emisji związanej z działalnością człowieka. Głównymi źródłami związanymi z działalnością człowieka jest gospodarka rolna (około 67% ogólnej emisji), zarządzanie odchodami zwierzęcymi, oczyszczalnie ścieków, spalanie paliw kopalnych, produkcja chemiczna. N_2O powstaje również w naturalnych terenach w glebie i wodzie (las tropikalne, tereny podmokłe).

N_2O powstaje głównie jako produkt uboczny w tlenowym procesie nityfikacji:

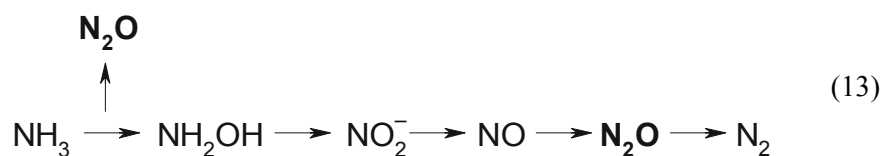


oraz jako produkt pośredni podczas beztlenowej denityfikacji:

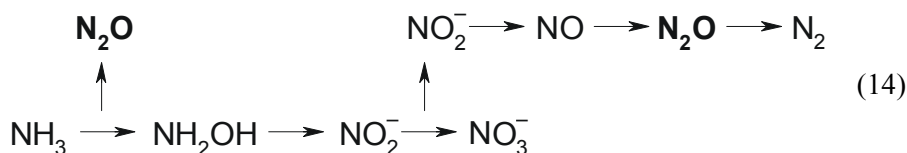


Ponadto N_2O wydzielają się w następujących procesach:

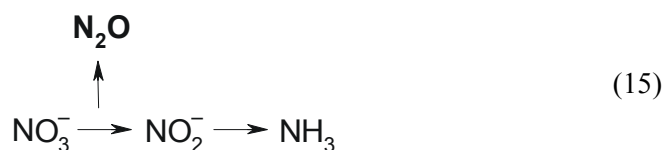
- Denityfikacji prowadzonej przez nityfikatory:



- Denityfikacji zależnej od nityfikacji, gdzie produkt nityfikacji jest substratem dla denityfikacji:



- Dysymilacyjnej redukcji azotanów(V) do amoniaku:



Denityfikacja zachodzi w warunkach beztlenowych, gdzie akceptorami elektronów jest tlen związany w azotanach(V) i (III). Niezbędne są przy tym odpowiednie ilości związków organicznych, będących donorami elektronów istotnych dla zaistnienia procesu. Bierze w nim udział wiele rodzajów bakterii heterotroficznych. W wyniku niedostatku tlenu cząsteczkowego, przy Eh poniżej 400 mV, następuje redukcja azotanów, których zawartość w glebie wynosi na ogół od kilku do kilkudziesięciu $mg \cdot kg^{-1}$, zależnie od nawożenia mineralnego (Szarlip i in.

2010). N_2O może występować w glebie w równowagowej ilości, tylko w bardzo wąskim zakresie potencjałów redoks. Po zalaniu gleby, przy niższych wartościach potencjału redoks, N_2O jest redukowany do N_2 , natomiast przy większych wartościach jest utleniany biochemicznie do NO_3^- . N_2O może być wytwarzany na pewnej głębokości gleby, a następnie absorbowany w głębszych i bardziej obniżonych poziomach lub utleniony podczas migracji do atmosfery. Blżej powierzchni gleby może być wytwarzany również w procesie nitrifikacji. Ze względu na różnorodność gleby, N_2O może być wytwarzany wewnątrz agregatów glebowych i jednocześnie może być utleniany w przypowierzchniowej warstwie gleby.

Temperatura gleby i jej wilgotność są istotnymi czynnikami środowiska, które wpływają na ilość emitowanego N_2O . Długoterminowa obserwacja gleb położonych na wyżynach wykazała, że wzrost emisji N_2O pochodzącego z nitrifikacji, spowodowany jest wzrostem temperatury, natomiast w przypadku denitrifikacji, wzrostem opadów. Ponadto stwierdzono, że zamrażanie i rozmrażanie gleby w strefie lasów borealnych wpływa na wzmożone wydzielanie N_2O zimą i wczesną wiosną. Należy podkreślić, że większość światowej emisji N_2O pochodzi z gleby. Pomiarów polowe wskazują, że emisja N_2O z użytków zielonych jest wyższa niż gleb uprawnych i lasów oraz że znaczna część N_2O jest emitowana z gleb użytkowanych rolniczo w zimie. Całkowita emisja N_2O jest proporcjonalna do nawożenia N i zwykle jest większa z gleb nieuprawianych z porównaniu z glebami uprawnymi (Hatano i Lipiec 2004; Stępniewski i Stępniewska 2009; Włodarczyk i in. 2005).

Generalnie, czynniki środowiskowe, takie jak; wilgotność, temperatura, pH, stężenie substratu, struktura gleby itp. mają wpływ na metabolizm drobnoustrojów, a tym samym na zmianę tempa tworzenia produktów anaerobowych jakimi są CH_4 i N_2O .

PIŚMIENNICTWO

- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller, H.L. (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gliński J., Stępniewski W., 1985. *Soil Aeration and its Role for Plants*. CRC Press, Boca Raton, Fl.
- Hatano R., Lipiec J., 2004. Effects of land use and agricultural practices on greenhouse gas fluxes in soil. *Acta Agrophysica*, 108, 50.
- Kuzyakov Y., 2006. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 425-448.
- Paul E.A., Clark F.E., 2000. *Mikrobiologia i Biochemia Gleb*. Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie Skłodowskiej Lublin.

- Stępniewska Z., Przywara G., Bennicelli R.P., 2004. Reakcje roślin w warunkach anaerobiozy. *Acta Agrophysica*, 113.
- Stępniewski W., Stępniewska Z., 2009. Selected oxygen-dependent process – Response to soil management and tillage. *Soil & Tillage Research*, 102, 193-200.
- Szarlip P., Włodarczyk T., Brzezińska M., Gliński J., 2010. Production and uptake of nitrous oxide (N₂O) as affected by soil conditions. *Acta Agrophysica*, 187.
- Włodarczyk T., Stępniewski W., Brzezińska M., 2005. Nitrous oxide production and consumption in Calcaric Regosols as related to soil redox and texture. *Int. Agrophysics*, 19, 263-271.

3.5. Wpływ właściwości fizycznych gleb na wzrost i plonowanie roślin

Jerzy Lipiec

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Właściwości fizyczne gleb są powodowane przez siły fizyczne i mogą być opisane terminami fizycznymi lub równaniami. Na przykład porowatość, gęstość, zdolność zatrzymywania wody, przewodnictwo wodne, rozkład wielkości porów, temperatura są właściwościami fizycznymi. (Soil Science Society of America 2008, Gregory i in. 2002). Są one kształtowane przez zabiegi uprawowe, systemy rolnicze, zmianowanie roślin, zawartość materii organicznej, nawożenie organiczne i mineralne oraz mulczowanie (ściółkowanie). Reakcja roślin na właściwości fizyczne gleby zależy od ich fazy rozwoju (Lipiec i in. 2011).

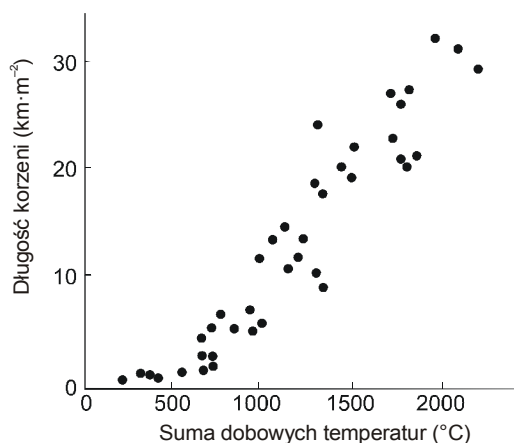
Wzrost roślin w fazach kiełkowania i wschodów

Wzrost roślin w tych fazach rozwoju zależy przede wszystkim od właściwości fizycznych łoża siewnego (warstwa od powierzchni gleby do głębokości siewu). Głównymi czynnikami fizycznymi warunkującymi kiełkowanie i wschody są temperatura, zawartość wody, natlenienie i opór mechaniczny łoża siewnego i materiału leżącego bezpośrednio poniżej.

Temperatura

Temperatura przypowierzchniowej warstwy gleby zależy głównie od przewodnictwa cieplnego, wilgotności, porowatości, albedo i nasłonecznienia. Niska temperatura gleby w klimacie chłodnym jest głównym czynnikiem spowalniającym szybkość kiełkowania i wschodów a w konsekwencji zmniejszającym obsadę roślin (crop establishment). Negatywne oddziaływanie niskiej temperatury związane jest ze zmniejszoną rozpuszczalnością roztworów, dyfuzji i absorpcji jonów oraz aktywności enzymatycznej gleby. Minimalna temperatura w okresie kiełkowania i wschodów roślin waha się w szerokim zakresie w zależności od gatunku rośliny. Na przykład dla grochu wynosi ona 1,4°C a dla kukurydzy 9,8°C. Często w literaturze podawana jest jedna wartość 5°C w odniesieniu do roślin uprawnych. W glebie wilgotnej temperatura jest zwykle głównym czynnikiem warunkującym kiełkowanie i początkowy wzrost roślin. Optymalna temperatura dla wzrostu pędów jest nieco wyższa niż dla korzeni, przy czym korzenie są bardziej wrażliwe na nagłe zmiany temperatury.

W celu scharakteryzowania warunków termicznych w czasie wczesnego wzrostu roślin, temperaturę można wyrazić w postaci sum dobowych temperatur powyżej temperatury progowej. Temperatury 5 lub 10°C są często przyjmowane jako wartości progowe dla początkowego wzrostu roślin. Wartości sum dobowych temperatur różnią się znacznie zależnie od terminu siewu. Rysunek 3.5.1 ilustruje zależność pomiędzy długością korzeni pszenicy ozimej a sumą dobową temperatur dla różnych terminów siewu. Warunki termiczne można również wyrazić w stopnio-dniach (SD) (jeden SD jest to jedna doba ze średnią dobową temperaturą o 1°C wyższą od temperatury progowej) (Whalley i in. 2000). Suma stopnio-dni w okresie od siewu do wschodów jest charakterystyczną cechą danego regionu. W warunkach Wielkopolski suma ta w odniesieniu do kukurydzy wynosi 37 (Dragońska i in. 2008). Dane opisujące warunki termiczne w początkowym okresie wzrostu są pomocne w doborze odpowiednich odmian zależnie od warunków klimatycznych.



Rys. 3.5.1. Narastająca długość korzeni pszenicy w funkcji sumy dobowych temperatur (Barraclough and Leigh 1984)

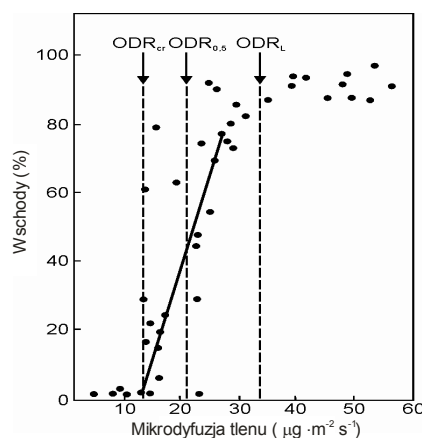
Wilgotność

Nasiona umieszczone w glebie przed kiełkowaniem absorbują wodę w ilości odpowiadającej w przybliżeniu masie nasion. Dostępność wody w tym okresie zależy w dużym stopniu od powierzchni kontaktu nasion z glebą. W strukturalnych glebach drobnoziarnistych powierzchnia kontaktu zmniejsza się wraz ze wzrostem wielkości agregatów glebowych. Również obecność nierozłożonych resztek roślinnych zmniejsza powierzchnię tego kontaktu. Wpływ tych czynników na kiełkowanie i wschody roślin jest większy w glebie słabo niż dobrze uwilgot-

nionej. W warunkach przesuszenia łoża siewnego, ale złożonego z dominującym udziałem drobnych agregatów (<5 mm), kiełkowanie i wschody roślin grubonasiennych można poprawić poprzez nieznaczne zwiększenie głębokości siewu.

Natlenienie

Niewystarczające natlenienie gleby w warstwie siewnej występuje zazwyczaj w glebach słabo przepuszczalnych oraz zaskorupionych w wyniku ograniczonej wymiany gazowej między glebą i atmosferą. Warunki natlenienia gleby do wschodów roślin dobrze opisuje mikrodyfuzja tlenu w glebie (oxygen diffusion rate). Rysunek 3.5.2 przedstawia zależność pomiędzy wschodami owsa i mikrodyfuzją tlenu w glebie.



Rys. 3.5.2. Wschody roślin owsa w zależności od mikrodyfuzji tlenu w glebie: ODR_{cr} (wschody roślin całkowicie zahamowane); $\text{ODR}_{0,5}$ (50% wschodów roślin); ODR_L (znaczący spadek wschodów roślin) (Gliński i Stępniewski 1985)

Nasiona niektórych roślin (np. buraka, pomidora) wymagają dobrego natlenienia w czasie kiełkowania, inne natomiast mogą kiełkować przy ograniczonym natlenieniu (pszenica, marchew) lub nawet w warunkach całkowicie beztlenowych (np. ryż, ogórek).

Opór mechaniczny

Opór mechaniczny gleby jest miarą odporności na odkształcenia (wytrzymałości mechanicznej) i wzrasta wraz ze wzrostem gęstości gleby i zmniejszeniem wilgotności gleby.

Wzrost gęstości gleby jest najczęściej rezultatem przejazdów i maszyn rolniczych podczas wykonywania zabiegów przedsiewnych i siewu. Również skorupy

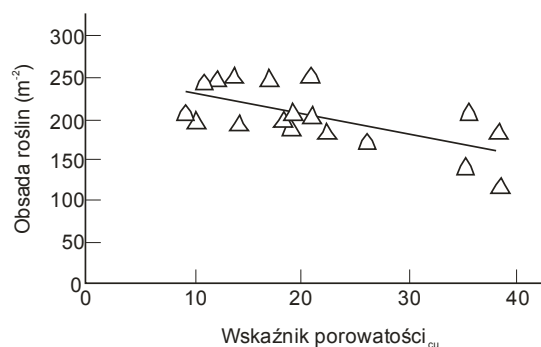
glebowe (twarde warstwy powierzchniowe o grubości <2 mm) tworzą barierę mechaniczną dla wschodów roślin. Skorupy glebowe (tworzą się głównie w glebach z nietrwałą strukturą np. pylastych) podczas nawadniania lub intensywnych opadów deszczu po siewie, a następnie wysychania gleby. Korzenie i pędy rosnące w warunkach zwiększonego oporu mechanicznego gleby zużywają więcej asymilatów niż w glebie luźnej. Wykazano, że kiełkowanie, wzrost korzeni, wydłużanie koleoptyla i wschody pszenicy nie były ograniczone przez opory mechaniczne gleby odpowiednio poniżej 3,0 MPa, 2,3 MPa, 1,7 MPa i 0,8 MPa. Natomiast wzrost oporu mechanicznego powyżej 2-3 MPa prowadzi do istotnego lub całkowitego zahamowania wzrostu korzeni większości roślin uprawnych. Negatywny wpływ oporu mechanicznego gleby na wschody roślin zwiększa się wraz ze wzrostem głębokości siewu i zaznacza się w większym stopniu w przypadku siewek z drobnych nasion (np. lucerny) niż dużych siewek z dużych nasion (np. kukurydzy).

Struktura

Struktura gleby nie oddziałuje bezpośrednio na wzrost roślin, ale wpływa pośrednio na zaopatrzenie roślin w wodę i tlen, temperaturę i opór mechaniczny gleby w obrębie strefy korzeniowej roślin. Struktura gleby jest często definiowana jako rozmieszczenie przestrzenne wszystkich składników gleby (Dexter 1988). Wpływ struktury łoża siewnego na wschody i obsadę roślin zależy od wielkości agregatów glebowych i związanej z tym struktury porów, które są w dużym stopniu kształtowane przez narzędzia doprawiające rolę przed siewem (np. włóka, brona, kultywator). Na ogół łoża siewne złożone z agregatów małych (<5 mm) stwarza najlepsze warunki kiełkowania i wschodów roślin (Håkansson 2005, Atkinson i in. 2009). W szczególności odnosi się to do roślin buraka cukrowego, roślin krzyżowych i koniczyny, mających drobne pojedyncze nasiona (1-5 mg), które powinny być płytko umieszczone pod powierzchnią gleby (zwykle $<3,5$ cm). Rośliny grubonasienne są mniej wrażliwe na głębokość siewu. Przed-siewne zabiegi doprawiające takie jak bronowanie i włokowanie prowadzą do uzyskania struktury drobno-agregatowej, a talerzowanie i wałowanie tworzą strukturę z przewagą agregatów dużych.

Struktura gleby z przewagą agregatów dużych lub brył glebowych (>10 mm) z dużymi przestworami powietrznymi prowadzi do obniżenia obsady roślin ze względu na słaby kontakt nasion z glebą i ograniczone pobieranie wody i składników pokarmowych (Rys. 3.5.3). Bryły glebowe często występują w glebach gliniastych i ilastych, a ich udział zwiększa się wraz ze wzrostem gęstości gleby. Wały ugniatające są stosowane do poprawy kontaktu nasion z glebą. Optymalne warunki strukturalne do wschodów roślin występują wtedy, gdy makroporowa-

tość warstwy siewnej waha się od 10-19%, a średnia wielkości porów od 8 do 12 mm² (Atkinson i in. 2009).



Rys. 3.5.3. Związek pomiędzy obsadą roślin pszenicy po wschodach a wskaźnikiem wielkości porów PSD₆₀ (stosunek wielkości porów dla 10% i 60% mikroporowatości). Większy wskaźnik oznacza większy udział porów dużych (Atkinson i in. 2009)

Wschody roślin mogą być ograniczone przez różne czynniki fizyczne zależnie od klimatu. Na przykład w regionach klimatu chłodnego i wilgotnego głównymi czynnikami są niska temperatura i niedotlenienie podczas gdy w klimacie półpustynnym – nadmierny opór mechaniczny, wysoka temperatura i niedobór wody.

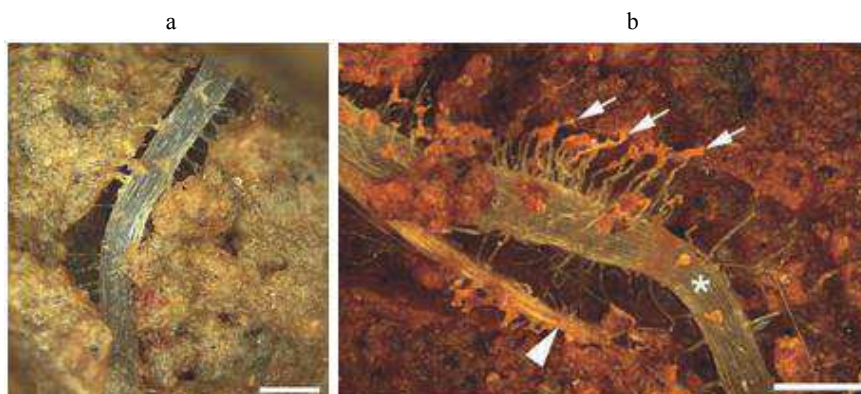
Wzrost i rozwój roślin po wschodach

Najważniejszymi czynnikami fizycznymi oddziałującymi na wzrost i rozwój systemu korzeniowego i pędów roślin po wschodach są wilgotność, opór mechaniczny, porowatość aeracyjna i temperatura gleby zarówno w warstwie ornej jak i podornej.

Wilgotność

Wilgotność odpowiadająca połowej pojemności wodnej (ppw) (potencjał macierzysty gleby –100 hPa) jest najkorzystniejsza dla wzrostu większości roślin uprawnych. Natomiast przy potencjale macierzystym – 1,5 MPa odpowiadającym punktowi wędnięcia woda zawarta w porach małych (<0,2 μm) jest niedostępna dla roślin. Korzenie roślin w warunkach niedoboru wody są bardziej rozgałęzione, wytwarzają więcej śluzu i w przypadku niektórych roślin pokrywają się suberyną. Śluz i suberyna stanowią bariery ochronne przed wysychaniem. Przy dłuższym niedoborze wody korzenie się kurczą, a efektem tego jest zmniejszenie powierzchni kontaktu pomiędzy korzeniami i glebą. Rysunek 3.5.4 ilustruje słaby kontakt korzeni pszenicy w makroporach i korzystny wpływ włóśników korze-

niowych na utrzymanie tego kontaktu w warunkach niedoboru wody. Korzenie roślin uprawnych, takich jak soja brązowieją w warunkach niedoboru wody, ale po ponownym nawodnieniu tych warstw gleby pojawiają się często nowe białe i jędrne korzenie.



Rys. 3.5.4. Korzenie pszenicy rosnące z włosnikami korzeniowymi w makroporach w warunkach niedoboru wody. W dolnej części rysunku b, oprócz włosników korzeniowych oznaczonych strzałkami widoczny jest również skurczony korzeń lucerny (oznaczony główką strzałki). Białe odcinki = 0,2 mm (White i Kirkegaard 2010)

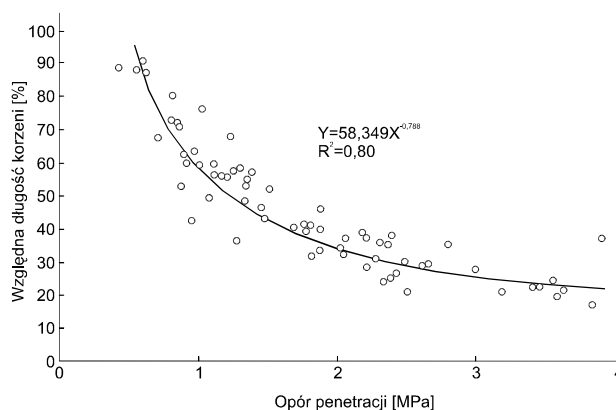
Stres wodny roślin powstaje wtedy, gdy straty wody z rośliny w ciągu dnia przewyższają pobieranie wody z gleby i maleje w nocy, kiedy pobieranie przewyższa straty. Łatwo dostrzegalnymi objawami braku wody w pędach roślin są zwijanie i więdnienie, a czasami brązowienie liści. Utrzymanie optymalnego uwilgotnienia gleby ma szczególne znaczenie w okresach intensywnego wzrostu roślin (np. w maju w przypadku zbóż).

Krzywa retencji wodnej jest wskaźnikiem dostępności wody dla roślin i rozkładu porów a jej charakterystyczny punkt przegięcia zmienia się pod wpływem użytkowania gleby. Przesłanki te były podstawą do opracowania wskaźnika jakości fizycznej S (Dexter 2004) z uwzględnieniem nachylenia krzywej retencji w tym punkcie. Wzrost tego nachylenia wskazuje na większe zróżnicowanie porów pod względem wielkości w glebie i znajduje odzwierciedlenie w większych wartościach wskaźnika S. Wartości wskaźnika $S > 0,05$ wskazują na dobrą jakość fizyczną gleby oraz dużą ilość wody dostępnej dla roślin, podczas gdy wartości $< 0,02$ świadczą o degradacji struktury porów i niskiej jakości gleb. Choć znaczna większość gleb wykazuje jeden punkt przegięcia, zastosowanie tego wskaźnika może być ograniczone w glebach z większą niż 1 liczbą punktów przegięcia. Przydatność wskaźnika S do oceny jakości struktury gleby i warunków wzrostu

roślin była przedmiotem badań w różnych warunkach środowiskowych (np. Czyż i Dexter 2009, Pereira i in. 2012).

Opór mechaniczny

Względny spadek długości korzeni wraz ze wzrostem oporu mechanicznego gleby, mierzonym penetrometrycznie, jest podobny dla większości roślin uprawnych, pomimo znacznych różnic w wielkości systemu korzeniowego między gatunkami roślin rosnącymi w glebie luźnej. Optymalny opór penetrometryczny dla wzrostu roślin wynosi około 1 MPa. Istotne ograniczenie w wzroście korzeni roślin (>50%) występuje, kiedy opór ten przekracza wartość 2 MPa, a całkowite zahamowanie przy >4 MPa (Rys. 3.5.5). Wartości te są większe w glebie z obecnością porów dużych, które umożliwiają korzeniom omińnięcie miejsc mocno zagęszczonych (wzrost preferencyjny). Na ogół korzenie rosnące w glebie nadmiernej zwięzłej są grubsze, wężykowate i nierównomiernie rozmieszczone w glebie, a ich komórki zwłaszcza naskórka i epidermy zdeformowane (Lipiec i in. 2012). Wzrost korzeni w takiej glebie jest możliwy tylko przez pory glebowe o średnicy równej lub większej od korzeni roślin.



Rys. 3.5.5. Względna długość korzeni roślin uprawnych w funkcji oporu mechanicznego gleby (Bennie 1991)

Ograniczony wzrost korzeni prowadzi do obniżenia plonu. Wykazano, że plon ziarna zbóż jest często ujemnie liniowo skorelowany z oporem mechanicznym gleby. Negatywny wpływ oporu mechanicznego na plon roślin zaznacza się w największym stopniu w latach suchych, kiedy opór mechaniczny zwiększa się wraz ze spadkiem wilgotności gleby. Połączone oddziaływanie obydwu czynników ma duże znaczenie w przewidywaniu plonów w glebach lekkich o małych zdolnościach zatrzymywania wody, w których oddziaływanie nadmiernego oporu

mechanicznego na wzrost roślin połączone jest z niedoborem wody już przy niewielkim spadku wilgotności gleby.

Zwiększony opór mechaniczny gleby w obrębie strefy korzeniowej roślin powstaje pod wpływem przejazdów ciężkich maszyn i narzędzi rolniczych. Wpływ ten jest zwykle największy podczas jesiennego zbioru roślin okopowych, kiedy gleba jest wilgotna i tym samym podatna na zagęszczenie. Również uprawa roli zbyt wilgotnej prowadzi do wzrostu gęstości gleby oraz niekorzystnych zmian w jej strukturze. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu nadmiernego oporu mechanicznego gleby są także stosowanie uproszczonego zmianowania roślin z pominięciem roślin regenerujących strukturę gleby oraz opady deszczu.

Również występowanie zbitych warstw w profilu glebowym takich jak podszwa płużna, związane poziomy genetyczne B, warstwy orsztynu stanowi poważną barierę dla wzrostu korzeni roślin. Warstwy te ograniczają wzrost korzeni głównie poprzez nadmierny opór mechaniczny i niewystarczające natlenienie. Negatywny wpływ tych warstw na wzrost korzeni roślin zwiększa się wraz ze zmniejszeniem ich głębokości występowania i wzrostem miąższości. Wpływ ten może być złagodzony poprzez kompensacyjny wzrost korzeni w wierzchniej warstwie, pod warunkiem, że jest ona zasobna w wodę i przyswajalne składniki pokarmowe.

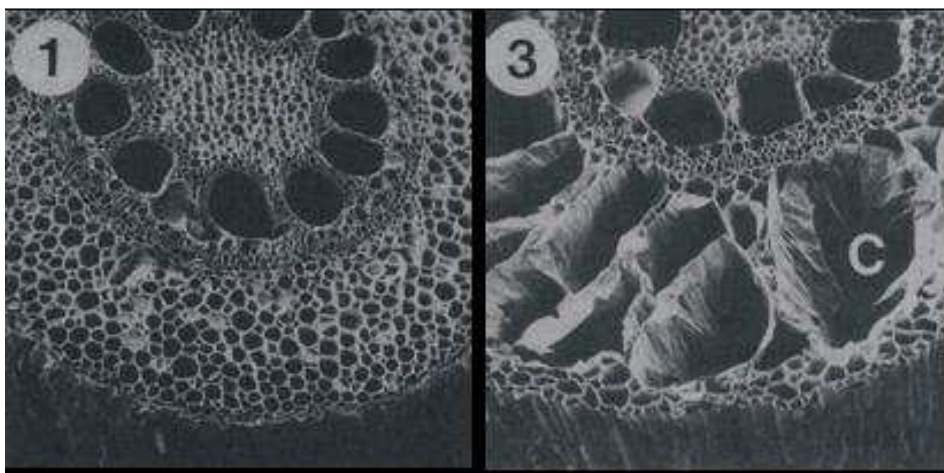
W glebach gruboziarnistych opór mechaniczny może także wynikać z chropowatości cząstek piasku, które zahaczając się wzajemnie, uniemożliwiają wzrost korzeni. Natomiast pomiar tego oporu nie jest możliwy przy użyciu penetrometrów polowych z sondami o średnicy stożka większej niż cząstki piasku. Z drugiej strony chropowate ziarna gleby w porównaniu do gładkich są mniej podatne na zagęszczenie, którego wzrost prowadzi do zwiększonego oporu mechanicznego.

Natlenienie

Odpowiednie natlenienie zapewnia sieć porów ciągłych wypełnionych powietrzem w całej objętości gleby. Optymalne warunki natlenienia gleby dla wzrostu roślin występują, kiedy porowatość powietrzna, potencjał redox Eh lub mikrodyfuzja tlenu wynoszą odpowiednio >15%, 450 (min. 330) mV i >50 (min. 20-30) $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Zawartość tlenu w powietrzu glebowym nie powinna być mniejsza niż 5%. Pierwszym objawem niedotlenienia występującego w strefie korzeniowej jest zanik gutacji, następnie zahamowanie wzrostu korzeni. Jeśli niedobór tlenu utrzymuje się kilka godzin występuje obumieranie korzeni. Korzenie rosnące w warunkach niedoboru tlenu są grubsze, krótsze, mniej rozgałęzione i jaśniejsze a w przypadku roślin motylkowych posiadają mniejszą ilość brodawek. Innym charakterystycznym objawem korzeni rosnących w warunkach niedotlenienia jest aerotropizm (wzrost korzeni na powierzchni gleby) oraz płytki system korzeniowy. To wynika m. in. ze zmniejszenia ciśnienia wywieranego przez korzenie z 0,4 MPa

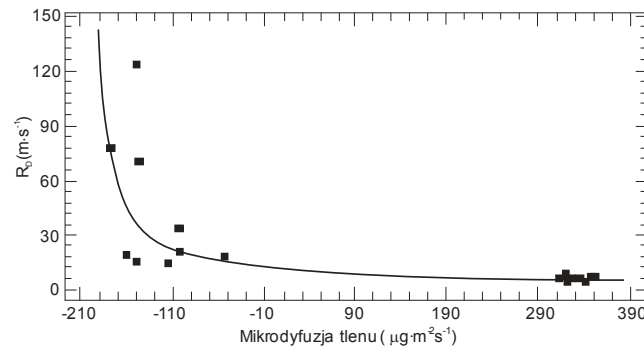
przy ich pełnym natlenieniu (21% O₂) do 0,13 MPa w warunkach beztlenowych a tym samym zdolności do zasiedlania niżej położonych warstw gleby.

Warunki niedotlenienia w glebie prowadzą do zaburzeń homeostazy w całej roślinie i adaptacji morfologicznej i funkcjonalnej (Stępniewska i in. 2004). Adaptacja morfologiczna polega na powstawaniu miękiszu powietrznego (aerenchymy), w którym powietrze atmosferyczne przemieszcza się do niedotlenionych korzeni lub też gazów ze strefy korzeniowej do atmosfery (Rys. 3.5.6). Tworzenie aerenchymy związane jest z podziałem lub autolizą i dezintegracją komórek kory korzenia pod wpływem wydzielanego etylenu. Przejawem adaptacji funkcjonalnej jest zmniejszenie efektu Pasteura poprzez obniżenie aktywności dehydrogenazy etanolowej oraz wytwarzanie w alternatywnych szlakach metabolicznych kwasów jabłkowego i mlekowego w celu usunięcia nagromadzonego etanolu.

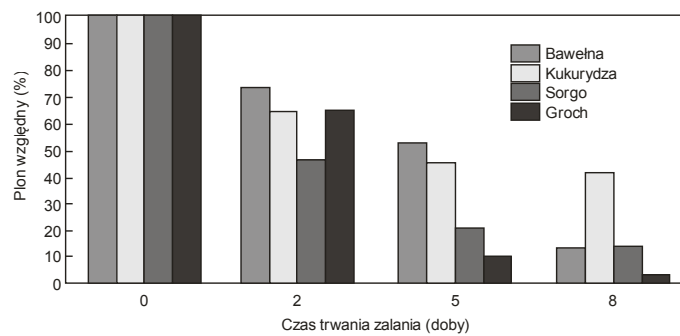


Fot. 3.5.6. Przekrój poprzeczny korzeni kukurydzy obserwowany w skaningowym mikroskopie elektronowym. (1) dobrze natleniony roztwór; (3) nie natleniony roztwór; C – widoczne przestrzenie powietrzne (aerenchyma). Powiększenie ok. 500x (Stępniewska i in. 2004)

Niedotlenienie strefy korzeniowej powoduje zamykanie się szparek, związane z gromadzeniem w częściach nadziemnych kwasu absyzynowego (ABA) poprzez zmianę turgoru w wyniku migracji jonów potasowych do komórek przyszparkowych i odpływ jonów chloru. Ta reakcja liści prowadzi do zmiany bilansu cieplnego rośliny oraz zmniejszenia tempa transpiracji, fotosyntezy i oddychania, co prowadzi do obniżenia plonu końcowego roślin. Zależność pomiędzy oporem dyfuzyjnym aparatów szparkowych a mikrodyfuzją tlenu (ODR) oraz potencjałem oksydo-redukcyjnym gleby u roślin grochu ilustruje rysunek 3.5.7.



Rys. 3.5.7. Opór dyfuzyjny aparatów szparkowych (R_D) w funkcji ODR po 12 dniach trwania stresu tlenowego u roślin grochu *Pisum sativum* cv. (Sępniewska i in. 2004)



Rys. 3.5.8. Zależność pomiędzy plonem roślin i czasem trwania niedotlenienia w wyniku zalania wodą (Lal 2002)

Spadek plonu w warunkach niedoboru tlenu wzrasta w miarę wydłużania czasu trwania niedotlenienia w wyniku zalania gleby wodą (Rys. 3.5.8). Tolerancyjność roślin na niedotlenienie jest różna w zależności od gatunku czy grupy roślin, od całkowicie dostosowanych hygrophytes (roślin wodnych) do bardzo wrażliwych gatunków roślin uprawnych, które przeżywają tylko krótkie okresy niedotlenienia (1-2 dni). Na ogół u większości roślin uprawnych spadek plonu jest duży, gdy niedotlenienie występuje w początkowych fazach rozwoju roślin (przed kwitnieniem). Głównymi czynnikami powodującymi spadek plonu w warunkach niedotlenienia są akumulacja substancji toksycznych (np. azotyny), zredukowanych form żelaza i manganu, siarkowodoru oraz przekształcenie azotanów (NO_3) do N_2 przy niskim pH gleby i powstanie toksycznego kwasu azotowego III. Wraz ze zmniejszeniem zawartości tlenu zwiększa się także stężenie dwutlenku węgla i etylenu oraz powstają krótko-łańcuchowe kwasy tłuszczowe. Czynniki te od-

działają głównie na rośliny poprzez ograniczenie transpiracji, więdnienie i przedwczesne dojrzewanie roślin (Gliński i Stępniewski 1985).

Temperatura

Optymalna temperatura gleby w szerokim przedziale wilgotności gleby dla większości roślin naszego klimatu waha się od 20 do 30°C. Obniżenie temperatury wzrostu ciepłolubnej kukurydzy prowadzi do powolniejszego tempa wzrostu i wytwarzania większej ilości korzeni cienkich (Begough 2011). Minimalne temperatury letalne dla roślin wahają się w szerokim zakresie w zależności od gatunku rośliny i czasu ich oddziaływania. Na przykład pędy mrozoodpornej gruszy mogą przeżyć wydłużone okresy przy temperaturze –29°C, ale przy temperaturze –34°C przemarzają już w ciągu sekund. Odporne liście pszenicy przeżywają bez uszkodzeń temperaturę –10°C i przemarzają w krótkim czasie przy –12°C.

Maksymalne temperatury letalne dla większości roślin uprawnych wahają się od 42 do 60°C. Tak wysokie temperatury roślin rzadko występują w przyrodzie, zwłaszcza przy dobrym zaopatrzeniu roślin w wodę i samo-chłodzenia liści podczas transpiracji. Wtedy temperatura liści w zakresie optimum temperaturowego dla wzrostu roślin niewiele się różni od temperatury powietrza. W zakresie poniżej optimum temperatura liści jest wyższa niż powietrza, a w zakresie powyżej optimum – niższa. Temperatura liści roślin rosnących w niskiej temperaturze może przewyższać temperaturę powietrza nawet o 6-10°C. Temperatura części reprodukcyjnych roślin (owoce) jest wyższa niż temperatura powietrza, ponieważ nie mają one zdolności do samo-chłodzenia jak liście.

Interakcyjne oddziaływania różnych czynników na rośliny

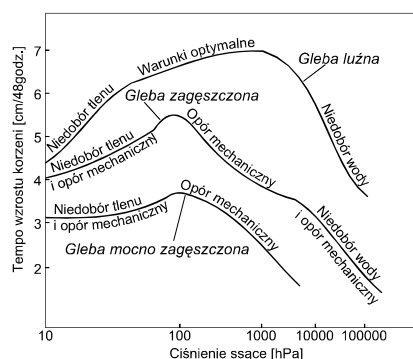
Opór mechaniczny-wilgotność-natlenienie

Wilgotność gleby sama w sobie jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na wzrost korzeni i części nadziemnych roślin. Ponadto wzrost wilgotności lub potencjału wody glebowej prowadzi do zmniejszenia natlenienia, natomiast jej spadek do wzrostu oporu mechanicznego. Stąd w określonych zakresach uwilgotnienia, stresogenne oddziaływanie niektórych czynników na wzrost korzeni może być połączone. Oddziaływanie to zależy od gęstości gleby (Rys. 3.5.9).

Agregacja-opór mechaniczny-natlenienie

Na ogół warunki wzrostu korzeni roślin pogarszają się wraz ze wzrostem wielkości agregatów glebowych (gruzełków). Wynika to stąd, że tylko niewielka część korzeni wnika do wnętrza agregatów dużych (brył) z powodu nadmiernego oporu mechanicznego przy niskim uwilgotnieniu gleby i niedotlenienia – przy wysokim

uwilgotnieniu gleby (zwłaszcza w części wewnętrznej agregatów). Wpływ ten znaczący się w większym stopniu w przypadku korzeni drobnych niż grubych.



Rys. 3.5.9. Interakcyjne oddziaływanie oporu mechanicznego, natlenienia i uwilgotnienia gleby na wzrost korzeni roślin w zależności od ciśnienia ssącego i gęstości gliny piaszczystej (Gliński i Lipiec 1990)

Opór mechaniczny-kwasowość

W niektórych glebach negatywne oddziaływanie zbitych warstw gleby na wzrost korzeni połączone jest z oddziaływaniem kwasowości. Ujemne oddziaływanie niskiego pH w warstwie wierzchniej gleby może być złagodzone wapnowaniem. Natomiast w warstwach głębszych stosowanie wapna jest technicznie trudne. W tych warstwach niskie pH jest często głównym czynnikiem ograniczającym wzrost korzeni roślin i dlatego efektywność głębokich zabiegów rozluźniających zwięzłe warstwy gleby jest mała.

Zarówno kwasowość jak i nadmierny stan zagęszczenia w warstwie podornej są czynnikami, które mogą powodować istotne ograniczenie wzrostu korzeni roślin do niżej położonych warstw, zwykle zasobnych w wodę. Konsekwencją mniejszej głębokości systemu korzeniowego jest duża wrażliwość roślin na suszę między opadami deszczu. Głęboki system korzeniowy ma szczególne znaczenie w przypadku gleb lekkich charakteryzujących się małymi zdolnościami zatrzymywania wody, w tym wody dostępnej dla roślin. Negatywne skutki zakwaszenia i zagęszczenia warstwy podornej gleby na rośliny mogą być wydatnie zredukowane przez wapnowanie lub zabiegi agromelioracyjne (np. głębokie spulchnienie) oraz tzw. uprawę biologiczną przez uwzględnienie w zmianowaniu roślin z głębokim systemem korzeniowym, poprawiających strukturę gleby (Grzebisz 2008, White i Kirkegaard 2010).

Natlenienie-temperatura-zasolenie

W glebach z płytko zalegającym poziomem wody gruntowej, wzrost korzeni może być ograniczony nie tylko przez niedobór tlenu, ale także przez niższą temperaturę gleby (w klimacie chłodnym) lub obecność soli (w klimacie ciepłym).

Wilgotność-zasolenie

Niedobór wody i zasolenie są ważnymi czynnikami ograniczającymi produkcję roślinną w rejonach klimatu suchego. Występujące w tych warunkach zmniejszenie potencjałów osmotycznego i wody glebowej prowadzi do ograniczonego pobierania wody przez korzenie roślin. W glebie zasolonej szybkość pobierania wody zmniejsza się w większym stopniu w wyniku zmniejszenia potencjału wody glebowej niż potencjału osmotycznego gleby.

PIŚMIENNICTWO

- Atkinson B.S., Sparkes D.L., Mooney S.J., 2009. Effect of seedbed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research*, 103, 291-301.
- Barraclough P.B., Leigh R.A., 1984. The growth and activity of winter wheat roots in the field: The effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crops. *J. Agric. Sci., Camb.* 103, 59-74.
- Bennie A.T., 1991. Growth and mechanical impedance. In: Waisel Y., Eshel A., Kafkali U. (eds.): *Plant Roots – The Hidden Half*. Marcel Dekker, New York, 393-414.
- Czyż E.A., Dexter A.R., 2009. Soil physical properties as affected by traditional, reduced and no-tillage for winter wheat. *Int. Agrophysics*, 23, 319-326.
- Dexter A.R., 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Dragońska E., Szwejkowski Z., Panfil M., Orzech, K., 2008, Wpływ spodziewanych zmian klimatu na fenologię kukurydzy uprawianej na ziarno w Wielkopolsce. *Acta Agrophysica*, 12(2), 327-336.
- Gliński J., Stepniowski, W., 1985. *Soil Aeration and Its Role for Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Gliński J., Lipiec J., 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Gregory E.G., Turchenek L.W., Carter M.R., Angers D.A. (eds.), 2002. *Soil and environmental science dictionary*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC.
- Grzebisz W., 2008. Nawożenie roślin uprawnych. Tom 1, PWRiL, Poznań.
- Lal R. (Ed), 2002. *Encyclopedia of Soil Science*: Marcel Dekker.
- Lipiec J., Horn R., Pietrusiewicz J., Siczek A., 2012. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, 121, 74-81.
- Lipiec J., Nosalewicz J., Pietrusiewicz J., 2011. Crop response to soil physical conditions. In: Gliński J., Horabik J., Lipiec J. (Eds.), *Encyclopedia of Agrophysics*, Springer Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 167-176.
- Pereira V.P., Ortiz-Escobar M.E., Rocha G.C., Assis Junior R.N., Oliveira T.S., 2012. Evaluation of soil physical quality of irrigated agroecosystems in a semi-arid region of North-eastern Brazil. *Soil Research*, 50(6), 455-464.

- Soil Science Society of America, 2008. Glossary of soil science terms, 2008 edition. Soil Science Society of America, Madison, WI, (Online). Available from World Wide Web: <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>.
- Stepniewska Z., Przywara G., Benucci R.P., 2004. Reakcja roślin w warunkach anaerobiozy *Acta Agrophysics, Rozprawy i Monografie*, 113, 1-85.
- Whalley W.R., Lipiec J., Stepniewski W., Tardieu F., 2000. Control and measurement of the physical environment in root growth experiments. In: Smit A.L., Bengough A.G., Engels C., van Noordwijk M., Pellerin S., van de Geijn S.C. (eds.), *Root Methods, A Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 76-112.
- White G.R., Kirkegaard, J.A., 2010. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil – implications for water uptake. *Plant Cell Environ.*, 33, 133-148.

3.6. Właściwości fizyczne i technologiczne materiałów roślinnych

Barbara Krzysztofik, Paulina Wrona

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Towaroznawcza analiza surowców pochodzenia roślinnego (zbóż, ziemniaków, buraków, owoców i warzyw) obejmuje ocenę organoleptyczną oraz ocenę cech fizycznych. Przydatność technologiczną ziarna zbóż określa się na podstawie tzw. **wartości przemiałowej**, którą określa się biorąc pod uwagę takie cechy, jak (Jurga 1982, 1992; Grzebisz 2009):

- zawartość bielma w ziarnie, jakość i ilość glutenu;
- łatwość oddzielania okrywy od bielma,
- wytrzymałość mechaniczną całego ziarna i jego części anatomicznych, aktywność enzymów amylolitycznych i in.,
- twardość i szklistość ziarna.

Ponadto badane są cechy zewnętrzne, czystość i zdrowotność ziarna.

Wygląd zewnętrzny zbóż obejmuje ocenę barwy, połysku, kształtu, wyglądu jego powierzchni i stopnia dojrzałości, jak również ilości i jakości zanieczyszczeń. Ziarno zdrowe i prawidłowo przechowywane powinno mieć barwę typową dla danego gatunku i odmiany o żywym połysku. Ziarna niedojrzałe są zwykle jaśniejsze od dojrzałych. Ziarna stare lub zbierane podczas deszczu, jak również porażone przez pleśń charakteryzują się ciemną barwą. Przy ocenie bulw ziemniaka, owoców i warzyw wygląd zewnętrzny, kształt, wielkość, wybarwienie, zanieczyszczenie i uszkodzenia są istotnym wyróżnikiem jakościowym surowców. Dokładną ocenę jakości uzyskuje się wykonując oznaczenia mechaniczne lub chemiczne.

W ramach oceny mechanicznej bada się następujące **cechy fizyczne ziarna**: gęstość ziarna w stanie usypowym, masę tysiąca ziaren, celność i wyrównanie, szklistość i mączystość, masę właściwą. Wykonuje się również oznaczenie wilgotności ziarna oraz ilości okrywy (łuski). W przypadku okopowych bada się gęstość, skrobiowość ziemniaka, zawartość ekstraktu w owocach czy cukru w burakach. Ponadto ważna jest struktura zebranego plonu (Gąsiorowski 1995, Grzebisz 2009).

Gęstość ziarna w stanie usypowym inaczej gęstość usypna, masa objętościowa oraz **porowatość warstwy ziarna** są ze sobą ściśle powiązane. Jest to inaczej ciężar gatunkowy lub ciężar objętościowy. Wyrażany jest w $\text{kg} \cdot 100^{-1} \text{dm}^{-3}$. Na tę wartość składają się: masa ziarna, zanieczyszczeń oraz powietrze znajdujące się w przestrzeniach między ziarnami. Zależy od dorodności, wykształcenia, stopnia

wypełnienia i struktury ziarna, oraz od grubości łuski, jak również od ilości i rodzaju zanieczyszczeń. Im większy ciężar objętościowy ziarna, tym jest ono lepszej jakości i decyduje o jego przydatności do przemiału.

Zależnie od gatunku wyróżnia się następujące gęstości:

- pszenica: nie mniej niż $72 \text{ kg} \cdot 100^{-1} \text{ dm}^{-3}$;
- żyto: nie mniej niż $68 \text{ kg} \cdot 100^{-1} \text{ dm}^{-3}$;
- jęczmień do przetwórstwa: nie mniej niż $64 \text{ kg} \cdot 100^{-1} \text{ dm}^{-3}$;
- owies do przetwórstwa: nie mniej niż $49 \text{ kg} \cdot 100^{-1} \text{ dm}^{-3}$;
- jęczmień do browaru: nie mniej $66\text{-}74 \text{ kg} \cdot 100^{-1} \text{ dm}^{-3}$ (Tab. 3.6.1).

Gęstość to inaczej masa określonej objętości. Składają się na nią ziarna właściwe, bulwy, korzenie, owoce, warzywa, zanieczyszczenia i powietrze z przestrzeni międzyelementowej. Gęstość w stanie zsypanym ma istotny wpływ na wyciąg mąki podczas przemiału ziarna, lub ilość uzyskanego produktu końcowego z surowców pochodzenia rolniczego.

Przykładowo dla pszenicy twardej stwierdzono, że przy obniżeniu gęstości z $81,9\text{-}84,3$ do $69,1\text{-}71,6 \text{ kg} \cdot 100^{-1} \text{ dm}^{-3}$ wyciąg mąki zmniejsza się z $72,1$ do $66,4\%$ (Najewski, Szarzyńska, 2013). Gęstość w stanie zsypanym decyduje również o ładowności zbiorników magazynowych, a porowatość warstwy ziarna wahająca się dla zbóż w granicach $35\text{-}60\%$, o łatwości prowadzenia zabiegów konserwacyjnych, np. aktywnej wentylacji.

Gęstość w stanie zsypanym jest wielkością charakteryzującą masę ziarna, bulw ziemniaka, wykorzystywaną w obliczeniach procesów zachodzących w warstwie surowców, a także przy projektowaniu silosów do przechowywania ziarna, komór przechowalniczych, skrzynio palet itp. Gęstość w stanie zsypanym jest mniejsza od gęstości pojedynczego obiektu (ziarna, bulwy) gdyż pomiędzy poszczególnymi elementami znajdują się wolne przestrzenie wypełnione powietrzem. Na wielkość tej cechy mają wpływ te same czynniki, które decydują o gęstości pojedynczych ziaren, bulw tj. kształt i wymiary, wilgotność (zawartość wody) czy masa tysiąca ziaren, a ponadto ilość i rodzaj zanieczyszczeń, sposób ułożenia warstw i stan jego powierzchni (Marks 2012, PN-73/A-74007).

Zwartość i porowatość są wielkościami komplementarnymi opisującymi wielkość przestrzeni międzyziarnowej (międzyobiektovej) wyrażonej w procentach. W masie ziarna, w zależności od jego jednorodności determinowanej rodzajem, wielkością, wilgotnością, charakterem powierzchni, grubością warstwy i okresem składowania, obserwować można różną gęstość. W miarę wzrostu grubości warstwy ziarna rośnie gęstość mas ziarnowych. Zawartość masy ziarnowej stanowi stosunek sumy objętości zajmowanej przez ziarno do sumy objętości zajmowanej przez ziarno i powietrze, zawarte w przestrzeniach międzyziarnowych. Porowatość jest to stosunek objętości zajmowanej przez powietrze w prze-

strzeniach międzyziarnowych do sumy objętości zajmowanej przez ziarno. Cechy te mają istotne znaczenie przy przedmuchiwanym mas ziarnowych powietrzem, wymianie ciepła i wody oraz przy samozagrzewaniu.

Zjawisko to ma istotny wpływ na:

- własności masy zbożowej,
- charakter procesów w niej zachodzących.

Mniejsza porowatość masy zbożowej będzie wówczas, gdy jest różna wielkość ziaren w mieszance, gdy ziarna mają gładką powierzchnię, są cienkie, wilgotne, oraz gdy w masie zbożowej występują zanieczyszczenia. W dużych komorach porowatość jest mniejsza.

Masa właściwa ziarna jest podstawą do wyciągnięcia pewnych wniosków dotyczących składu chemicznego ziarna, jak również wydajności mąki. Zależy od jego składu chemicznego gdyż poszczególne składniki chemiczne mają zróżnicowane masy właściwe. Największą masą właściwą – 1,458-1,630 g·cm⁻³ charakteryzuje się skrobia. Masa właściwa białek wynosi 1,345 g·cm⁻³ (w tym glutenu 1,242-1,313 g·cm⁻³), a tłuszczu 0,892-0,999 g·cm⁻³.

Im masa właściwa ziarna będzie większa, tym ziarno będzie zawierać więcej skrobi, co znaczy, że uzyska się z niego więcej mąki. Masa właściwa ziarna zależy od dorodności, dojrzałości i od wypełnienia ziarna (Stępniewska i Abramczyk 2011).

Tabela 3.6.1. Gęstość, ciężar objętościowy i masa 1000 ziarn (Jurga 1982, 1992)

Rodzaj ziarna	Gęstość właściwa (kg·m ⁻³)	Gęstość (kg·m ⁻³)	Masa 1000 ziarn (MTZ); (g)
Pszenica	1200-1500	730-850	22-42
Żyto	1200-1500	680-750	13-32
Owies	1200-1400	400-550	20-42
Jęczmień	1300-1400	580-700	31-51
Jęczmień browarny	1300-1400	580-700	35-45
Ryż	1100-1200	440-550	24-31
Kukurydza	1000-1350	680-820	205-341
Proso	800-1200	680-730	6-6,5
Gryka	1230	560-650	–
Ziemiaki	1046-1166	650	35000-193000
Buraki	1050-1150	570-680	150000-3000000

Okrywa ziarna jest nieprzyswajalna przez organizm ludzki i stanowi odpad przy przerobieniu ziarna. Im mniejsza jest zawartość okrywy w ziarnie, tym większa jest jego wartość technologiczna.

Ziarno nazywamy suchym jeżeli zawiera do 15% wilgotności, wilgotnym od 15-17% wilgotności, a powyżej 17% mokrym (Jurga 1982).

W przypadku bulw ziemniaka jako surowca do przetwórstwa, masa właściwa decyduje o ilości i jakości produktów końcowych oraz ilości energii zaangażowanej w proces. Wraz ze wzrostem gęstości bulw, zmniejsza się zapotrzebowanie na energię potrzebną do odparowania wody przy produkcji granulatu, kostki i płatków ziemniaczanych, a także przy produkcji frytek i chipsów. Również konsystencja frytek i chipsów zdeterminowana jest masą właściwą bulw. Półprodukt z bulw o niskiej masie właściwej chłonie podczas smażenia więcej tłuszczu co pogarsza ich jakość, natomiast przy zbyt wysokiej gęstości, frytki są zbyt twarde. Zalecana masa właściwa bulw do produkcji frytek i chipsów wynosi od 1,067 do 1,087 g·cm⁻³. Natomiast wydatek suszy ziemniaczanych zależy wprost proporcjonalnie od masy właściwej bulw (Tab. 3.6.1) (Pałasiński 2005).

Samosortowanie charakteryzuje zjawisko, do którego dochodzi pod wpływem ruchu masy ziarnowej. Przy ładowaniu ziarna do silosów następuje rozdzielanie ziarna na różne frakcje: według wielkości, zdolności przepuszczania powietrza, wilgotności, aktywności enzymatycznej itp. W środku zsypu koncentrują się ziarna cięższe, a w częściach bocznych ziarna lżejsze. Samosortowanie stanowi istotny czynnik przyspieszający występowanie samozagrzewania.

Samorzutne sortowanie się masy ziarna następuje przy napełnianiu i opróżnianiu komór spichrzowych. Poszczególne składniki masy zbóż rozdzielają się i segregują wg:

- masy właściwej,
- wielkości,
- kształtu (Marks 2012).

Masa 1000 ziaren jest podstawowym wskaźnikiem jakości towarowej ziarna zbóż i cechą wyróżniającą odmiany. Odgrywa ważną rolę przy ocenie i doborze materiału siewnego oraz przy jęczmieniu do browaru, a mniejszą przy ocenie technologicznej. Zależy od grubości okrywy, struktury bielma, wielkości ziaren, ewentualnych uszkodzeń i w dużym stopniu od wilgotności ziarna. Im większa jest masa 1000 ziaren, tym ziarna są bardziej dorodne.

Od tej cechy zależy wydajność wielu procesów czy operacji jednostkowych stosowanych przy obróbce surowca, np. decyduje ona o wydajności obłuskiwania ryżu. Wzrasta również wyciąg mąki np. wraz ze wzrostem masy 1000 ziaren z 18,2 g do 41,5 g wyciąg mąki wzrasta o około 5% (Stępniewska i Abramczyk 2011). Jest to związane ze zwiększeniem udziału bielma skrobiowego w ziarnie, np. przy wzroście masy 1000 ziaren z 15,0 do 30,0 g, zawartość skrobiowej części bielma wzrasta z 64 do 80%.

Celność i wyrównanie są to pojęcia, pod którymi rozumie się odpowiednią wielkość i dorodność ziaren. **O wyrównaniu** ziarna mówimy wówczas, gdy partia zboża zawiera duży procent ziaren o tych samych wymiarach. Badanie celności

i wyrównania wykorzystuje się głównie przy ocenie jęczmienia browarnego przeznaczonego na sład oraz przy ocenie zbóż chlebowych pszenicy i żyta. Przy ocenie zbóż kaszowych: jęczmienia na kaszę, owsa na płatki oznacza się tylko wyrównanie. Oznaczenia te wykonuje się za pomocą zestawu sit Vogla o ściśle określonych wymiarach oczek. Próbkę ziarna o masie 100 g wytrząsa się przez 3 min. Przy ocenie jęczmienia browarnego, pszenicy, żyta i pszenżyta używa się zestawu o otworach: 2,8; 2,5 i 2,2 mm, jęczmienia na kaszę – 2,2 mm, owsa na płatki – 2 mm.

Ilość ziarna na I i II sicie wyrażona w procentach stanowi celność ziarna. Wyrównanie jest to udział ziarna na I i II lub II i III sicie, zależnie od tego, gdzie znajduje się większa liczba ziaren i wyrażone jest w procentach. Jęczmień i owies do przetwórstwa na kaszę muszą być wyrównane co najmniej w 85%. Dla jęczmienia browarnego zależnie od klasy wyrównanie wynosi 90% (klasa I) – 75% (klasa III). Wyrównanie ziarna jęczmienia jest jednym z ważnych wyróżników jakości jęczmienia browarnego. Ziarno wyrównane pod względem wielkości równomiernie chłonie wodę w czasie słodowania, ma wyrównaną, niską zawartość białka, lepszą jakość mikrobiologiczną, co w efekcie gwarantuje otrzymanie sładów wysokiej jakości. Ta cecha jakościowa jęczmienia browarnego zależy w dużym stopniu od odmiany (architektura kłosa), również od techniki zbioru, czyszczenia i transportu. W czasie zbioru, czyszczenia i transportu powstają najczęściej uszkodzenia mechaniczne obniżające jakość handlową ziarna. Wyrównanie jęczmienia browarnego wykonuje się wg normy PN-R-74110, natomiast pszenicy wg normy PN-73/A-74007.

Dla bulw ziemniaka stawiane są wymagania wielkościowe zależnie od kierunku ich użytkowania (jadalne wg norm PN-R-74553 oraz PN-R-74450 a ocena jakości ziemniaków wg normy PN-82/R-74456). Wymagania dotyczą wymiaru poprzecznego bulwy, który dla ziemniaka jadalnego nie powinien być mniejszy niż 40 mm, dla bulw na frytki >55 mm, dla bulw na chipsy 40-60 mm, dla bulw na konserwy <30 mm. Ponadto wymagania dotyczą także kształtu bulw, które dla chipsów winny być okrągłe do okrągło-owalnych, na frytki – owalne do podłużnych, jadalne i do przetwórstwa na susze nie wymagają określonego kształtu, mrożone i konserwowe powinny być okrągłe do okrągło-owalnych. Stosunek szerokości do długości bulwy rozmaitego kształtu przedstawia się następująco:

- bulwy okrągło-skrócone powyżej 1: 0,9;
- bulwy okrągłe od 1: 0,9 do 1: 1,2;
- bulwy okrągło-owalne od 1: 1,2 do 1: 1,6;
- bulwy owalne od 1: 1,6 do 1: 2;
- bulwy podłużne powyżej 1: 2.

Należy podkreślić, że nawet u tej samej odmiany występują bulwy różnego kształtu. Bulwy małe przeważnie są bardziej okrągłe, natomiast bulwy duże – bardziej wydłużone. Ponadto dla bulw ziemniaka przy ich przeznaczeniu do prze-

twórstwa brane są pod uwagę także takie cechy jak: głębokość oczek i regularność kształtu. Cechy te decydują o stratach przy obieraniu i wydatku produktu końcowego (frytek, chipsów).

Głębokość oczek określa się zwykle wg skali pięciostopniowej:

- 1) oczka płytkie,
- 2) oczka średnio płytkie,
- 3) oczka średnie,
- 4) oczka średnio głębokie,
- 5) oczka głębokie.

Przy oznaczaniu głębokości osadzenia oczek bierze się pod uwagę oczka boczne, gdyż oczka szczytowe są zawsze głębsze od pozostałych (Świetlikowska 2008, Pałasiński 2005).

Szkliwość i mączystość ziarna bada się głównie przy ocenie jęczmienia oraz pszenicy i oznacza na przekroju poprzecznym ziarna. Jeżeli przekrój jest biały, ziarno określa się jako mączyste. W ziarnach mączystych bielmo jest mało zбите i zawiera dużo skrobi, przy mniejszej zawartości białek, ziarno jest miękkie. Jeżeli przekrój ziarna jest szary z połyskiem to ziarno jest szkliste. W ziarnach takich występuje więcej białka i są one twarde.

Szkliwość uzależniona jest od odmiany zboża, od klimatu i nawożenia. Czynniki te wpływają na mniej lub bardziej zbitą strukturę bielma oraz na jego skład chemiczny, tworząc tzw. szkliwość trwałą. Rozróżnia się również szkliwość przemijającą (pozorną), która uzależniona jest głównie od warunków atmosferycznych przy dojrzewaniu i zbiorze ziarna. Występuje głównie w jęczmieniu a zanika po namoczeniu i powolnym suszeniu ziarna.

Pszenica szklista ma lepszą wartość technologiczną, ponieważ zawiera więcej białek glutenowych, co ma duży wpływ na jej wartość wypiekową. W przypadku jęczmienia browarnego wysoki procent ziaren szklistych nie jest wskazany, natomiast jest korzystny przy produkcji kasz. Pszenica jest szklista, jeżeli zawiera co najmniej 60% ziaren szklistych. Ziarno jęczmienia browarnego winno charakteryzować się niską szkliwością (do 20%) (Jurga 1982).

Zawartość popiołu oznacza zawartości w ziarnie ważnych dla zdrowia składników mineralnych, których najwięcej jest w okrywie owocowo-nasiennej. Mąka pszenna uzyskana z części wewnętrznych, czyli bielma, jest jaśniejsza i zawiera najmniej popiołu. Używana jest do produkcji pieczywa pszennego jasnego oraz cukierniczego. Zawartość popiołu w ziarnie nie powinna przekraczać 1,7% suchej masy. Zazwyczaj ziarna zbóż jarych zawierają więcej popiołu niż ozimych. Dlatego zboża ozime są bardziej cenione przez młynarzy z uwagi na lepszą wartość przemiałową.

Twardość ziarna jest odpornością na działanie sił, czy też wielkość siły niezbędnej do zniszczenia jego struktury wewnętrznej. Głównymi czynnikami kształtującymi twardość ziarna są:

- struktura matrycy białkowej,
- różnice genetyczne,
- czynniki agro-klimatyczne.

Na twardość ziarna wpływa struktura białkowej części bielma, a właściwie różnice w ciągłości matrycy białkowej (ściślejsze – luźniejsze przyleganie składników bielma wpływa na twardość ziarniaka). Różnice w twardości spowodowane są obecnością czynników cementujących pomiędzy białkiem i skrobią (siły adhezji, siły jonowe).

W **pszenicach twardych** matryca białkowa jest ciągła i ściśle przylega do ziarenek skrobi. Z tego powodu oddzielenie skrobi od białka jest trudne. Stąd też stopień uszkodzenia skrobi w czasie przemiału jest większy.

W **pszenicach miękkich** jest odwrotnie. Stopień uszkodzenia skrobi może być mniejszy. Matryca białkowa ma tu strukturę małych fragmentów, między które wtłoczone jest powietrze. Powoduje to „pękanie” ziarna, pod wpływem siły, na fragmenty lub agregaty, na których powierzchni znajdują się ziarna skrobiowe bez ochronnej warstwy białkowej. Ponadto w wolnych przestrzeniach światło ulega rozproszeniu, co daje mączysty wygląd takiego ziarniaka.

Na twardość ziarna najsilniej oddziałuje zawartość wody w ziarnie. Ziarno suche (do 11%) charakteryzuje się stabilną twardością, natomiast ziarno o wilgotności wyższej wykazuje spadek twardości. Składają się na to dwie przyczyny:

- względne zmniejszenie zawartości suchej substancji,
- zmniejszenie siły wiązań pomiędzy skrobią a białkiem i naruszenie struktury ziarna poprzez wytworzenie wewnętrznych naprężeń spowodowanych różnym stopniem pęcznienia poszczególnych składników.

Mąka pszenna o dobrych właściwościach wypiekowych powinna zawierać pewną ilość skrobi uszkodzonej (ok. 10%), która ma wpływ między innymi na wodochłonność mąki, zdolność tworzenia CO₂, strukturę miękiszu i objętość chleba. Nadmierna ilość skrobi uszkodzonej jest niepożądana, gdyż może powodować zwiększenie kleistości miękiszu, zmniejszenie objętości bochenka chleba, czy nadmierne pociemnienie skórki. Mąka o zbyt drobnej granulacji może mieć mechanicznie naruszony układ białkowy, co ma istotny związek z jej przydatnością technologiczną (Stępniewska i Abramczyk 2011).

Na upakowanie składników w komórce duży wpływ mogą również wywierać powtarzające się cykle nawilżania i suszenia.

Hydratacja białek i skrobi powoduje rozluźnienie ich wzajemnych połączeń. Matryca białkowa staje się słabsza i łatwiej zachodzi jej plastyczna deformacja

w czasie przemiału. Tłumaczy to tzw. zmękczenie pszenic w wyniku następujących po sobie okresów deszczowych i słonecznych. Na upakowanie to wpływa również sposób suszenia ziarna po zbiorze.

Znajomość twardości ziarna warunkuje prawidłowy przebieg transportu, czyszczenia i rozdrobienia ziarna, a także decyduje o jego przydatności technologicznej.

Liczba opadania wskazuje poziom enzymów amylolitycznych zawartych w ziarnie. **Wartość niższa niż 150 sekund charakteryzuje się bardzo wysoką aktywnością enzymów amylolitycznych w ziarnie, które nie powinno być używane do produkcji mąki na cele wypiekowe.** Taki poziom liczby opadania wskazuje też, że w ziarnie intensywnie przebiegły procesy życiowe, m.in. oddychanie, w wyniku którego wydzielano się ciepło i woda. Mogą one wpłynąć niekorzystnie na zmiany w masie składowanego ziarna, np. zawilgocenie i wzrost temperatury, które wywołują proces samozagrzewania. Najkorzystniejsza liczba opadania mieści się w granicach 250-350 sekund. **Zbyt wysoka wartość liczby opadania (ponad 400 sekund świadczy o zbyt niskiej aktywności enzymów amylolitycznych).** **Taki stan może również wpływać niekorzystnie na proces wypieku chleba, który nie będzie odpowiednio wyrośnięty** (Grzebisz 2009).

Ilość glutenu poniżej 20% i zawartości białka poniżej 9,5% suchej masy wskazują na przydatność ziarna jedynie do produkcji mąki na niektóre wyroby cukiernicze. Minimalne kryterium przydatności ziarna pszenicy do produkcji mąki na cele chlebowe to ilość glutenu nie mniejsza niż 25% i zawartość białka – co najmniej 11,5% s.m. Ziarno, które może spełniać rolę tzw. poprawiacza w mieszankach przemiałowych z ziarnem o średniej bądź niskiej wartości wypiekowej, powinno zawierać ponad 14% białka i ilość glutenu wyższą niż 30% (Jurga 1992).

Wskaźnik sedymentacyjny Zeleny'ego poniżej 20 cm³ wskazuje, że ziarno stanowi surowiec paszowy. Minimalne kryterium przydatności do użytkowania ziarna jako surowca na mąkę przyjmuje się na poziomie 22 lub 25 cm³. Wartość ponad 30 cm³ pozwala określić przydatność ziarna na cele wypiekowe jako dobrą, a ziarno, które ma spełniać rolę tzw. poprawiacza, powinno wykazywać wartość tego wskaźnika powyżej 40 cm³ (Grzebisz 2009, Świetlikowska 2008).

PISMIENNICTWO

- Gąsiorowski W. (red.), 1995. Owies, chemia technologia. PWRiL Poznań.
 Grzebisz W. (red.), 2009. Produkcja roślinna cz. III. Wyd. Hortpress Sp. z o.o., Warszawa.
 Jurga R., 1982. Przetwórstwo zbóż, podręcznik część 1. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
 Jurga R., 1992. Wartość przemiałowa ziarna pszenicy a wartość wypiekowa mąki pszennej. Wyd. ROD.
 Marks N., 2012. Maszyny do czyszczenia i sortowania płodów rolnych. Kraków. Dostęp on-line: http://ur.krakow.pl/zasoby/7/skrypt-M_d_Cz_i_S_N.pdf.

- Najewski A., Szarzyńska J., 2013. Wartość technologiczna odmian pszenicy. Przegląd zbożowo-młynarski. nr 6.
- Pałasiński M. (red.), 2005. Technologia produkcji węglowodanów. Kraków.
- PN-73/A-74007 "Ziarno zbóż – Oznaczanie gęstości"
- Stępniewska S., Abramczyk D., 2011. Wartość przemiałowa i wypiekowa odmian pszenicy uprawianych w Polsce na podstawie oceny ziarna ze zbiorów lat 2006 –2010. Postępy Nauki i Technologii Przemysłu Rolno-Spożywczego 2011 t.66 nr 390.
- Świetlikowska K., 2008. Surowce spożywcze pochodzenia roślinnego. Wyd. SGGW, Warszawa.

3.7. Wpływ fizycznych właściwości materiałów roślinnych na ograniczanie ich strat ilościowych i jakościowych

Barbara Krzysztofik, Paulina Wrona

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Surowce pochodzenia roślinnego stanowią główną grupę surowców wykorzystywanych w przetwórstwie rolno-spożywczym, przeznaczoną do konsumpcji, na cele przemysłowe i paszowe.

Surowce te dzielimy ze względu na główny składnik jaki w nich przeważa, lub decyduje o wykorzystaniu na:

- surowce węglowodanowe: ziemniaki, buraki, zboża;
- surowce białkowe: groch, fasola, soja;
- surowce oleiste: rzepak, słonecznik, soja;
- oraz takie, w których zawartość niektórych składników chemicznych i walorów smakowych jest istotna dla prawidłowego funkcjonowania organizmów (witaminy, błonnik pokarmowy, pierwiastki mineralne itp.): warzywa, owoce, przyprawy.

Termin właściwości fizyczne jest powszechnie stosowany, kiedy opisywane są te właściwości, które określone mogą być tylko fizycznymi metodami pomiaru bez niszczenia ich struktury chemicznej i składu materiału. W poszczególnych branżach przemysłu spożywczego powstała o nich bogata i wciąż rozszerzająca się wiedza, która poza zastosowaniami na polu wyanalizacji, wykorzystywana jest również w pracach naukowo-badawczych i projektowych, w tworzeniu modeli operacji i procesów przetwórstwa, obejmującym obróbkę surowców, utrwalanie (konserwację), kontrolę produkcji, transport i przechowywanie oraz inne.

W miarę jak przetwórstwo surowców rolniczych zamieniało się w coraz bardziej skomplikowany przemysł, stawało się oczywiste, że nie jest możliwe racjonalne projektowanie procesów technologicznych oraz maszyn i aparatów bez gruntownej znajomości właściwości surowca, który poddawany jest przetwarzaniu (Haman 2006).

Zbiór właściwości (cech) fizycznych (physical, engineering properties) obejmuje następujące grupy właściwości:

- geometryczne,
- właściwości masowe (gęstość, ciężar objętościowy, ciężar usypowy),
- właściwości powierzchniowe,
- właściwości aerodynamiczne,
- sprężystość i inne cechy wytrzymałościowe,

- elektryczne,
- optyczne,
- właściwości hydrodynamiczne,
- magnetyczne,
- cieplne,
- akustyczne.

Właściwości (cechy) geometryczne – są to cechy mierzalne cząstek będących bryłami mniej lub bardziej foremnymi, do których zaliczono: długość jako wymiar największy, szerokość jako wymiar pośredni, grubość jako wymiar najmniejszy, objętość, powierzchnia zewnętrzna, sferyczność wyrażana stosunkiem długości do grubości oraz szerokości do grubości określające w pewnym stopniu, również kształt nasion, bulw ziemniaka oraz stosunek objętości do powierzchni zewnętrznej. Dla brył nieforemnych stosuje się wymiary zastępcze jak średnica zastępcza, średnica Fereta, objętość zastępcza. Cechy te wykorzystuje się w maszynach czyszczących i sortujących dostosowując odpowiedni wymiar lub kształt do wymiaru lub kształtu oczek sita. Właściwości te mają również wpływ na właściwości aerodynamiczne nasion, są parametrami branymi pod uwagę jako cechy technologiczne. Znajomość kształtu oraz wymiarów ziarna i nasion ma znaczenie w technologii czyszczenia i sortowania, w transporcie pneumatycznym, oraz w pewnym stopniu jest wyrazem stosunku ilościowego bielma lub liścieni do innych części anatomicznych i informuje o jego wartości przerobowej. Natomiast dla bulw ziemniaka decyduje o ich przeznaczeniu na określone cele spożywcze takie jak frytki, chipsy, ziemniaki jadalne czy konserwowe (Tab. 3.7.1).

Charakterystyki (właściwości) masowe – są to charakterystyki określane dla próbek o dużej liczebności cząstek (nasion), do których zaliczono gęstość czyli ciężar właściwy, gęstość usypową (usypną), która określa masę objętościową luźno usypanego materiału w $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, gęstość pozorną (w stanie utrzęsionym) wyrażoną w $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, masę 1000 nasion, porowatość, którą określa się procentowo jako suma wolnych przestrzeni/porów/ pomiędzy cząstkami w danej objętości luźno usypanych cząstek/nasion/ w całości lub rozdrobnionych. Właściwości te wykorzystano w procesach czyszczenia i sortowania materiałów sypkich, do oceny podatności materiału na zagęszczanie w transporcie i magazynowaniu oraz w procesach granulowania, brykietowania i ekstruzji, do projektowania pojemności magazynowych, w procesach mieszania i suszenia pneumatycznego, na wibracyjnych stołach sortujących, jako cechy kwalifikujące surowiec do przetwórstwa (buraki, ziemniaki).

Tabela 3.7.1. Właściwości geometryczne wybranych gatunków surowców roślinnych (Jurga 1982, Karwowski 1982)

Roślina	Wymiary liniowe (mm)			Objętość V (mm ³)	Pole powierzchni zewewnętrznej F (mm ²)	Stosunek V/F (mm)
	Długość l	Szerokość a	Wysokość b			
Pszenica	4,2-8,6	1,6-4,0	1,5-3,8	19-42	40-75	0,49-0,64
Żyto	5,0-10,0	1,4-3,6	1,2-3,5	10-30	30-45	0,28-0,42
Pszenżyto	5,5-9,5	1,5-3,8	1,4-3,6	12-33	30-50	0,33-0,52
Jęczmień	7,0-14,6	2,0-5,0	1,4-4,5	20-40	35-60	0,45-0,65
Owies	8,0-16,6	1,4-4,0	1,2-3,6	19-36	30-65	0,36-0,54
Ryż	5,0-12,0	2,5-4,3	1,2-2,8	12-35	30-55	0,35-0,60
Kukurydza	5,5-13,5	5,0-11,5	2,5-8,0	140-260	80-145	0,70-0,90
Proso	1,8-3,2	1,2-3,0	1,0-2,2	5-6	10-18	0,70-0,80
Sorgo	2,6-5,8	2,4-5,6	2,0-5,0	50-85	60-95	0,75-0,85
Gryka	4,4-8,0	3,0-5,2	2,0-4,2	9-20	30-55	0,50-0,70
Groch	4,0-10,0	3,7-10,0	3,5-10,0	114-320	150-270	0,80-0,95
Ziemniaki	49-186	39-82	31-65	30000-250000	–	–
Buraki	100-350	Średnica główki w miejscu odcięcia				30-160

Cechy powierzchniowe (tekstura) – oznaczają określoną cechę powierzchni obiektu lub wrażenie, które odczuwa się organoleptycznie. Mogą to również być charakterystyczne dla danego obiektu wzory lub ukształtowanie jego powierzchni. W praktycznym zastosowaniu używa się dwóch cech a mianowicie:

- higroskopijność i zdolność do wytwarzania śluzowej otoczki;
- chropowatość powierzchni, a w związku z tym zdolność do zatrzymywania na niej różnych sproszkowanych materiałów, którą można przedstawić przy pomocy współczynnika przyczepności cząstki danego materiału.

Cecha ta uważana jest za klasyfikującą dla ziemniaka jadalnego oraz jęczmienia browarnego, dla których to surowców wymaga się skórki gładkiej, cienkiej, bez zagłębień.

Higroskopijność może być podstawową cechą np. rozdzielczą, częściej jednak wykorzystywana jest jako cecha uzupełniająca w procesie oklejania nasion proszkiem ferromagnetycznym i dalszej ich obróbce w polu magnetycznym. Cechy te wykorzystano w separatorach magnetycznych do rozdzielania mieszanin różniących się tylko tymi cechami (wszystkie inne cechy są podobne).

Właściwości aerodynamiczne – opisują zachowanie się materiału ziarnistego w pionowym, ukośnym i poziomym strumieniu powietrza. Scharakteryzowane są zwykle trzema wskaźnikami to jest prędkością krytyczną, współczynnikiem oporu i współczynnikiem lotności. Właściwości aerodynamiczne wykorzystuje się w maszynach czyszczących prostych i złożonych, klasyfikatorach pneumatycz-

nych, mieszarkach i suszarkach pneumatycznych oraz w transporcie pneumatycznym (Marks 2012).

Prędkość krytyczna jest to taka prędkość pionowego strumienia powietrza, która zapewnia uzyskanie stanu równowagi pomiędzy ciężarem cząstki a siłą podmuchu strumienia powietrza, czego efektem jest utrzymywanie cząstki w stanie zawieszonym. Na wartość tej cechy mają wpływ: kształt cząstki, zależność pomiędzy ciężarem a powierzchnią przekroju poprzecznego cząstki oraz jej tekstura decydująca o tarciu w strumieniu powietrza. Innymi słowy cząstka znajdująca się w strumieniu powietrza (gazu) podlega działaniu siły ciężkości oraz ciśnieniu wywieranemu przez powietrze (gaz) na jej powierzchnię. W stanie równowagi tych sił cząstka jest zawieszona w powietrzu, a prędkość powietrza (gazu), przy której taki stan występuje nazywa się prędkością krytyczną lub prędkością unoszenia.

Lotność jest to zdolność cząstki do stawiania oporu strumieniowi powietrza. Cechy te wykorzystuje się w klasyfikacji pneumatycznej.

Współczynnik oporu (CD) – jest to bezwymiarowy współczynnik, zależny od kształtu, kątovej orientacji opadającej cząstki względem kierunku ruchu i liczby Reynoldsa (Re). W szerokim zakresie liczb Reynoldsa współczynnik ten jest wartością stałą. Dla kuli wynosi około 0,45. Mniejsze współczynniki mają cząstki owalne/ jajowate/ ułożone osią długą równoległą do kierunku spadania a większe ułożone osią długą prostopadłą do kierunku spadania.

Sypkość masy ziarna – zależy od stanu głównego składnika ziarna, masy złożowej, a także od jego ilości i ilości domieszek. Jest to ruch masy ziarna pod wpływem własnego ciężaru. Jednym ze wskaźników sypkości jest kąt naturalnego nachylenia jaki tworzy masa ziarna z płaską powierzchnią. Im kąt jest większy tym mniejszą sypkością charakteryzuje się ziarno. Wartość kąta naturalnego nachylenia zależy od takich czynników, jak: wielkość, kształt, wilgotność ziarna oraz ilość zanieczyszczeń. Proces samozagrzewania szczególnie istotnie wpływa na wartość tego wskaźnika. Przy zalecanych do przechowywania ziarna warunkach wilgotnościowych kąt ten wynosi 2-6°, przy podwyższonej wilgotności jego wartość wzrasta do 7-11°, a przy samozagrzaniu kąt ten może dochodzić do 90°, co może powodować powstanie tzw. ściany z ziarna.

Jest to cecha szczególnie ważna przy mieszaniu (transporcie) i magazynowaniu ziarna. Sypkość ziarna wyrażana jest tzw. kątem naturalnej sypkości (kątem spadu) i kątem tarcia.

Kąt zależy od kształtu ziarna, struktury jego powierzchni i składu chemicznego (szczególnie zawartości wody), ze wzrostem wilgotności wzrasta kąt.

Kąt naturalnej sypkości – kąt, jaki tworzy się pomiędzy podstawą, a tworzącą się stożką przy swobodnym spadaniu ziarna na poziomą płaszczyznę. W procesach transportu, składowania i przetwarzania ziarna zbóż duże znaczenie ma także właściwość masy ziarna określana jako sypkość. Zależy ona od właściwości

i stanu głównego składnika mieszaniny oraz ilości i rodzaju zanieczyszczeń. Cecha ta ma znaczenie w obliczeniach magazynów, zwłaszcza lejów wysypowych w komorach silosowych oraz przy przemieszczaniu ziarna w rurach spustowych. Sypkość ziarna wyraża się kątem naturalnego zsypu oraz kątem naturalnego usypu. Natomiast kąt naturalnego usypu i zsypu ściśle związany jest z tarciem wewnętrznym i zewnętrznym.

Kolejnym wskaźnikiem sypkości ziarna jest minimalny kąt samozsypu.

Kąt tarcia – najmniejszy kąt nachylenia płaszczyzny, przy którym ziarno zaczyna się samorzutnie staczać. Tangens tego kąta nazywa się współczynnikiem tarcia. Zróżnicowana wartość tego kąta dla danego gatunku ziarna jest wskaźnikiem jego wilgotności i czystości. Tarcie jest zjawiskiem fizycznym towarzyszącym przemieszczaniu się względem siebie dwóch ciał (tarcie zewnętrzne) lub elementów tego samego ciała (tarcie wewnętrzne), powodujących rozpraszanie energii podczas ruchu. Tarcie zewnętrzne występuje na granicy dwóch ciał stałych a tarcie wewnętrzne przy przepływie płynów jak i deformacji ciał stałych. Siła tu występująca nazywana jest siłą tarcia. Tarcie wewnętrzne zależy od właściwości samych ziaren i od struktury ich upakowania w ośrodku. Szorstkość i falistość powierzchni, kształt i wymiary ziaren oraz ich odkształcalność to właściwości, które najbardziej wpływają na kąt tarcia wewnętrznego. Właściwości te modyfikowane są przez gatunek i odmianę, a przede wszystkim przez wilgotność.

Pod względem ruchliwości poszczególnych cząstek dzielimy materiały sypkie na samozsypujące się i nie zsypujące się samoczynnie. Dla przeważającej większości materiałów kąt zsypu naturalnego zależy od wilgotności i zwiększa się z jej wzrostem (Tab. 3.7.2). Tarcie i jego współczynnik wykorzystano w takich maszynach jak: rozdzielacze kaskadowe, żmijka, płótniarka, rozdzielacz tarczowy, rozdzielacz cylindryczny, rozdzielacz bębnowy, rozdzielacze wibracyjno-tarciowe.

Sprężystość materiałów – jest to właściwość fizyczna opisująca zdolność materiału do powrotu do pierwotnego kształtu i pierwotnych wymiarów po zredukowaniu siły powodującej jego odkształcenie pod warunkiem że siła nie przekracza granicy sprężystości tego materiału. Teoretycznie materiały (ciała) można podzielić na: absolutnie sprężyste, absolutnie plastyczne oraz elasto-plastyczne. Materiały biologiczne są materiałami w różnym stopniu elasto-plastycznymi oraz anizotropowymi pod względem różnych swoich właściwości. Właściwości sprężyste określa się zwykle modułem sprężystości. Dla ziarnistych materiałów biologicznych trudno jest określić moduł sprężystości, stąd przyjęto aby właściwości sprężyste takich materiałów charakteryzować współczynnikiem restytucji energii kinetycznej. Właściwość tą wykorzystano przy separacji nasion, ziemniaków, cebuli, owoców i jagód na stołach sortujących i separatorach młocarni.

Tabela 3.7.2. Wybrane właściwości fizyczne ziarna (Jurga 1982)

Roślina	Kąt naturalnej sypkości (^o)	Średnia prędkość unoszenia (m·s ⁻¹)	Porowatość (%)
Żyto	23-38	8,4-9,9	35-45
Pszenica	23-38	8,9-11,5	35-45
Jęczmień	28-45	8,4-10,8	45-55
Owies	34-54	8,1-9,1	50-70
Ryż	37-45	–	50-65
Kukurydza	30-40	12,5-14,0	35-55
Proso	20-25	9,8-11,8	30-50
Gryka	–	3,5-6,0	50-60
Groch	22-28	–	–
Len	27-34	–	35-45
Słonecznik	31-45	–	60-80

Właściwości reologiczne – to grupa właściwości mechanicznych obejmująca lepkie płynięcie materiałów i związanych z nim pełzaniem oraz relaksacją. **Lepkość ciał stałych** – objawia się sprężystością opóźnioną, polegającą na tym, że odkształcenie odpowiadające danemu naprężeniu nie występuje natychmiast w lepkim materiale sprężysto-plastycznym, lecz po upływie określonego czasu. Również przy odciążeniu odwracalne odkształcenie sprężyste nie znika natychmiast, lecz maleje stopniowo z upływem czasu.

Granica sprężystości – jest to największe naprężenie, po ustąpieniu którego ustąpi również odkształcenie. Odkształcenie jest liniową funkcją naprężenia.

Granica płynności biologicznej – jest to naprężenie, po przekroczeniu którego następuje dalsze odkształcenie bez wzrostu naprężenia, a nawet przy jego niewielkim zmniejszeniu. W materiałach biologicznych punkt ten odpowiada początkowi procesu niszczenia komórek.

Granica wytrzymałości biologicznej – to wartość przy której następuje rozerwanie (zniszczenie) próbki. Odpowiada to np. pęknięciu ziarna, przebiciu skórki lub okrywy owocowej. Następuje tu zniszczenie makrostruktury, które może wystąpić natychmiast po przekroczeniu tej granicy lub przy stałym naprężeniu po dłuższym czasie płynięcia materiału.

Plastyczność materiałów – objawia się po przekroczeniu granicy sprężystości i oznacza odkształcenie trwałe (nieodwracalne). Próbką w takim przypadku nie powróci do pierwotnego kształtu i wymiarów.

Relaksacja materiału – to redukcja naprężeń, które powstały w materiale w czasie jego odkształcania na które składają się relaksacja natychmiastowa (sprężysta), a następnie płynięcie materiału. Po dostatecznie długim czasie mate-

riał przestaje relaksować, a niezrelaksowana część odkształcenia wyznacza odkształcenie trwałe.

Pełzanie – to zjawisko polegające na powolnym wzroście odkształcenia materiału poddanego stałemu naprężeniu. Krzywa pełzania składa się z odkształcenia natychmiastowego (sprężystego) a następnie obserwuje się odkształcenie plastyczne i lepkie.

Odształcenie sprężyste – polega na tym, że po odciążeniu materiał wraca do pierwotnych wymiarów i kształtu. Przy obciążeniu liniowym mamy tu do czynienia z odkształceniem względnym liniowym, odkształceniem względnym poprzecznym i odkształceniem względnym objętościowym.

Odształcenie plastyczne – polega na zniszczeniu i przemieszczaniu się względem siebie cząsteczek, grup cząsteczek i całych struktur materiału pod działaniem siły. Jest to odkształcenie trwałe. Mamy tu do czynienia z ciałami plastycznymi i kruchymi.

Odształcenie lepkie – polega na przemieszczaniu się względem siebie części materiału przy obecności wody pod wpływem przyłożonej siły. Woda działa tu jak smar i ułatwia przemieszczanie się względem siebie struktur krystalicznych lub grup bezpostaciowych. Materiał pod wpływem siły zaczyna płynąć a zatem zdolność materiału do płynięcia jest funkcją jego wilgotności. Wiele materiałów biologicznych wykazuje właściwości charakterystyczne zarówno dla ciał sprężystych jak i cieczy. Nazywane są one ciałami lepko-sprężystymi. Właściwości reologiczne wykorzystuje się w szeregu procesach związanych z rozdrabnianiem materiałów (Domian i Milczarski 2003).

Właściwości optyczne – określane są zdolnością absorpcyjną ciała. Zdolność absorpcyjna ciała jest wielkością fizyczną charakteryzującą stopień pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego przez to ciało. Określa ją stosunek strumienia energii promieniowania pochłoniętego przez dane ciało do strumienia padającego na nie. Jej wartość zależy od częstotliwości promieniowania.

Ciała ze względu na ich właściwości optyczne dzielimy na: doskonale czarne, szare, doskonale białe, zwierciadlane, przezroczyste i nieprzezroczyste. Właściwości te wykorzystano w separacji produktów i surowców takich jak: nasiona roślin uprawnych, orzeszki ziemne, kawa, pomidory, owoce cytrusowe, jabłka, według koloru (barwy).

Właściwości hydrodynamiczne – są to cechy ciała stałego, od których zależy jego ruch i równowaga pod wpływem sił związanych z przepływem otaczającej je wody lub innej cieczy. Do tych cech należą te, które składają się na właściwości geometryczne, charakterystyki masowe, teksturę. Właściwości te opisują wskaźniki podobne do tych, które opisują właściwości aerodynamiczne. Właściwości te wykorzystano w procesach separacji wodnej, myciu i czyszczeniu oraz transporcie wodnym materiałów i surowców.

Właściwości elektryczne materiałów ziarnistych – opisują zachowanie się cząstek w polu elektrycznym, wśród których można wyróżnić: przewodnictwo, przenikalność dielektryczną, zdolność do polaryzacji i przyjmowania lub oddawania ładunków. Właściwości te wykorzystano w separatorach elektrycznych.

Właściwości elektryczne materiału biologicznego – dla ziarna określane są za pomocą następujących wielkości fizycznych:

- rezystancja,
- pojemność elektryczna,
- przenikalność elektryczna,
- współczynnik strat dielektrycznych,
- konduktywność.

Wielkości te związane są z czynnikami fizycznymi (wilgotność ziarna i jego temperatura, wymiary i kształt nasion, masa, tekstura) oraz czynnikami chemicznymi (zawartość wody związanej chemicznie i skład chemiczny materiału). Otrzymane z pomiarów wartości uzależnione są od tego, czy dotyczą pojedynczych ziaren, czy ziarna w masie. Innym parametrem opisującym właściwości elektryczne nasion jest współczynnik strat dielektrycznych. Jest on rzeczywistym obrazem strat zachodzących w dielektrykach. Tangens kąta stratności zależy od częstotliwości, wilgotności i temperatury. Zarówno rezystancja, jak i rezystywność ziarniaków maleją przy wzroście temperatury, podobnie jak w ciałach będących na pograniczu dielektryków i półprzewodników. Rezystancja ziarniaków zbóż zależy silnie od wilgotności. Jednocześnie ze wzrostem wilgotności rezystancja maleje.

Wartość rezystancji ziarniaka zależy również od natężenia pola elektrycznego. Przy wzroście natężenia pola elektrycznego rezystancja zmniejsza się i ma w przybliżeniu charakter liniowy. Zmniejszenie rezystancji ziarniaka jednocześnie ze wzrostem natężenia pola elektrycznego może sugerować, że wywołane polem siły strykcyjne mają charakter sił ściskających. Efekt tych sił, w postaci spadku rezystancji, rośnie jednocześnie ze zmniejszeniem wilgotności ziarniaka. Spowodowane to może być wzrostem naprężeń. Przy większych wilgotnościach ziarno staje się plastyczne i siły strykcyjne mogą wywołać deformację jego cząstek wewnętrznych, nie powodując naprężeń mechanicznych.

Bardzo duży wpływ na rezystancję nasion ma wilgotność. Jednocześnie ze wzrostem wilgotności rezystancja maleje zaś – ze wzrostem natężenia rezystancja maleje. Można to wytłumaczyć pojawianiem się w ziarnie, w miarę wzrostu natężenia pola elektrycznego, prądu elektronowego. Wpływ ten zarysowuje się szczególnie dla nasion o dużej wilgotności, ($w > 15\%$), kiedy przechodzą w stan półprzewodnikowy.

Przewodnictwo cieplne – jest jedną z ważnych cech mas ziarnowych. Zależy ono od ilości powietrza zawartego w przestrzeniach międzyziarnowych. Niski współczynnik przewodnictwa cieplnego powietrza powoduje, że w przypadku mas ziarnowych charakteryzujących się dużą porowatością współczynnik przewodnictwa cieplnego tych mas jest równie niski. Wzrost wilgotności ziarna powoduje wzrost przewodnictwa cieplnego mas ziarna. Zjawisko to jest skutkiem wysokiego przewodnictwa cieplnego wody. Niskie przewodnictwo w zasadzie jest zjawiskiem wysoce niekorzystnym z punktu widzenia przechowalnictwa. Długie utrzymywanie przez ziarno wysokich temperatur powoduje intensyfikację procesów fizjologicznych prowadzących do pogorszenia jakości ziarna. Lokalne podwyższenie temperatury masy ziarna wywołane aktywnością mikroorganizmów, któremu sprzyja słabe przewodnictwo cieplne ziarna, może prowadzić do samozapłonu zboża. Niskie wartości współczynnika przewodzenia ciepła masy zbożowej z drugiej strony pozwalają na efektywne stosowanie chłodnej metody przechowywania. Metoda ta polega na przechowywaniu zboża w temperaturach ujemnych. Załadowanie zboża do silosu przy ujemnych temperaturach otoczenia powoduje jego wychłodzenie nawet do -12°C . Wraz ze wzrostem temperatury otoczenia, temperatura ziarna w silosie nieznacznie wzrasta (w lipcu może jeszcze przyjmować wartości ujemne).

Ciepło właściwe lub pojemność ciepła masy ziarna – zależą od zawartości wody w ziarnie. Pochodną ciepła właściwego i przewodnictwa cieplnego jest dyfuzyjność cieplna określona współczynnikiem temperatury przewodnictwa, czyli stosunkiem przewodnictwa cieplnego właściwego określonego materiału do jego objętościowego ciepła właściwego. Wartość dyfuzyjności cieplnej mas ziarnowych zmienia się wraz z zawartością wilgoci. Osiągając maksymalną wartość przy 10-20% zawartości wilgoci.

Sorpcja – to zdolność masy ziarnowej wynikająca ze składu chemicznego ziarna oraz jego dużej powierzchni właściwej do chłonięcia par i gazów. Pojęcie to obejmuje szereg zjawisk, takich jak: adsorpcja, kondensacja kapilarna, chemisorpcja, desorpcja. Ziarno zbóż jest materiałem silnie porowatym, o strukturze drobnokapilarnej i charakterze biokoloidalnym. W skład ziarna wchodzi elementy o właściwościach hydrofilowych i wysokiej zdolności wiązania wody, takie jak białka i polisacharydy. Substancje te zawierają w swojej strukturze cząsteczkowej różne grupy aktywne, mające rezerwę energii wystarczającą do interakcji z cząsteczkami wody. Wokół aktywnych miejsc sorpcji może gromadzić się wiele cząsteczek wody aż do kondensacji w mikrokapilarach. Dzięki licznym mikro- i makroporom aktywna powierzchnia ziarna jest nawet 200 tysięcy razy większa niż jego powierzchnia rzeczywista. Daje to bardzo dużą powierzchnię kontaktu ziarna z otaczającą atmosferą. Możliwość chłonięcia wody w postaci pary ze środowiska i jej utrzymania przez składniki ziarna zależy od prężności pary wodnej

w środowisku. Jeżeli w pewnej ustalonej temperaturze prężność pary wodnej w powietrzu otaczającym ziarno jest większa od prężności pary wodnej na powierzchni ziarna, to ziarno chłonie wodę z otoczenia, ulegając nawilżeniu (adsorpcja). W sytuacji odwrotnej ziarno oddaje wodę do otoczenia i suszy się (desorpcja). Wówczas gdy prężność pary wodnej w otaczającym powietrzu jest równa prężności pary na powierzchni ziarna, tyle samo cząstek wody przenika z otoczenia do ziarna, ile z ziarna do otoczenia. Stan ten nazywa się stanem równowagi, który pomiędzy zawartością wody w ziarnie i warunkami panującymi w otaczającym powietrzu przedstawia się za pomocą izotermy sorpcji wody. Wyraża ona siłę związania wody z wilgotnym materiałem, gdy zawartość wody jest na pewnym poziomie. Aktywność wody jest miarą tego związku. Izotermy sorpcji zbóż mają kształt sigmoidalny, charakterystyczny dla materiałów hydrofilowych. W badaniach nad zjawiskiem sorpcji pary wodnej przez ziarno pszenicy wykazano, że w temp. 20°C i aktywności wody równej 0,2 dochodzi do zmian właściwości reologicznych ziarna ze sprężystych w sprężysto-plastyczne. Zaś przy aktywności wody równej 0,7 dochodzi do zmian gęstości ziarna i szklistości jego bielma.

Zjawisko sorpcji dotyczy również pochłaniania z otoczenia różnych gazów (CO₂, NH₃, N₂, fenol, fumiganty). Zjawisko pochłaniania zachodzi bardzo szybko natomiast zjawisko desorpcji bardzo powoli. Przy adsorpcji np. fumigantów dochodzi zjawisko chemisorpcji, które uniemożliwia usunięcie tych cząstek z masy ziarna. Ziarno rozdrobnione, uszkodzone ma większe zdolności sorpcyjne poprzez wzrost powierzchni sorpcji, zaś zaabsorbowana para wodna może wejść w reakcje ze składnikami ziarna (chemisorpcja), tworząc wodę krystalizacyjną, wodę hydratacyjną, wodę związaną koloidalnie itp. Poza chemisorpcją ziarno jest zdolne do wiązania wody poprzez kondensację kapilarną, co powoduje wzrost wilgotności ziarna. Określonej aktywności wody przy desorpcji odpowiada zawsze większa niż przy adsorpcji zawartość wody. Zjawisko to odgrywa istotną rolę w kształtowaniu trwałości przechowalniczej mas ziarnowych. Wzrost temperatury przy stałej zawartości wody powoduje zwiększenie jej aktywności, która determinuje trwałość przechowalniczą.

Właściwości sorpcyjne ziarna uzależnione są od jego gatunku, odmiany, stopnia dojrzałości i wykształcenia. Ziarna zawierające duże ilości białka, słabo wykształcone (mało dorodne lub uszkodzone) wykazują znaczną zdolność sorpcyjną. Również poszczególne części anatomiczne ziarniaka charakteryzują się zróżnicowaniem pod względem właściwości sorpcyjnych. W stosunku do innych części ziarna zarodek najsilniej chłonie wodę. Różnice w zdolności sorpcyjnej poszczególnych części anatomicznych ziarniaków, a także zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi ziarniakami i ich zespołami, prowadzą do niejednolitego nawilgocenia i powstawania warunków powodujących psucie się mas ziarnowych.

Z punktu widzenia przechowalnictwa nie należy mieszać ziarna zimnego z cieplejszym, gdyż zachodzi zjawisko termodyfuzji pary wodnej, wywołane gradientem temperatur. Ciepłe ziarno w zetknięciu z zimnym może powodować wytrącenie się pary wodnej na powierzchni ziarna (Marks 2012).

PIŚMIENNICTWO

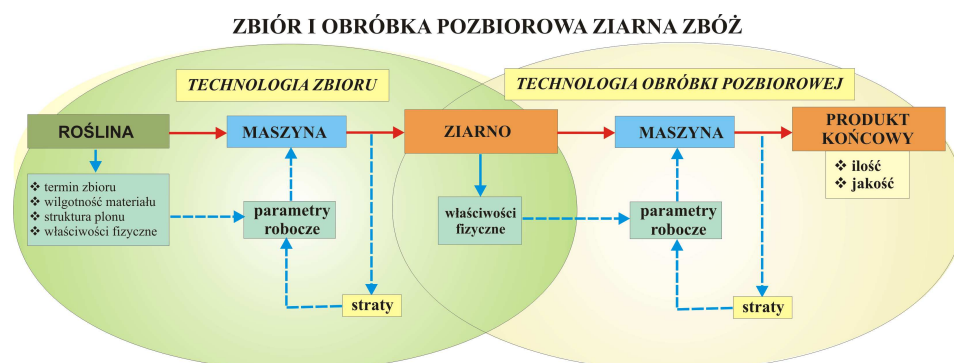
- Haman J., 2006. Od maszynoznawstwa do bioinżynierii, czyli 35-lecie Wydziału Inżynierii Produkcji AR w Lublinie. *Inżynieria Rolnicza*, 5(80), 7-14.
- Domian E., Milczarski Ł., 2003. Właściwości płynięcia wybranych spożywczych materiałów sypkich. *Technologia Alimentaria* 2(2) s. 37-46. ACTA Scientiarum Polonorum.
- Jurga R., 1982. Przetwórstwo zbóż, podręcznik część 1. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne.
- Karwowski T., 1982. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych cz II. PWRiL. Warszawa.
- Marks N., 2012. Maszyny do czyszczenia i sortowania płodów rolnych. Kraków. Dostęp on-line: http://ur.krakow.pl/zasoby/7/skrypt-M_d_Cz_i_S_N.pdf.

3.8. Właściwości mechaniczne ziarna zbóż

Jarosław Frączek, Zbigniew Ślipek

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Ziarno zbóż stanowi najważniejszy element żywieniowy ludzi i zwierząt hodowlanych oraz wykorzystywane jest jako surowiec przemysłowy. Racjonalne projektowanie technologii zbioru i przetwórstwa zbóż wymaga dokładnej znajomości procesów roboczych, w szczególności określenia relacji między maszyną a rośliną. W większości maszyn rolniczych i przetwórczych podstawową funkcją elementów roboczych są oddziaływania mechaniczne, zróżnicowane co do formy i intensywności. System produkcyjny ziarna zbóż obejmuje dwa zasadnicze etapy technologiczne – zbiór oraz obróbkę pozbiorową. Przedstawia to rysunek 4.8.1.



Rys. 3.8.1. Znaczenie właściwości fizycznych materiału w systemie zbioru i obróbki pozbiorowej ziarna zbóż (opracowanie własne)

Dla każdego etapu, zasadniczym elementem jest zawsze maszyna, która obrabia materiał roślinny. Podstawowym wymogiem w procesie zbioru mechanicznego jest uzyskanie wysokiej jakości ziarna przy ograniczeniu do minimum strat ilościowych. Nie trzeba uzasadniać, że aby ten wymóg spełnić, należy znać stan zboża „na wejściu” maszyny (m. in. wilgotność, stopień dojrzałości ziarna, jego właściwości mechaniczne, cechy geometryczne) oraz „na wyjściu”, poprzez ocenę strat ilościowych oraz jakościowych (stopień uszkodzenia ziarna, jego zdolność kiełkowania i in.). Ten stan zboża (ziarna) determinuje w dużym stopniu parametry robocze kombajnu zbożowego. W kolejnym etapie (Rys. 3.8.1) ziarno podlega procesom obróbki pozbiorowej, z których najważniejsze to: transport,

czyszczenie, suszenie, magazynowanie, rozdrabnianie na cele paszowe, przemiał. W każdym z wymienionych wyżej procesów, dla zapewnienia właściwej jakości produktu końcowego, niezbędna jest znajomość właściwości fizycznych, w tym cech mechanicznych ziarna. Właściwości te w dużym stopniu wpływają na dobór maszyn i urządzeń oraz na optymalizację ich parametrów roboczych. Znajomość cech mechanicznych ziarna pozwala także na podejmowanie właściwych decyzji o przeznaczeniu określonej partii ziarna do przetwórstwa na określone cele. Wskazując na znaczenie w procesach technologicznych znajomości wielu cech mechanicznych ziarna, nie sposób pominąć cech geometrycznych – zarówno w aspekcie zastosowań w procesach roboczych, jak również przy charakterystykach laboratoryjnych materiału.

Analiza badań nad właściwościami mechanicznymi ziarna pozwala na wyłonienie dwóch, wyraźnie rozdzielonych kierunków. Pierwszy z nich oparty jest na pomiarach wykonywanych na pojedynczych nasionach, drugi zaś na badaniach masy ziarnistej. Większość ze stosowanych sposobów pomiaru stosowanych w tego typu badaniach ma swe źródło w metodach, stosowanych przy badaniu materiałów konstrukcyjnych. O ile jednak w klasycznych badaniach tych materiałów występuje pełna spójność i jednoznaczność stosowanego nazewnictwa, o tyle w badaniach roślinnych materiałów ziarnistych daje się zaobserwować pewne uproszczenia oraz stosowanie pojęć i wielkości umownych, często nieadekwatnych do opisywanych właściwości.

Jedną z głównych właściwości mechanicznych ziarna zbóż jest jego wytrzymałość. Przy ocenie tej właściwości stosuje się rozmaite metody, które można podzielić na pośrednie i bezpośrednie. Ocena pośrednia wytrzymałości, a właściwie odporności na uszkodzenia mechaniczne polega na ocenie uszkodzeń powodowanych przez zadane obciążenie (statyczne lub dynamiczne). Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ten sposób można wykorzystać jedynie do porównań między odmianami, czy też między gatunkami. Dodatkowo, mogą one służyć do oceny jakości pracy danego systemu technicznego z punktu widzenia uzyskania wysokiej jakości ziarna – problem szczególnie istotny przy produkcji nasiennej lub przy przeznaczaniu ziarna na cele przemiałowe, przechowalnicze. Metody pośrednie są mało przydatne z punktu widzenia utworzenia jednolitej teorii wytrzymałościowej ziarna.

Bezpośrednie metody oceny wytrzymałości pojedynczego ziarna bazują na pomiarze odkształcenia i naprężenia oraz wyznaczeniu na tej podstawie stałych materiałowych. Ten sposób określania wytrzymałości ziarna jest uniwersalny i daje możliwości wykorzystania wyników badań do utworzenia opisu fizycznego niszczenia materiału ziarna. Wytrzymałość pojedynczych ziaren można opisać na podstawie pomiarów sprężystości oraz twardości materiału.

Do oceny cech wytrzymałościowych ziarna w masie stosuje się różnego rodzaju metody technologiczne, wykazujące dobre zazwyczaj powiązania z procesami rozdrabniania ziarna. Mogą one mieć także stosowane do charakterystyki wartości przemiałowej ziaren (Dziki i Laskowski 2008).

Mając na uwadze dużą różnorodność właściwości mechanicznych ziarna zbóż, wiele sposobów pomiaru i oceny tych właściwości, w niniejszym opracowaniu ograniczono się do przedstawienia zaledwie kilku najważniejszych i podstawowych wielkości charakteryzujących ziarno pod względem strukturalno-mechanicznym. Są to: kształt oraz właściwości wytrzymałościowe (sprężystość, twardość) ziarna.

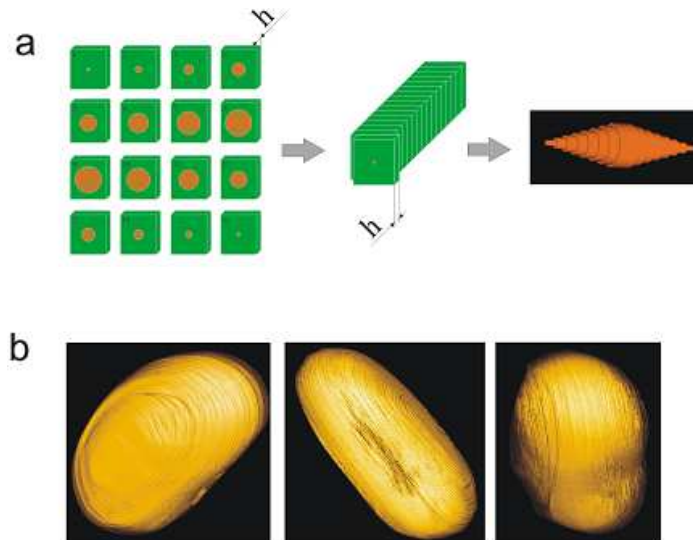
Modelowanie kształtu ziarna

Ziarna zbóż pod względem wymiarów i kształtów stanowią zbiór niepowtarzających się elementów. To od nich w głównej mierze zależą wymiary przestrzeni roboczych maszyn do zbioru i obróbki pozbiorowej. Kształt pojedynczego ziarna w skali makro oraz jego struktura wewnętrzna w skali mikro stanowią więc wiedzę niezbędną podczas projektowania maszyn i urządzeń przetwarzających te surowce. W czasie realizacji procesu roboczego, na skutek działających obciążeń, dochodzi najczęściej do zmian cech geometrycznych. W celu predykcji tych zmian tworzone są rozmaite modele matematyczne opisujące geometrię ziarna, pozwalające na przeprowadzenie symulacji komputerowej procesów zachodzących w zespołach roboczych maszyn i urządzeń.

Istnieją różne metody opisu kształtu ziarna. Najczęściej jest on charakteryzowany przez trzy główne wymiary: długość, szerokość i grubość oraz określony w sposób umowny jako np. kulisty, eliptyczny, owalny, itp. Jest to jednak bardzo duże uproszczenie opisu obiektów rzeczywistych, co skutkuje małą dokładnością tworzonych prognoz. Z tych względów podjęto liczne próby utworzenia modelu wirtualnego (Rys. 3.8.2).

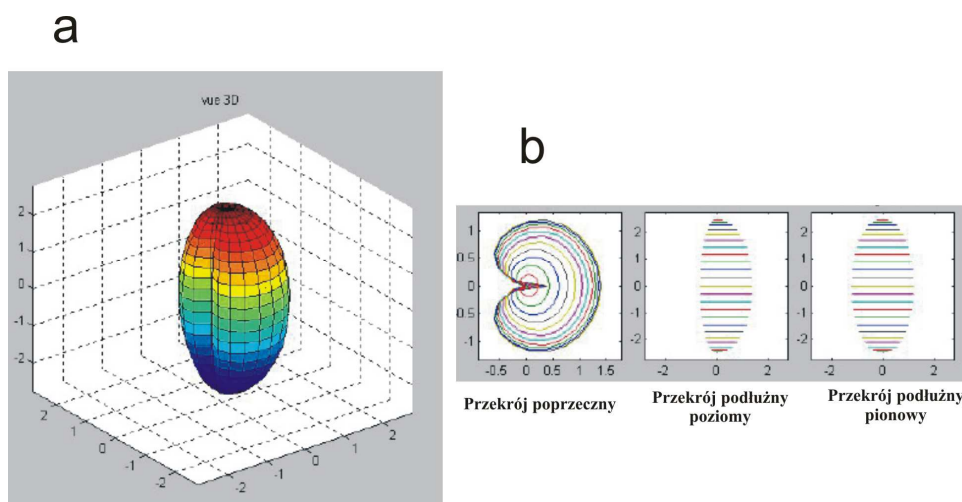
W chwili obecnej metody rekonstrukcji kształtu nasion bazują w głównej mierze na elementach cyfrowej analizy obrazu.

Badania wykazały, iż z powodu dużej zmienności kształtu i wymiarów niezbędne jest tworzenie modelu 3D oddzielnie dla każdej odmiany. Dzięki wirtualnym modelom możliwe jest określenie geometrii w dowolnej płaszczyźnie przekroju. Jest to istotne zarówno przy obliczaniu modułu sprężystości według standardów ASAE, jak i przy ocenie poprawności modeli wirtualnych, których koncepcja tworzenia bazuje na aproksymacji ziarna różnymi powierzchniami.

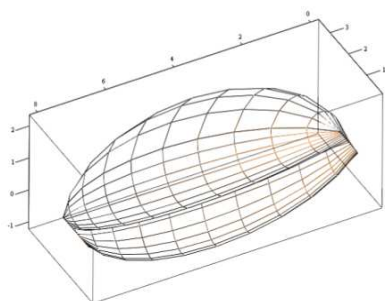


Rys. 3.8.2. Wirtualne modelowanie ziarna pszenicy (wg Frączka i Wróbla). a – zasada modelowania, b – uzyskany model (Frączek i Wróbel M. 2003)

Inny sposób modelowania ziarna zaprezentowali Mabilie'a i Abecassis'a (2003), którzy utworzyli parametryczny model ziarna pszenicy uwzględniający zmienność cech morfologicznych. Model ten pozwala na uzyskanie trójwymiarowego „reprezentanta struktury ziarna” pszenicy i składa się z prostych równań matematycznych opisujących kształt ziarna. Może być wykorzystany do obliczenia objętości ziarna (poprzez rozwiązanie całki potrójnej), jego powierzchni (rozwiązanie całki podwójnej) oraz dostarcza nowej, dokładnej metody dla oceny podatności ziarna na przemiał. Jak przykładowo pokazano na rysunku 3.8.3 dla każdej odmiany można utworzyć wzorcowy ziarniak („wirtualne jądro”). Dzięki temu możliwe jest obliczenie różnych cech geometrycznych, a po wprowadzeniu dodatkowego parametru „szkielet ziarna” w pełną strukturę z możliwością uwzględnienia siatki endospermu. Jednak praktyczne stosowanie modelu, nie jest zbyt proste, ponieważ błędny wybór wielomianów może doprowadzić do uzyskania modelu nieodpowiadającego obiektowi rzeczywistemu.



Rys. 3.8.3. Parametryczny model ziarna pszenicy (Mabille i Abecassis). a – wirtualne ziarno, b – przekroje wirtualnego ziarna (Frączek i Ślipek 2006)



Rys. 3.8.4. Model 3D bryły ziarna pszenżyta (Mieszkalski 2013)

Matematyczne modelowanie ziarna pszenżyta za pomocą płatów Béziera, możemy znaleźć w pracy Mieszkalskiego (2013). Powierzchnia ziarniaka aproksymowana jest za pomocą kawałków powierzchni opisanych w sposób matematyczny (Rys. 3.8.4). Kształt i wymiary uzyskanego modelu można zmieniać operując 48 współrzędnymi punktów sterujących (kontrolnych) płatów Béziera. Jak stwierdza Autor tak dużą liczbę punktów sterujących należy uznać za wadę tej metody.

Właściwości wytrzymałościowe ziarna

Przy prognozowaniu zachowania się ziarna w różnych procesach technologicznych niezbędne jest utworzenie modelu nie tylko pojedynczego szkieletu, ale i całej masy ziarnistej. Podejmowane do tej pory próby bazowały głównie na prawach mechaniki ośrodków ciągłych. Zazwyczaj stosowano hipotezy dotyczące materiałów plastyczno-kruchych, czyli takich, które podczas ściskania wykazują cechy plastyczne, a podczas rozciągania zachowują się liniowo-sprężyste, aż do momentu osiągnięcia wytrzymałości na rozciąganie, w którym następuje kruche pęknięcie. Ponieważ określenie stanu mechanicznego zależy od większej liczby parametrów, zazwyczaj przestaje się na podaniu zależności granicznych.

W większości przypadków wykorzystywany jest warunek Coulomba-Mohra. W myśl hipotezy Mohra zarówno zniszczenie poślizgowe, jak i rozdzielcze występuje na pewnych określonych powierzchniach. Stąd założenie, że o zniszczeniu

decyduje wektor naprężenia (naprężenie normalne σ i styczne τ) na tych właśnie powierzchniach. Naprężenie materiału jest więc określone funkcją $f(\sigma, \tau)$ i materiał ulega zniszczeniu gdy funkcja ta osiągnie wartość graniczną. Kryterium zniszczenia Coulomba-Mohra przedstawia liniową obwiednię, którą można wyrazić wzorem:

$$|\tau| \leq \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (1)$$

gdzie: c – spójność (kohezja), φ – kąt tarcia wewnętrznego.

Jednak mimo licznych prób wykorzystania równań liniowych i nieliniowych, w których zastosowano elementy teorii sprężystości, plastyczności i płynięcia żaden z proponowanych modeli nie opisuje w sposób zadawalający struktury roślinnych materiałów ziarnistych (Kruszewski i in. 2001, Horabik i Molenda 2003). Dzięki zastosowaniu licznych uproszczeń możliwe jest ograniczone prognozowanie zachowania się masy ziarnistej. Związane jest to między innymi z trudnościami w precyzyjnym określeniu niezbędnych stałych materiałowych. Chodzi tu m.in. o gęstość materiału, moduł sprężystości E czy też współczynnik tarcia wewnętrznego.

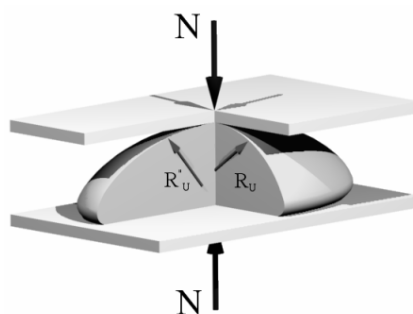
Wobec wątpliwości odnośnie zastosowań teorii bazujących na elementach mechaniki ośrodków ciągłych podjęto próby ukierunkowania badań na analizę mikrostruktury. Ich podstawą jest założenie, że o zachowaniu się całego ośrodka decydują właściwości pojedynczych ziaren oraz relacje zachodzące między stykającymi się nasionami. Tensor naprężenia σ_{ij} obliczany jest jako średnia dla dużej liczby cząstek zawartych w pewnej objętości. Do jego wyznaczenia niezbędna jest jednak wiedza na temat wektorów sił oraz interakcji między stykającymi się ziarnami.

W przypadku zbóż istotne jest uwzględnienie dużej odkształcalności pojedynczych ziaren. Pod wpływem przyłożonego nacisku punkty styku zmieniają się w powierzchnię kontaktu między ziarnami. Dodatkowym utrudnieniem jest anizotropia tego typu ośrodków oraz wpływ sposobu formowania złoża (decydujący o orientacji ziaren) na zmienność właściwości mechanicznych materiału (Molenda i in. 2005). Pojedyncze ziarna rozłożone są w przestrzeni w sposób chaotyczny i korelacja położenia widoczna jest jedynie pomiędzy najbliższymi sąsiadami. Trudno zatem stosować proste opisy deterministyczne. Wydaje się, że jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie nowoczesnych metod statystyki matematycznej do wyznaczania makroskopowych właściwości fizycznych materiałów ziarnistych.

Modelowanie struktury ziarnistej wymaga doświadczalnego wyznaczenia określonych stałych materiałowych. Za jedną z najważniejszych należy uznać

sprężystość materiału, czyli właściwość ciał polegającą na odzyskiwaniu pierwotnego kształtu i objętości po usunięciu obciążeń powodujących odkształcenie. W celu jej określenia dąży się zazwyczaj do wyznaczenia modułu Younga E , który jest jedną z najważniejszych stałych materiałowych i określa stosunek między naprężeniami a odkształceniami w zakresie odkształceń sprężystych. Dla pojedynczych nasion moduł ten jest najczęściej obliczany na podstawie zaleceń wypracowanych przez ASAE (1998). Bazują one na pomiarze siły i odkształcenia w próbie ściskania między dwoma równoległymi płytkami oraz na aproksymacji kształtu badanego ziarna odpowiednimi bryłami.

Przykładem mogą być badania przeprowadzone przez Frączka i Hebde (2003), którzy określili wartość E podczas klasycznej próby ściskania ziarna między dwoma równoległymi płytkami, w zakresie obciążeń od 0 do 250 N i obciążaniu ze stałą prędkością $2 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Autorzy założyli, że kontakt ziarniaków z górną płytką dociskową jest punktowy, a z dolną – powierzchniowy (Rys. 3.8.5).



Rys. 3.8.5. Promień krzywizny ziarna zbóż. (Frączek i Hebda 2003)

Wzór na moduł sprężystości przyjmie wówczas postać:

$$E = \frac{0,278 \cdot N}{\Delta L^{\frac{3}{2}}} \cdot K' \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (8 \cdot H^2 + L^2)}{4 \cdot H^3 + H \cdot L^2}} \quad (2)$$

gdzie: E – moduł Younga (Pa), N – siła nacisku (N), ΔL – odkształcenie liniowe (m), H – wysokość ziarna (m), L – długość ziarna (m), K' – stała

$$K' = f \left(\cos \theta = \frac{L^2}{2 \cdot (8H^2 + L^2)} \right) \quad (3)$$

Badania wytrzymałościowe ziarna zbóż prowadzone są dwutorowo: jako pomiary wykonywane na pojedynczym ziarnie oraz masie ziarnistej. W obu przypadkach – mimo tego, iż wielu badaczy zwraca uwagę na ograniczoną stosowalność – w mniejszym lub większym stopniu wykorzystywane są ogólnie znane i stosowane teorie dotyczące jednorodnych materiałów konstrukcyjnych (Hooke’a, Hertza, Boussinesq’a, zasada de Saint-Venanta) (Frączek i in. 2000).

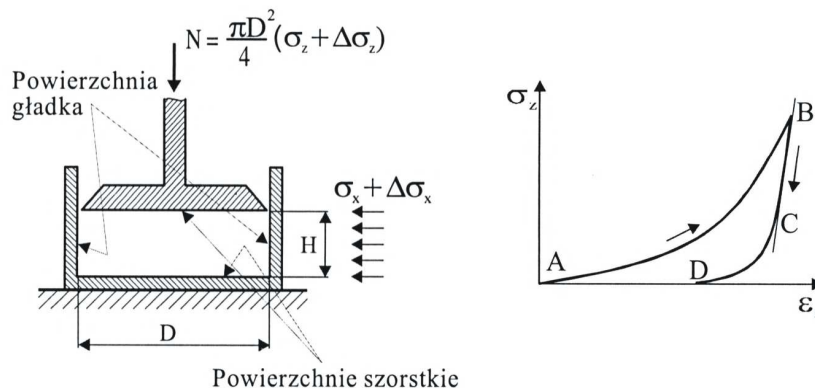
Modułu E dla masy ziarnistej, często wyznacza się w teście jednoosiowego ściskania, wykorzystując początkowy, liniowy odcinek zależności naprężenie-odkształcenie podczas procesu odciążania materiału (odcinek BC na rysunku 3.8.6). Moduł Younga jest obliczany ze wzoru:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu} \right) \quad (4)$$

gdzie: σ_z – naprężenia pionowe, ν – współczynnik Poissona, wyznaczany z zależności:

$$\sigma_x = \sigma_z \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (5)$$

gdzie: σ_x – naprężenie poziome.



Rys. 3.8.6. Metoda wyznaczania stałych sprężystości ziarna, (Frączek i in. 2003)

Metodę jednoosiowego ściskania wykorzystali między innymi Molenda i Stasiak (2001), którzy przy określaniu modułu sprężystości oraz współczynnika Poissona złoza ziarna pszenicy wykazali, że zależność naprężenie-odkształcenie opisana modelem Sawickiego (wykorzystanym do opisu deformacji piasku) po-

prawnie opisuje badany proces w zakresie naporu normalnego do 100 kPa i wilgotności ziarna od 10% do 20%.

W dostępnej literaturze są nieliczne przykłady badań mających na celu powiązanie właściwości wytrzymałościowych pojedynczego ziarna z zachowaniem się masy ziarnistej. Między innymi taką próbę podjęli Frączek i in. (2000). Autorzy stwierdzili, że zależność między względnym odkształceniem liniowym masy ziarnistej a modułem Young'a obliczonym dla pojedynczego ziarniaka jest funkcją potęgową o ujemnym wykładniku.

Równie ważnym parametrem wytrzymałościowym jest twardość ziarna. Ogólna definicja twardości materiału mówi, że jest to właściwość wyrażająca się odpornością na odkształcenia plastyczne i pęknięcia przy działaniu siły skupionej na powierzchni danego ciała. Dla materiałów roślinnych, w tym ziarna, twardość można określić jako siłę niezbędną do osiągnięcia założonej deformacji (Ślipek i in.). Istnieje wiele przesłanek, uzasadniających celowość oceny twardości ziarna. W niektórych krajach (m. in. Kanada, Australia, USA) na etapie klasyfikacji ziarna pszenicy uwzględnia się jego twardość. Soszyńska i Cacek-Pietrzak (1992) podają, że twardość jest dobrym wskaźnikiem pośrednim do wstępnej oceny wartości wypiekowej pszenicy. Twardość ziarna jest też czynnikiem, który decyduje o powierzchni styku ziaren – zatem może determinować proces tarcia.

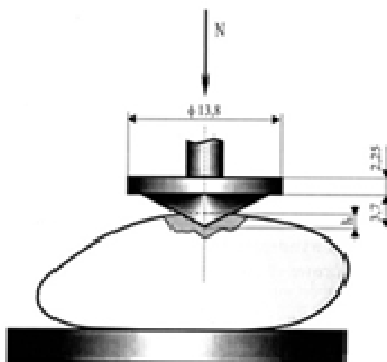
Klasyczne, wytrzymałościowe metody pomiaru twardości (Brinella, Rockwella, Vickersa) polegają na wciskaniu w materiał, z określoną siłą, penetratora o ściśle określonej końcówce (kulka, stożek i in.), a następnie określeniu pola powierzchni odcisku. Frączek i in. (2003) wykorzystali do pomiaru twardości pojedynczych ziaren, specjalny penetrator stożkowy (Rys. 3.8.7). Stosowane do tych pomiarów wartości siły są niewielkie (do 2 N), ściśle określony czas trwania pomiaru oraz kąt wierzchołkowy końcówki penetratora. Przy zachowaniu tych warunków twardość można obliczyć z wzoru:

$$RV = 0,1838 \cdot h^{-2} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

gdzie: h – wartość zagłębienia penetratora (mm).

Podstawowym utrudnieniem przy badaniach twardości (w zasadzie mikro-twardości) metodami penetrometrycznymi jest zazwyczaj mała wielkość ziarna. Z tych między innymi względów powszechniejsze zastosowanie znajdują metody technologiczne, przy użyciu których można pośrednio ocenić twardość ziarna w masie. Metody te polegają zazwyczaj na rozdrabnianiu próbki ziarna oraz ocenie efektu tego procesu, najczęściej oporu stawianego podczas rozdrabniania i stopnia rozdrobnienia ziarna. Do podstawowych parametrów wyznaczanych w takich próbach należą: wskaźnik WHI (wskaźnik twardości pszenicy), PSI

(wskaźnik wielkości cząstki), PRI (wskaźnik odporności na obłuskiwanie), indeks twardości SKCS i in. (Dziki i Laskowski 2008).



Rys. 3.8.7. Schemat obciążania ziarna przy pomiarze twardości (Frączek i in. 2003)

PIŚMIENNICTWO

- Dziki D., Laskowski J., 2008. Znaczenie właściwości fizycznych pszenicy w procesie rozdrabniania. Właściwości fizyczne i biochemiczne materiałów roślinnych. Wyd. Naukowe FRNA, 211-220.
- Frączek J., Hebda T., 2003. Znaczenie siły nacisku w pomiarze modułu Younga nasion. Inżynieria Rolnicza, 9(51), 89-98.
- Frączek J., Kaczorowski J., Ślipek Z., 2000. Porównanie sprężystości ziarna pojedynczego i ziarna obciążonego w masie. Inżynieria Rolnicza, 19, 47-55.
- Frączek J., Kaczorowski J., Ślipek Z., Horabik J., Molenda M., 2003. Standaryzacja metod pomiaru właściwości fizyczno-mechanicznych roślinnych materiałów ziarnistych. Acta Agrophysica, 92.
- Frączek J., Ślipek Z., 2006. Modele roślinnych struktur ziarnistych. Inżynieria Rolnicza, 12(87), 145-154.
- Frączek J., Wróbel M., 2003. Analiza możliwości wykorzystania istniejących modeli ośrodków granulanych do opisu biologicznych materiałów ziarnistych. Acta Agrophysica, 83, 83-92.
- Horabik J., Molenda M., 2003. Makro- i mikroskopowe modele materiałów sypkich. Acta Agrophysica, 93, 17-31.
- Kruszewski Z., Pukos A., Frąk W., 2001. Ilościowe badania struktury trójfazowych ośrodków granulanych i komórkowych – fakty i fikcje. Agrofizyka na początku XXI wieku. Wydawnictwo Naukowe FRNA, 3, 53-54.
- Mabille F., Abecassis J., 2003. Parametric modelling of wheat grain morphology: a new perspective. Journal of Cereal Science, 37, 43-53.
- Mieszkalski L., 2013. Metoda matematycznego modelowania płatom Béziera kształtu ziarna pszenicy. Inżynieria Rolnicza, 2(143), 225-233.
- Molenda M., Horabik M., Laskowski J., Łysiak G., Skonecki S., 2005. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Institute of Agrophysics PAN.

- Molenda M., Stasiak M., 2001. Zastosowanie testu jednoosiowego ściskania do wyznaczania właściwości mechanicznych złoża ziarna zbóż. *Inżynieria Rolnicza*, 13(33), 307-312.
- Soszyńska M., Cacek-Pietrzak G., 1992. Mikrotwardość ziarna żyta. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 2-3, 7-8.
- Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J., 1999. Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych, PTIR, str. 188.

3.9. Tarcie materiałów roślinnych

Jarosław Frączek, Zbigniew Ślipek

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Tarcie określane jest jako system zjawisk, które występują na obszarze styku dwóch przemieszczających się względem siebie ciał. W procesach przemieszczania technologicznego materiałów roślinnych, związanych zarówno ze zbiorem jak i obróbką pozbiorową, występuje zawsze kontakt tych materiałów z materiałem konstrukcyjnym lub kontakt wewnętrzny pomiędzy elementami roślin (plonu). W wyniku takiego kontaktu występują opory, których określenie i poznanie jest niezmiernie istotne, zarówno dla celów projektowania maszyn i urządzeń, jak i z punktu ich racjonalnego użytkowania. Poznanie tego zjawiska jest także drogą zarówno do optymalizacji procesów produkcyjnych, obniżenia strat plonu jak i oszczędności energii. Wartości współczynnika tarcia (zewnętrznego jak i wewnętrznego) stanowią również podstawowe i niezbędne elementy opisu rozkładu naprężeń w warstwie materiału i związanych z nim obciążeń konstrukcji, np. silosów.

Próby zastosowania ogólnie znanych teorii tarcia materiałów konstrukcyjnych do materiałów roślinnych stanowią jedynie pewne przybliżenie rzeczywistego procesu tarcia. Badacze, w większości są zgodni co do tego, że możliwość stosowania klasycznych teorii dotyczących tarcia zewnętrznego i wewnętrznego jest bardzo ograniczona. Oprócz trójfazowej struktury oraz nieciągłej budowy komórkowej dodatkowe trudności sprawia różny mechanizm oddziaływania wilgoci – inny w przypadku ośrodków pochodzenia mineralnego, a inny roślinnego. Woda zawarta w powietrzu nie tylko zwilża powierzchnię i wypełnia pory, ale wnika również do wnętrza cząstki, powodując zmianę jej właściwości mechanicznych (Molenda i in. 1995). Stąd badanie procesu tarcia jest znacznie utrudnione mimo, że jako zjawisko mechaniczne jest stosunkowo łatwe do wykrycia i ilościowego zmierzenia. Głównym tego powodem jest nieciągła budowa komórkowa i wielofazowa struktura. Z punktu widzenia fizyki ośrodka pojedyncza komórka roślinna, stanowiąca podstawowy element struktury, jest błoną sprężysto-plastyczną wypełnioną mieszaniną cieczy oraz gazu i nie utworzono dotychczas nawet przybliżonego rozwiązania problemu opisu jej odkształcania pod działaniem sił wewnętrznych. Mimo tych trudności, postęp w badaniach pozwala na uzyskiwanie coraz lepszego opisu procesu tarcia.

Jedną z podstawowych zasad większości teorii tarcia jest uzależnienie wartości współczynnika tarcia od siły normalnej lub nacisku normalnego. Stosun-

kowo najlepiej poznany jest wpływ wilgotności na wartość siły tarcia. Jest to zrozumiałe, gdyż decyduje ona o sposobie zachowania się materiału poddanego obciążeniom mechanicznym. W miarę wzrostu wilgotności następuje przejście od ciała sprężysto-plastycznego do ciała lepko-plastycznego (Mohsenin 1970, Szot i Horabik 1980). Uogólniając spostrzeżenia wielu badaczy, można stwierdzić, że wartość siły tarcia rośnie wraz z wilgotnością (Tsann-Mui-Chung i in. 1984, Molenda i in. 1995).

Do głównych czynników determinujących tarcie materiałów ziarnistych należy zaliczyć również właściwości wytrzymałościowe warstwy wierzchniej. W opracowaniu Molendy i in. (1995) można znaleźć wyniki badań procesu tarcia, uwzględniające nie tylko chropowatość powierzchni materiału konstrukcyjnego, ale także pojedynczego ziarna pszenicy. Autorzy stwierdzili silny wpływ mikronierówności powierzchni zarówno na współczynnik tarcia, jak i na wartość kohezji. Wnioskują stąd, że w przypadku powierzchni gładkich decydujące znaczenie mają oddziaływania adhezyjne, których wielkość zależy od rzeczywistej powierzchni kontaktu. W przypadku powierzchni porowatych, mikronierówności, tworzą rzeczywistą powierzchnię styku i przesuając się, oddziałują na siebie mechanicznie. Oddziaływanie takie – bezpośrednio lub pośrednie (poprzez rzeczywistą powierzchnię styku) – uwzględniają wszystkie współczesne teorie tarcia.

Analiza wyników dotychczasowych badań wskazuje na wiele braków w opisie wpływu parametrów determinujących przebieg procesu tarcia. Szczególnie mało wiadomo o wzajemnej interakcji czynników stymulujących ten proces.

W przypadku tarcia materiałów roślinnych wprowadzono klasyfikację, która określa mianem tarcia zewnętrznego procesy zachodzące na styku materiału konstrukcyjnego i roślinnego, a za tarcie wewnętrzne uznaje tarcie między cząstkami (ziarnami) tego samego ośrodka. Stosowanie tak zdefiniowanego rozgraniczenia jest umowne, w świetle klasycznej tribologii, w obu przypadkach mamy bowiem do czynienia z tarcieniem zewnętrznym, które stanowi sumę elementarnych składowych oporów tarcia, powstających między stykającymi się elementami – w tym również pomiędzy cząstkami tego samego ośrodka sypkiego.

Tarcie zewnętrzne

Zainteresowanie badaniami związanymi z tym zjawiskiem wynika z szeroko pojętych potrzeb inżynierii rolniczej. Tworzone są teorie, które coraz dokładniej próbują wyjaśnić przebieg tego procesu. Początkowo ograniczano się do pomiaru siły tarcia oraz siły normalnej, i na tej podstawie wyznaczano współczynnik tarcia.

Pierwszą (mechaniczną) teorię tarcia sformułował Amontons (1699), który wyraził ją znanym zapisem:

$$T = \mu \cdot N \quad (1)$$

gdzie: T – siła tarcia (N), N – siła nacisku (N), μ – współczynnik tarcia (-).

Wzór ten, mimo małej dokładności, jest stosowany do dziś w obliczeniach technicznych.

Coulomb, uwzględniając molekularne oddziaływanie powierzchni, wprowadził do wzoru Amontonsa dodatkowy czynnik, zwany siłą kohezji C :

$$T = \mu \cdot N + C \quad (2)$$

Przedstawione wyżej teorie mechaniczne stanowią słabe przybliżenie dla opisu procesu tarcia. Dokładniej zjawisko tarcia przybliżają teorie molekularne, w których za podstawowe źródło oporów tarcia przyjmuje się oddziaływanie międzycząsteczkowe (międzyatomowe). Najważniejsze z tych teorii to:

– teoria Tomlinsona, który przyjął założenie, że suma molekularnych oddziaływań trących się powierzchni jest równoważna zewnętrznej sile normalnej, i zapisał współczynnik tarcia jako:

$$\mu = E_n \cdot b \cdot (\pi \cdot l)^{-1} \quad (-) \quad (3)$$

gdzie: E_n – średnia energia odrywania od siebie pary cząstek (N·m), π – średnia wartość siły odpychania jednej pary cząstek (N), b – współczynnik poprawkowy zależny od kierunku ruchu (-), l – odległość między parami cząstek (m).

– teoria Dieriagina, który założył, że oddziaływanie atomowe lub molekularne pomiędzy trącymi powierzchniami powoduje zwiększenie siły normalnej.

Teorie molekularne, zwłaszcza teoria Dieriagina, mają zastosowanie przy opisie procesu tarcia dla bardzo gładkich powierzchni trących. Nie znajdują one więc zastosowania do badania materiałów roślinnych.

Współczesna tribologia skłania się do przyjęcia założenia, że proces tarcia ma dwoistą naturę: mechaniczną oraz molekularną. Teorię opartą na tym założeniu sformułował Kragielski (Ślipek i in. 1999). Przyjął on, że na rzeczywistych powierzchniach styku trących się ciał występują opory wywołane oddziaływaniem molekularnym oraz mechaniczne opory ruchu wywołane „zahaczaniem” się mikronierówności i ich wzajemnym wgłębianiem. Siłę tarcia wyraził następująco:

$$T_t = T_a + T_d \quad (N) \quad (4)$$

gdzie: T_a – składowa adhezyjna (molekularna) (N), T_d – składowa mechaniczna (deformacyjna) (N).

Według tej zasady całkowity współczynnik tarcia jest więc sumą molekularnego (μ_a) oraz mechanicznego (μ_d) współczynnika tarcia:

$$\mu = \mu_a + \mu_d = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + K \cdot j_k \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (5)$$

gdzie: τ_0 – wytrzymałość adhezyjnego połączenia tarcioowego na ścinanie przy $p_r = 0$ ($N \cdot m^{-2}$), p_r – naprężenie normalne na powierzchni kontaktu ($N \cdot m^{-2}$), β – współczynnik uwzględniający przyrost wytrzymałości wiązania adhezyjnego na ścinanie ze wzrostem nacisku, K – współczynnik zależny od rodzaju styku (sprężysty lub plastyczny), h – zagłębienie pojedynczej mikronierówności w płaską powierzchnię (m), r – promień krzywizny nierówności (m), φ_k – współczynnik strat histerezy.

Próbie wykorzystania teorii Kragielskiego do opisu tarcia zewnętrznego ziarna pszenicy podjął między innymi Molenda i in. (1995). Analiza wyników tych badań wykazała, że model krzywoliniowy bardziej wiernie opisuje wyniki eksperymentu niż model Coulomba.

Na przestrzeni ostatnich lat podejmowano liczne próby zbudowania modelu matematycznego procesu tarcia zewnętrznego, w którym określone są relacje między siłą (współczynnikiem) tarcia a takimi parametrami, jak: struktura mikrostereometryczna powierzchni, właściwości fizyczne warstw wierzchnich czy warunki ruchu. Model, który uwzględnia w swej strukturze zarówno kohezję, jak i adhezję między trącymi się powierzchniami sformułował, przy użyciu analizy wymiarowej, Frączek (1999). Przedstawione przez niego równanie kryterialne ma postać:

$$T = A \cdot N + B \cdot \sqrt{N} + C \quad (6)$$

gdzie: $A = k_1 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \cdot \left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{E_1}{E_2}\right) \cdot w$

$$B = k_2 \cdot (v \cdot t \cdot \sqrt{\alpha})$$

$$C = k_3 \cdot (p \cdot \alpha)$$

Występujące we wzorze składniki sumy reprezentują następujące wielkości fizyczne:

$T_d = A \cdot N$ – składowa deformacyjna siły tarcia. Jej wartość zależy zarówno od stałych materiałowych warstw wierzchnich (geometrii powierzchni i jej sprężystości) w materiale roślinnym, jak i od zawartości wody. Jest wprost proporcjonalna do siły nacisku.

$T_a = B \cdot \sqrt{N}$ – składowa adhezyjna (molekularna). Uwzględnia wzajemne przyciąganie stykających się powierzchni. Zależy od prędkości poślizgu, czasu trwania kontaktu tarcioowego oraz mikrotwardości powierzchni materiału roślinnego. Jest funkcją potęgową wartości siły nacisku.

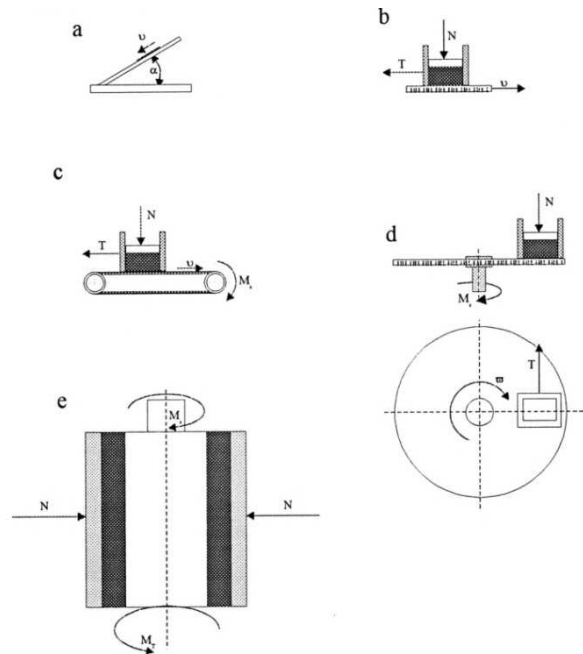
$T_k = C$ – składowa kohezyjna uwzględniająca „szczepność” trących powierzchni. Zależy ona od rzeczywistej powierzchni kontaktu oraz mikrotwardości powierzchni. Nie jest funkcją siły nacisku.

Wyróżnione parametry A, B, C można wyznaczyć na drodze badań empirycznych.

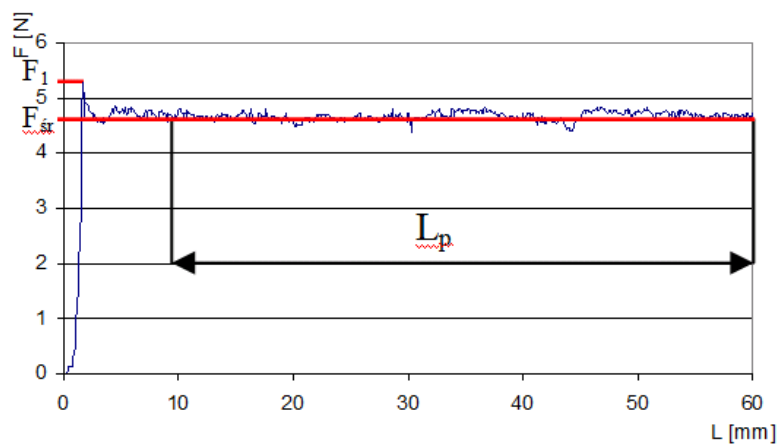
Pomiar laboratoryjny siły tarcia może odbywać się przy zastosowaniu specjalistycznych urządzeń, w których następuje wymuszenie powierzchni tarcia między badanymi materiałami. Roślinny materiał ziarnisty musi zostać odpowiednio przygotowany i usytuowany w specjalnym pojemniku. Powierzchnia tarcia zostaje utworzona w wyniku przemieszczania względnego próbki materiału w ruchu prostoliniowym lub obrotowym. Na rysunku 3.9.1 przedstawiono najczęściej stosowane sposoby pomiaru siły tarcia zewnętrznego materiałów ziarnistych.

Najprostszym urządzeniem pomiarowym do wyznaczenia kąta tarcia zewnętrznego, którego tangens jest równy współczynnikowi tarcia statycznego, jest równia pochyła (Rys. 3.9.1 a). Jest to stosunkowo mało dokładna metoda i nie pozwala na przeprowadzenie analizy zmian siły tarcia w czasie ruchu. Wady tej nie mają układy z płaską płytą lub taśmą w ruchu prostoliniowym (Rys. 3.9.1 b, c) oraz z tarczą lub walcem w ruchu obrotowym (Rys. 3.9.1 d, e).

Przykładowy, charakterystyczny dla materiału roślinnego, przebieg zmian siły tarcia zewnętrznego podczas przemieszczania próbki materiału roślinnego przedstawia rysunek 3.9.2.



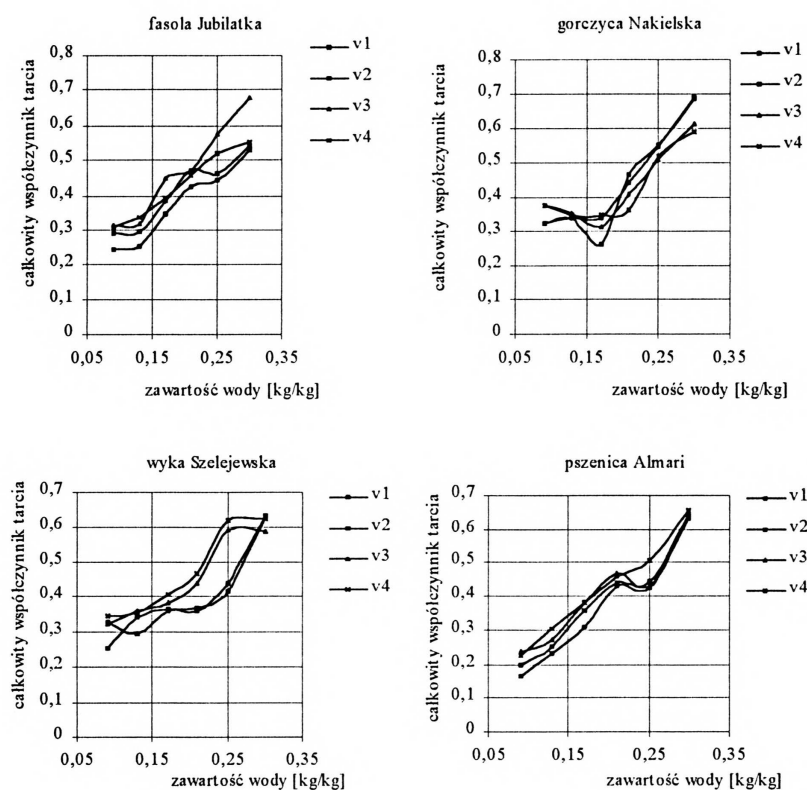
Rys. 3.9.1. Przykładowe sposoby pomiaru siły tarcia zewnętrznego materiałów roślinnych: a – równia pochyła, b – układ z płaską płytą, c – układ z taśmą, d – układ z tarczą obrotową, e – układ z walcem obrotowym (Ślipek i in. 1999)



Rys. 3.9.2. Zależność siły tarcia zewnętrznego od przemieszczenia: F_1 – siła tarcia statycznego, F_{st} – siła tarcia kinetycznego, L_p – odcinek pomiarowy siły tarcia kinetycznego (opracowanie własne)

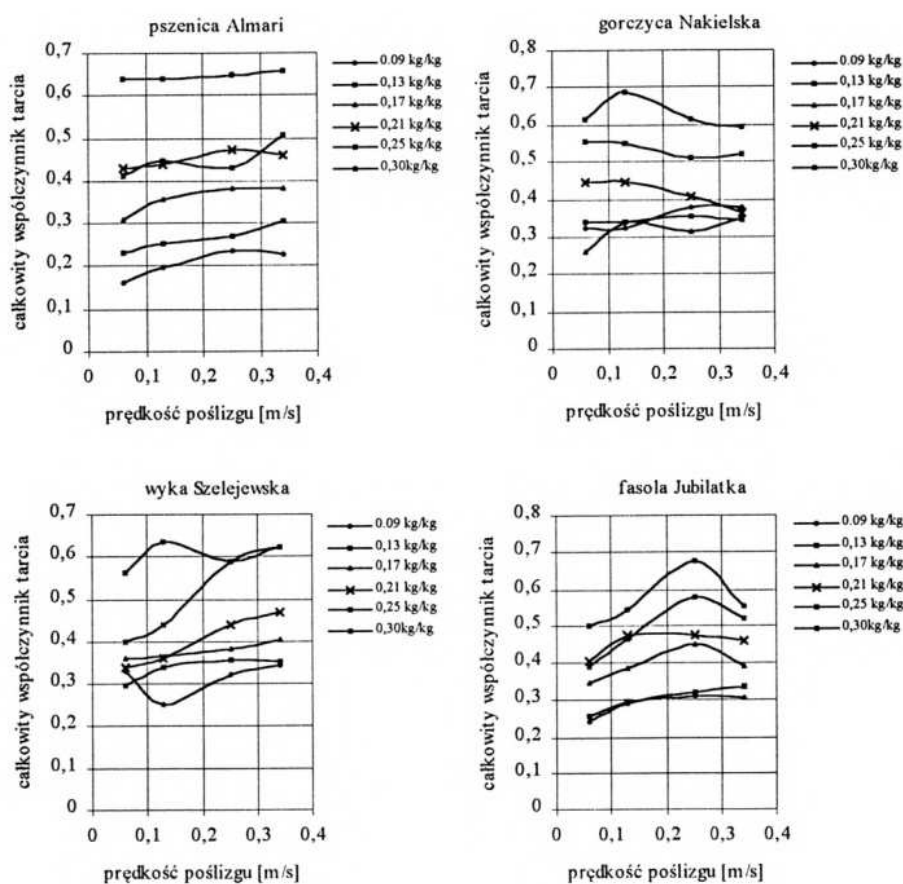
Na rysunku 3.9.3 przedstawiono zmiany współczynnika tarcia zewnętrznego wybranych materiałów ziarnistych. Jego wartości zawierają trzy elementy składowe (część deformacyjną, adhezyjną i kohezyjną). Przedstawione wykresy, jak i analiza statystyczna dowodzą, że wartości współczynnika tarcia rosną wraz ze zwiększaniem się zawartości wody w ziarnach.

Z kolei analiza zmian współczynnika tarcia w zależności od prędkości poślizgu (Rys. 3.9.4) wskazuje na jego zwiększanie się w miarę wzrostu prędkości. Testy statystyczne wykazały, że wystąpiła interakcja między gatunkiem i prędkością poślizgu. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na przebieg procesu tarcia jest wielkość ziarna.



Rys. 3.9.3. Zależność współczynnika tarcia zewnętrznego od zawartości wody dla przykładowych materiałów ziarnistych (Ślipek i in. 1999)

Przykład zmienności współczynnika tarcia (kinetycznego – μ i statycznego – μ_s) rozdrobnionych pędów Miskantusa olbrzymiego przedstawia tabela 3.9.1. Jak wynika z zestawionych wartości, współczynnik tarcia zwiększa się w miarę wzrostu wilgotności materiału roślinnego dla badanych materiałów konstrukcyjnych. O ile dla powierzchni trących stalowej i plastikowej siła kohezji zwiększa się w miarę wzrostu wilgotności materiału, to dla drewna siła ta maleje liniowo. Wydaje się, że komórkowa budowa drewna powoduje zmniejszanie się kohezji w miarę nawilżania, co sprzyja powstawaniu poślizgu.



Rys. 3.9.4. Zależność współczynnika tarcia zewnętrznego od prędkości poślizgu dla przykładowych materiałów ziarnistych (Ślipek i in. 1999)

Jak wynika z zestawionych wartości, współczynnik tarcia zwiększa się w miarę wzrostu wilgotności materiału roślinnego dla badanych materiałów konstruk-

cyjnych. O ile dla powierzchni trących stalowej i plastikowej siła kohezji zwiększa się w miarę wzrostu wilgotności materiału, to dla drewna siła ta maleje liniowo. Wydaje się, że komórkowa budowa drewna powoduje zmniejszanie się kohezji w miarę nawilżania, co sprzyja powstawaniu poślizgu.

Tarcie wewnętrzne

Najczęściej kąt tarcia wewnętrznego, którego tangens oznaczany jest jako współczynnik tarcia wewnętrznego, utożsamia się z kątem naturalnego usypu. Są to jednak dwie różne wielkości i kąt usypu jest zwykle większy od kąta tarcia wewnętrznego. Pozostając przy dotychczasowej klasyfikacji tarcia, można stwierdzić, że w przypadku tarcia wewnętrznego najszerze zastosowanie, w opisie zależności między naprężeniem stycznym i normalnym dla ziarnistych ośrodków roślinnych, znalazł liniowy warunek stanu granicznego Coulomba-Mohra. Dlatego też przy wyznaczaniu kąta tarcia wewnętrznego stosuje się metodę kół Mohra. Opinie co do sposobu interpretacji uzyskiwanych wyników są podzielone. Część badaczy uważa bowiem, że w materiałach ziarnistych pochodzenia roślinnego zjawisko kohezji nie występuje, a parametr kohezji C wynika jedynie z matematycznej interpretacji wyników, opracowanych przy wykorzystaniu warunku Coulomba-Mohra. Jednak przy dużej wilgotności ziarna, zjawiska kohezji nie sposób pominąć, gdyż objawia się ono w postaci tzw. „zlegania” ziarna poddawane długotrwałemu przechowywaniu. Występujące wówczas siły spójności między ziarnami, prowadzą do utworzenia wiązań adhezyjnych – ziarna „sklejają” się wzajemnie. Kohezja reprezentuje wówczas wiązania adhezyjne w miejscu styku ziaren, a zatem powinna być uwzględniana.

Tabela 3.9.1. Wartości współczynników tarcia statycznego i kinetycznego oraz sił kohezji dla rozdrobnionych pędów Miskanta olbrzymiego (Frączek i Reguła 2009)

Wilgotność (%)	μ			μ_s			C (N)		
	drewno	stal	plastik	drewno	stal	plastik	drewno	stal	plastik
8,7	0,17	0,16	0,17	0,171	0,17	0,19	1,37	0,43	0,70
13,5	0,18	0,17	0,23	0,19	0,18	0,24	1,27	0,44	0,83
24,0	0,20	0,18	0,27	0,19	0,19	0,29	1,04	0,63	0,95
28,8	0,25	0,36	0,39	0,24	0,36	0,40	0,26	1,20	1,07
33,5	0,28	0,37	0,42	0,29	0,39	0,41	0,25	1,35	1,23
40,2	0,30	0,47	0,48	0,35	0,48	0,45	0,00	1,39	1,63

Model matematyczny opisujący siłę tarcia wewnętrznego sformułował Frączek (1999) wykorzystując, podobnie jak przy tarciu zewnętrznym, analizę wymiarową. Założył, że siła tarcia jest nieznaną funkcją takich zmiennych, jak: siła nacisku,

chropowatość powierzchni, współczynnik kształtu. Utworzony model różni się od stosowanego w badaniach stanu granicznego Coulomba-Mohra i ma postać:

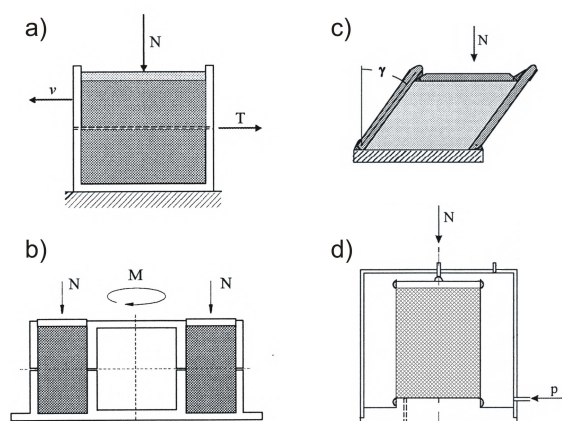
$$T = A \cdot N^{0.5} + B \cdot N \quad (7)$$

gdzie: $A = k_1 \cdot (R \cdot \rho^{0.5} \cdot v)$

$$B = k_2 \cdot \left(\frac{w}{s}\right) \cdot \left(\frac{\alpha}{E}\right)$$

α – mikrotwardość powierzchni ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$), E – moduł sprężystości ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$), w – zawartość wody ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ – gęstość ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), v – prędkość ruchu względnych trących ciał ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), s – współczynnik kształtu ziarna.

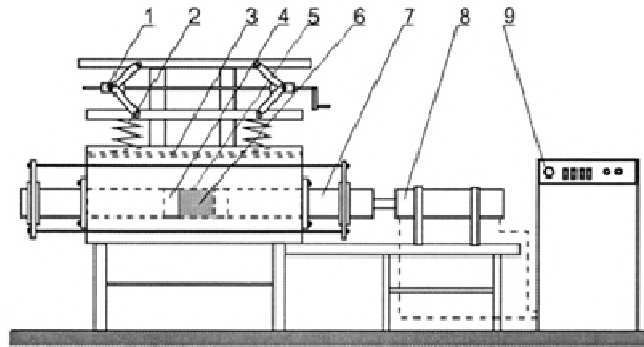
Występujące podobieństwo w budowie modelu tarcia zewnętrznego i wewnętrznego wynika z uwzględnienia oddziaływania siły nacisku N na wartość składowej adhezyjnej ($A \cdot N^{0.5}$) i deformacyjnej ($B \cdot N$).



Rys. 3.9.5. Stanowiska do badań tarcia wewnętrznego: a – bezpośredniego ścinania o ruchu prostoliniowym, b – bezpośredniego ścinania o ruchu obrotowym, c – prostego ścinania, d – trójosiowego ściskania (Ślipek i in.1999)

Do badań tarcia wewnętrznego materiałów roślinnych (głównie ziarnistych) wykorzystywane są metody stosowane w mechanice gruntów – zarówno do opisu matematycznego jak i sposobów pomiaru. Zastosowanie znajdują tu najczęściej aparaty bezpośredniego ścinania (z ruchem prostoliniowym jak i obrotowym – Rys. 3.9.5 a i b), prostego ścinania (Rys. 3.9.5 c) oraz aparaty trójosiowego ściskania (Rys. 3.9.5 d).

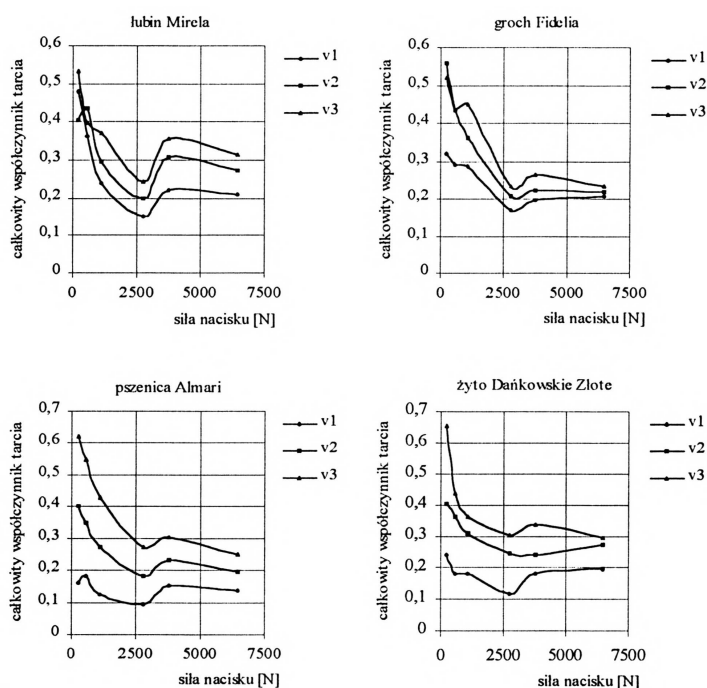
Opis działania przedstawionych aparatów jest powszechnie dostępny w literaturze. Specjalistyczne stanowisko do pomiaru siły tarcia wewnętrznej roślinnych materiałów granularnych (Frączek 1999) przedstawia rysunek 3.9.6.



Rys. 3.9.6. Stanowisko do pomiaru siły tarcia wewnętrznej: 1 – śruba dociskowa, 2 – sprężyna, 3 – płyta dociskowa, 4 – głowica tensometryczna, 5 – komora, 6 – porcja przesuwanego materiału, 7 – tłok, 8 – silownik, 9 – pulpit sterowniczy wraz z hydraulicznym układem napędowym (Frączek 1999)

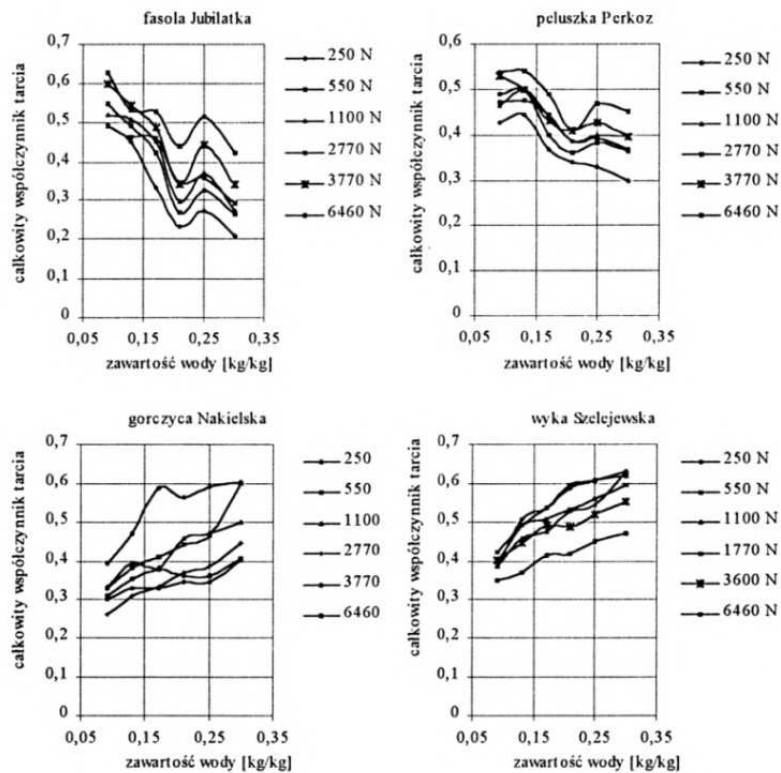
Umożliwia ono wywołanie samoistnego powstawania powierzchni poślizgu w całej objętości materiału ziarnistego, wskutek jego przemieszczania się między dwoma związanymi ze sobą tłokami, poruszającymi się w specjalnej komorze. Taki sposób realizacji procesu tarcia zapewnia dobre odzwierciedlenie warunków rzeczywistych. Miarą wewnętrznego oporu ośrodka jest wartość siły tarcia mierzona na powierzchni czołowej tłoka wymuszającego. Podobnie jak w przypadku tarcia zewnętrznego przedstawione przykładowe zależności obejmują współczynnik tarcia, który jest sumą dwóch składników – adhezyjnego (zależy od stanu powierzchni materiału, siły nacisku, prędkości ruchu) oraz deformacyjnego (zależy głównie od zawartości wody w materiale).

Dla wszystkich badanych materiałów przy zwiększaniu nacisku wartość współczynnika tarcia najpierw maleje, a po osiągnięciu minimum nieznacznie wzrasta i stabilizuje się na pewnym poziomie (Rys. 3.9.7).



Rys. 3.9.7. Zależność całkowitego współczynnika tarcia wewnętrznej od siły nacisku dla wybranych materiałów ziarnistych (Ślipek i in.1999)

Prawidłowość ta występuje dla zróżnicowanych prędkości przemieszczania. Zwiększanie zawartości wody w nasionach wpływa niejednakowo na współczynnik tarcia (Rys. 3.9.8). Podobnie jak w przypadku tarcia zewnętrznego przy stosunkowo dużych cząstkach (fasola, peluszką) wraz ze wzrostem zawartości wody następuje spadek wartości współczynnika tarcia. Natomiast dla cząstek mniejszych (gorczyca, wyka) tendencja jest odwrotna. Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawione sposoby podejścia do modelowania, pomiarów, jak i interpretacji wyników badań tarcia materiałów roślinnych stanowią tylko pewne przybliżenie. W wielu badaniach tego procesu stosuje się nadal metody badawcze oparte są na założeniach typowych dla ośrodków ciągłych. Tymczasem materiał roślinny charakteryzuje się trójfazową strukturą, nieciągłą budową komórkową i metamorfizmem. Zatem problem identyfikacji całokształtu zjawisk mechanicznych, występujących podczas tarcia materiałów roślinnych, a także identyfikacji zjawisk ubocznych, jakie zachodzą w tym pozornie prostym do zbadania procesie, pozostaje w dalszym ciągu otwarty.



Rys. 3.9.8. Zależność całkowitego współczynnika tarcia wewnętrznego od zawartości wody dla wybranych materiałów (Ślipek i in. 1999)

PIŚMIENNICTWO

- Frączek J., 1999, Tarcie ziarnistych materiałów roślinnych. Zesz. Nauk. Akademii Rolniczej w Krakowie, 252.
- Frączek J., Reguła T., 2009. Wpływ wybranych czynników na wartość współczynników tarcia rozdrobnionych pędów Miskanta olbrzymiego. *Inżynieria Rolnicza*, 6(115), 81-87.
- Mohsenin N.N., 1970. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publ. New York.
- Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B., 1995. Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophisica*, 4.
- Szot B., Horabik J., 1980, Zagadnienia mechaniki ośrodków sypkich pochodzenia roślinnego. *Problemy Agrofizyki*, 33,42-51.
- Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J., 1999. Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR.
- Tsang-Mui-Chung M., Verma L, Lalit, Wright M. E., 1984. A device for friction measurement of grains. *Trans. of the ASAE*, 4,1938-1944.

3.10. Właściwości biomasy przeznaczonej na cele energetyczne

Jarosław Frączek, Zbigniew Ślipek

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

W ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie wykorzystaniem biomasy do produkcji energii elektrycznej oraz ciepła. Jest to uwarunkowane zarówno krajowymi i unijnymi przepisami, coraz większym naciskiem UE na problem ochrony środowiska, jak i uznaniem konieczności zrównoważonego rozwoju energetyki (Frączek 2010a).

Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 14.08.2008 definiuje (zgodnie z dyrektywą unijną 2001/77/WE z 27 września 2001) biomasę jako „stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także z przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji”. Ze względu na dostępność, łatwość przetwarzania oraz termochemicznego wykorzystania szczególnie przydatna jest biomasa pochodzenia roślinnego.

Szeroka analiza przeprowadzona przez Frączka i in. (2011) wykazała, że największą efektywność wykorzystania odpadów rolno-spożywczych uzyskuje się w procesach termicznych. Jak stwierdzają autorzy możliwość ich zastosowania jest jednak w większości przypadków ograniczona dużą wilgotnością. Podejmowane są wprawdzie próby stosowania nowoczesnych pieców fluidalnych typu CFB (Circulating Fluidized Bed) wysokiej sprawności, niskiej emisji NO_x, możliwości stosowania paliw o niskiej jakości i dużej wilgotności, braku konieczności rozdrabniania w młynach – max. wielkość cząstki 6-20 mm, ale są to stosunkowo wysokie koszty inwestycyjne.

Jak wykazują prognozy należy się spodziewać szybszego rozwoju biogazowni. Bariery są jednak duże nakłady finansowe i konieczność zapewnienia ciągłej dostawy dużych ilości substratów, co ogranicza ich stosowanie do dużych gospodarstw lub zrzeszeń rolników (Pasyniuk 2008). Analiza ekonomiczna przeprowadzona przez Curkowskiego i Oniszk-Popławską (2011) wykazała, iż w warunkach polskich najkorzystniejszym rozwiązaniem jest lokalizacja biogazowni zapewniająca możliwość jej zintegrowania w ramach gospodarstwa rolno-hodowlanego oraz zakładu przetwórstwa spożywczego.

Istnieje wprawdzie wiele metod termochemicznego wykorzystania biomasy, ale najbardziej rozpowszechnioną formą jest bezpośrednie spalanie lub współspalanie. Wykorzystywane są w tym celu różnego rodzaju biopaliwa stałe, które ze

względu na sposób przygotowania, można podzielić na: nieprzetworzone (wszelkiego rodzaju gałęzie, kłody, zdrewniałe części roślin itp. nadające się do bezpośredniego spalania), rozdrobnione (zrębki, trociny, sieczka i inne materiały wytworzone drogą przeróbki mechanicznej) oraz compactowane (paliwa formowane takie jak pelety, brykiety itp. wytwarzane przy wykorzystaniu wysokiego ciśnienia, z użyciem lepiszczy lub bez) (Frączek 2010b). W każdym z tych przypadków niezbędne jest określenie właściwości fizycznych istotnych z punktu widzenia realizowanych procesów.

Jedynie dzięki tej wiedzy możliwe jest bowiem prawidłowe projektowanie i użytkowanie urządzeń do transportu, składowania, przetwarzania. Coraz częściej charakterystyki fizyczne materiału wykorzystywane są również w modelowaniu wielu procesów mechanicznych, cieplnych i elektrycznych.

Do głównych właściwości biomasy roślinnej przeznaczonej na cele energetyczne należy zaliczyć: wartość opałową i ciepło spalania, skład granulometryczny, gęstość nasypową, wilgotność oraz zawartość popiołu i części lotnych. Istotna jest również budowa anatomiczno morfologiczna materiału.

Podstawowym parametrem termofizycznym decydującym o możliwości wykorzystania biomasy jako paliwa, jest ciepło spalania i wartość opałowa.

Wartość opałowa W_d ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$) jest definiowana jako ilość ciepła powstała przy spalaniu jednostki masy paliwa w atmosferze tlenu, przy jego całkowitym i zupełnym spalaniu, przy założeniu, że produktami spalania są CO_2 , SO_2 , N_2 oraz para wodna, a substancje wyjściowe i produkty spalania znajdują się w warunkach standardowych (1013, 25 hPa; 298, 15 K).

Ciepło spalania W_g ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$) jest to ilość ciepła jaka wydzieliła się po całkowitym i zupełnym spalaniu jednostki masy paliwa i ochłodzeniu produktów spalania (CO_2 , SO_2 , N_2) do temperatury początkowej substratów, przy czym para wodna zawarta w spalinach ulega całkowitemu wykropleniu.

Wartość opałowa W_d jest równa różnicy między wartością W_g a ilością ciepła potrzebnego do odparowania wody zawartej zarówno w paliwie jak i powstałej w procesie spalania wodoru z tego paliwa. Wartość opałową można obliczyć ze wzoru:

$$W_d = W_g - r \cdot m_k \quad (1)$$

gdzie: r – utajone ciepło parowania wody w temperaturze początkowej substratów. Zazwyczaj przy 0°C przyjmuje się wartość $2500 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; m_k – ilość kondensatu otrzymanego po spalaniu jednostki masy paliwa.

Ciepło spalania paliw stałych wyznacza się eksperymentalnie przy pomocy bomby kalorymetrycznej, a dla paliw ciekłych i gazowych – kalorymetru Junkersa.

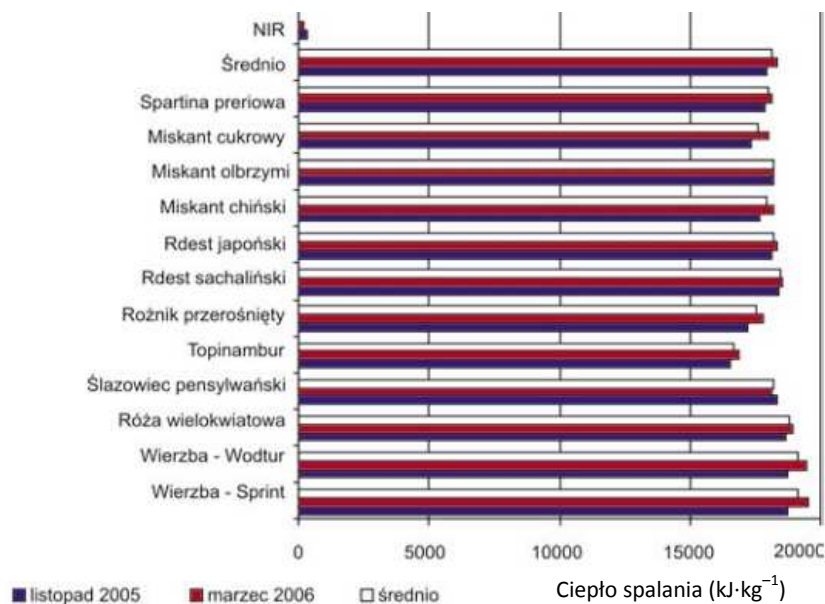
Tabela 3.10.1. Wartość opałowa wybranych rodzajów biomasy w zależności od wilgotności (Niedziółka i Zuchniarz 2006)

Rodzaj biomasy	Wilgotność (%)	Wartość opałowa w stanie świeżym (MJ·kg ⁻¹)	Wartość opałowa w stanie suchym (MJ·kg ⁻¹)
Słoma pszenna	15-20	12,9-14,1	17,3
Słoma jęczmienna	15-22	12,0-13,9	16,1
Słoma rzepakowa	30-40	10,3-12,5	15,0
Słoma kukurydziana	45-60	5,3-8,2	16,8
Pył drzewny	3,8-4,6	15,2-19,1	15,2-20,1
Trociny	39,147,3	5,3	19,3
Zrębki wierzby	40-55	8,7-11,6	16,5
Pelety	3,6-12	16,5-17,3	17,8-19,6
Brykiety ze słomy	9,7	15,2	17,1
Brykiety drzewne	15,2-14,1	16,2-19,7	16,9-20,4

W przypadku biopaliw stałych zmienność wymienionych właściwości jest duża i wynika z wielu czynników, które niejednokrotnie wchodzi w interakcję. Obie wartości determinowane są przede wszystkim przez rodzaj roślin oraz ich wilgotność (Tab. 3.10.1), ale także przez budowę anatomiczną, miejsce uprawy, sposób nawożenia, termin zbioru i wiele innych (Rys. 3.10.1).

Tabela 3.10.2. Ciepło spalania i wartość opałowa kory (Obidziński 2004)

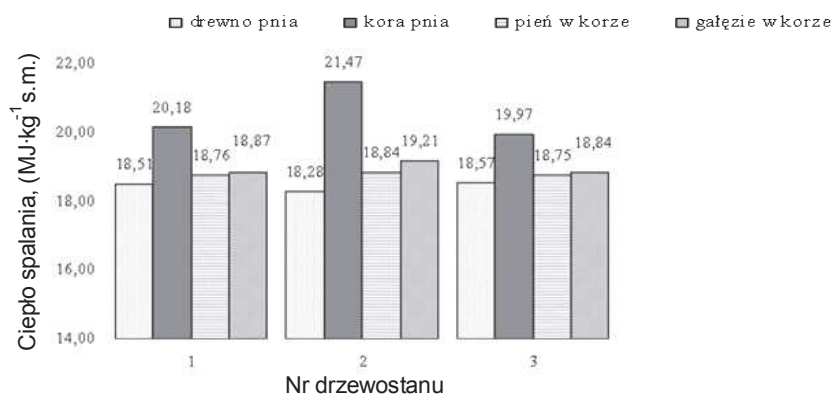
Rodzaj kory	Ciepło spalania (MJ·kg ⁻¹)	Wartość opałowa (MJ·kg ⁻¹)
Dębowa	19,05	17,51
Brzozowa	23,37	21,86
Olchowa	21,73	20,31
Wierzbowa	18,19	16,76
Sosnowa	21,08	19,66



Rys. 3.10.1. Ciepło spalania różnych roślin w zależności od terminu zbioru (Stolarski i in. 2008)

Budowa anatomiczno-morfologiczna i pomiary geometrii

Analiza budowy anatomiczno-morfologicznej surowców roślinnych przeznaczonych na cele energetyczne jest nieodzowna. Dzięki temu możliwe jest bowiem zaplanowanie sposobu przetwarzania materiału oraz dokonanie wyboru jego docelowego przeznaczenia.



Rys. 3.10.2. Ciepło spalania suchej masy robinii akacjowej (Kraszkiewicz 2008)

Przykładem może być drewno. Jednymi z jego warstw są kora i łyko (łub), a jej grubość determinuje wartość ciepła spalania (Rys. 3.10.2). Kora jest wprawdzie wysokoenergetycznym materiałem odpadowym (Tab. 3.10.2) ale powstający z niej popiół (1-3% suchej masy) ma tendencję do żużlowania. Natomiast łyko, ze względu na dużą sprężystość może powodować duże problemy związane z transportem i dozowaniem paliwa. Z tych względów, w zamówieniach dotyczących dostawy biopaliw określone są często limity dotyczące tego rodzaju tkanek roślinnych (np.: udział masowy kory w paliwie max10%, trafiające się w paliwie łyko max 2 x 15 cm: (http://bip.warmia.mazury.pl/powiat_bartoszycki/)).

Istotne różnice wartości opałowej występują również w przypadku różnych części rośliny. Analizę tego typu można znaleźć między innymi w pracy Denisiuka (2005), który badał elementy ślazuwca pensylwańskiego. Jak stwierdza autor, martwa część kwiatowa tej rośliny stanowi około 30% masy całkowitej nadziemnej części karpki i opóźniając termin zbioru możemy ją stracić. Jest to niekorzystne, gdyż dzięki wysokiej wartości opałowej nadaje się ona do wykorzystania na cele energetyczne (Tab. 3.10.3).

Tabela 3.10.3. Średnie wartości parametrów energetycznych karpki ślazuwca pensylwańskiego (Denisiuk 2005)

Część rośliny	Zawartość wody (%)	Ciepło spalania (MJ · kg ⁻¹)	Wartość opałowa (MJ · kg ⁻¹)
Część łodygowa	19,10	17,85	13,55
Część kwiatowa	14,10	17,77	14,72
Cała roślina	18,30	18,00	14,04

Analizę budowy anatomiczno-morfologicznej wraz z dokonaniem pomiaru geometrii poszczególnych tkanek materiałów roślinnych przeprowadza się zazwyczaj na specjalistycznych, nowoczesnych stanowiskach pomiarowych, w przeważającej części wykorzystujących elementy cyfrowej analizy obrazu DIA, co pozwala na stosunkowo szybkie i dokładne przeprowadzenie badań.

Pomiary geometrii obejmują również określenie wymiarów roślin wpływających na pracę maszyn i urządzeń w czasie zbioru i dalszego przetwarzania. Przykładowo, analiza procesu zbioru pędów wierzby przeprowadzona przez Frączka i in. (2010a) pozwoliła na określenie właściwości geometrycznych, które determinują przebieg procesu. Są to: wysokość pędów, średnica pędów na wysokości ścinania, rozpiętość rzędów, szerokość ściętej karpki. Autorzy wykorzystując DIA (program Multiscan v.14.96) określili między innymi zarys rozkrzewienia rzędów trzyletnich krzewów dwóch klonów (Rys. 3.10.3). Informacje te mogą być użyteczne na etapie projektowania maszyn i urządzeń do zbioru wierzby.

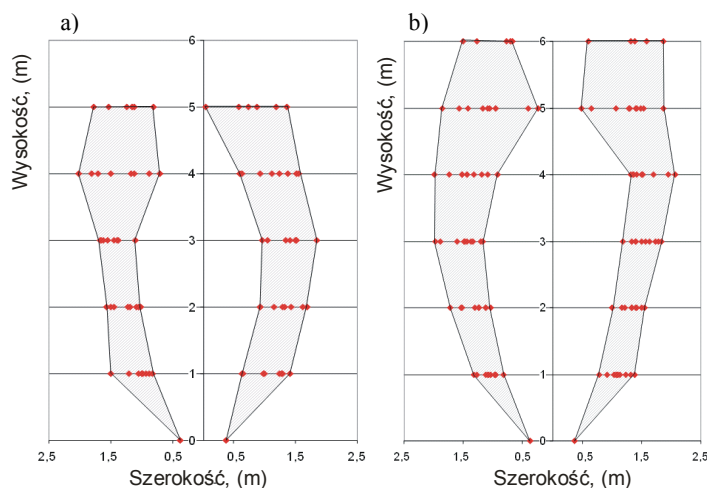
Fizyczne właściwości biomasy istotne w procesach przetwarzania na cele energetyczne

Nieprzetworzona biomasa stwarza duże trudności logistyczne związane z przechowywaniem oraz transportem. Z jednej strony chodzi o utrzymanie niskiej wilgotności (wysoka wartość opałowa, zahamowanie procesów gnilnych i rozwoju grzybów), z drugiej o podniesienie gęstości usypowej (zmniejszenie powierzchni magazynowych, łatwość transportu).

Przetwarzanie biomasy – w zależności od jej stanu wejściowego i przeznaczenia końcowego – obejmuje kilka podstawowych procesów: cięcie (ścinanie, rozdrabnianie), suszenie, kompaktowanie, transport, przesiewanie. W każdym z nich istotne znaczenie mają różne właściwości fizyczne materiału. Dla ich określenia opracowano wiele specjalistycznych metod pomiarowych.

Przykładem może być pomiar jednostkowej pracy cięcia zgodnie z metodyką opracowaną przez Frączka i Mudryka (2006). Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Insight 2 MTS wyposażonej w specjalistyczną przystawkę. Badania wykazały, że jednostkowa praca cięcia, może być w pełni wykorzystana do oceny podatności danej rośliny na rozdrabnianie.

Ważnym problemem jest oszacowanie nakładów energii (mocy) niezbędnej do rozdrobienia materiału roślinnego – zabieg ten jest w zasadzie realizowany w każdym procesie technologicznym, bez względu na końcowe przeznaczenie biomasy. Badania tego typu prowadzone są w wielu ośrodkach. Między innymi określana była moc efektywna niezbędna do cięcia pędów roślin energetycznych przeznaczonych na fermentację beztlenową (Lisowski i in. 2012). Autorzy przeprowadzili badania na topinamburze, rdestowcu sachalińskim, ślázowcu pensylwańskim, palczatce Gerarda, miskancie olbrzymim, prosie różgowatym i spartinie preriowej. Stwierdzono, iż wraz ze wzrostem wilgotności maleje moc jednostkowa. Wskazane jest zatem rozdrabnianie materiału o dużej zawartości wody.

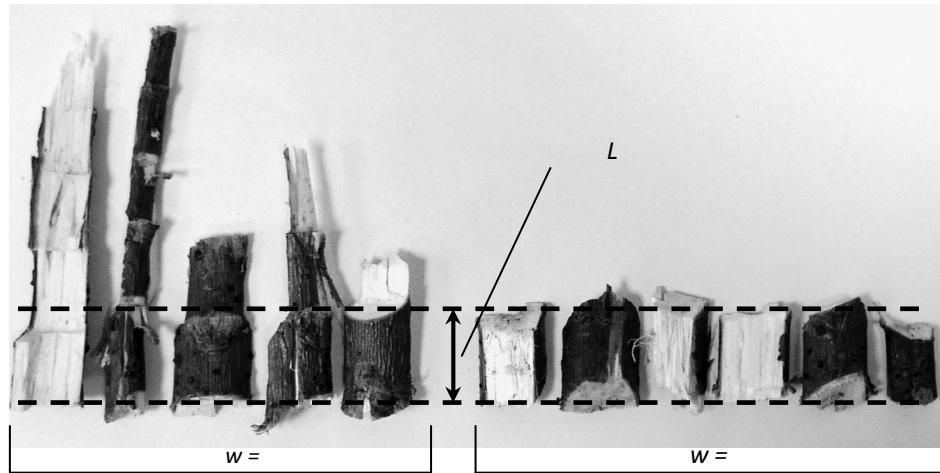


Rys. 3.10.3. Szerokość rozkrzewienia rzędów w zależności od wysokości pędów. a – klon 1052, b – klon 1059 (Frączek i in. 2010a)

Jeszcze wyraźniejsze różnice w nakładach energetycznych ponoszonych na rozdrabnianie materiału występują w przypadku pędów wierzby *Salix viminalis* L. Dodatkowo, wzrost wilgotności powoduje zwiększenie udziału zrębków dłuższych (Frączek i Mudryk, 2009). Jest to spowodowane liniowym przyrostem udziału kory i łyka w przekroju poprzecznym pędów (Frączek i Mudryk, 2008). Jak stwierdzają autorzy dla pędów o średnicy 20 mm, przy zmianie wilgotności z 50% do 22%, grubość wspomnianej warstwy maleje prawie dwukrotnie co skutkuje, również spadkiem udziału z 18% do 10%. Skutkuje to zmianą elastyczności całych pędów – przy dużych wilgotnościach występują często zrębki z nie dociętym łykiem, co zwiększa ich długość całkowitą (Rys. 3.10.4).

Ocenie poddawana jest również łatwość aglomeracji rozdrobnionych materiałów roślinnych. Do tej pory badania nie doprowadziły jednak do sformułowania uniwersalnej teorii aglomeracji biomasy z uwzględnieniem jakości produktu końcowego.

Badania prowadzone przez Frączka i in. (2010c) wykazały, że większe rozdrobnienie biomasy zmniejsza nakłady energetyczne ponoszone na proces kompaktowania. Przykładowo, zmniejszenie średnicy oczek sit rozdrabniających z 10 mm do 4 mm przy peletowaniu wierzby, obniża prawie dwukrotnie nakłady energetyczne ponoszone na proces peletowania. Autorzy tłumaczą to zwiększeniem roli tworzących się zamkniętych wiązań mechanicznych. Ziarna tworzące ośrodek granularny ulegają deformacji, w wyniku której powstają połączenia kształtowe, uniemożliwiające ich przemieszczanie.



Rys. 3.10.4. Przykładowe zrębki wierzby otrzymane z pędów o różnej wilgotności w , L_z – nominalna długość zrębków 25 mm (Frączek i Mudryk 2009)

Badania jakościowe

W przypadku biomasy przeznaczonej na cele energetyczne trudno pominąć badania dotyczące jakości zarówno surowca jak i przetworzonego materiału. Tworzone są w tym celu odpowiednie standardy. Ich utworzeniu sprzyjają prace normalizacyjne prowadzone przez Komitet Techniczny CEN/TC 335 Solid Biofuels. Doprowadziły one do utworzenia licznych norm, w których uwzględniono zagadnienia dotyczących głównie (Frączek i in. 2011a):

- ujednoczenia metod i technik pomiaru
- zastosowania nowych technik pomiarowych
- zwiększenia dokładności stosowanych urządzeń pomiarowych
- poprawę standardów jakościowych, w tym wprowadzenie nowych klas jakościowych
- umożliwienie wprowadzenia innowacyjnych systemów wykorzystania biomasy
- stworzenie warunków prawnych odpowiednich do poziomu rozwoju rynku biopaliw.

Z szerokiej analizy przeprowadzonej przez Frączka i in. (2010a) wynika, że najważniejszymi parametrami, związanymi z jakością paliw kompaktowanych są: wartość opałowa, gęstość oraz trwałość. Mniej ważne są natomiast: zawartość wody, zawartość popiołu oraz udział pyłu.

W pracy Frączka i in. (2011b) przeprowadzono badania jakości peletów i brykietów dostępnych w normalnym obrocie handlowym. Pomiary przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami.

Badania wykazały, że nie wszystkie biopaliwa spełniały wysokie wymagania jakościowe oraz, że istnieje konieczność wprowadzenia obowiązku informowania konsumentów o podstawowych właściwościach oferowanych w handlu biopaliw stałych kompaktowanych. Do oceny wartości użytkowej peletów i brykietów autorzy zaproponowali zastosowanie syntetycznego wskaźnika jakości:

$$S_w = \sum_{i=1}^{i=7} W_i \cdot O_i \quad (2)$$

gdzie: S_w – syntetyczny wskaźnik jakości, W_i – waga i -tego kryterium, O_i – ocena i -tego kryterium

Po przeprowadzeniu analizy, sformułowano siedem kryteriów oceny tworzących wskaźnik syntetyczny, których wagi uzyskano przy wykorzystaniu metody delfickiej (Tab. 3.10.5).

Tabela 3.10.5. Wagi kryteriów oceny jakości biopaliw kompaktowanych (Frączek i in. 2011b)

	Nazwa kryterium						
	Wartość opałowa	Trwałość	Cena	Warunki sprzedaży	Popiół	Gęstość	Wilgotność
Waga kryterium	0,25	0,21	0,19	0,11	0,09	0,08	0,07

Dzięki prowadzonym badaniom możliwe jest wytworzenie standardów jakości, które:

- zapewnią jednakową jakość paliwa,
- zapewnią zgodność prawną i bezpieczeństwo dla wszystkich zainteresowanych uczestników rynku,
- pomogą zharmonizować poszczególne ogniwa w całym łańcuchu dostaw poprzez określenie wskaźników jakości i dopuszczalnych wartości,
- poinformują odbiorców końcowych o charakterystycznych właściwościach produktu.

Są to więc podstawowe narzędzia wzmacniające rynek biopaliw.

PIŚMIENNICTWO

- Curkowski A., Oniszk-Popławska A., 2011. Analiza porównawcza opłacalności ekonomicznej biogazowni rolniczej i utylizacyjnej. Forum Eksploatatora, 3.
- Denisiuk W., 2005. Możliwości wykorzystania Ślazuwca pensylwańskiego w energetyce. Inżynieria Rolnicza, 6(66), 105-113.
- Frączek J. (red.), 2010a. Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowanych wytwarzanych z roślin energetycznych. Wydawnictwo PTIR, Kraków.
- Frączek J. (red.), 2010b. Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne, Wydawnictwo PTIR, Kraków.
- Frączek J., Cieślowski B., Ślipek Z., 2011a. Ocena jakości biopaliw stałych kompaktowanych. Część I: Wymagania jakościowe. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 10/2011, 161-169.
- Frączek J., Kurpaska S., Łapczyńska-Kordon B., 2011. Thermal conversion of biomass. Wydawnictwo PTIR, Kraków.
- Frączek J., Łapczyńska-Kordon B., Ślipek Z., 2011b. Ocena jakości biopaliw stałych kompaktowanych. Część II: Ocena wartości użytkowej. Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. Nr 10/2011, 170-179.
- Frączek J., Mudryk K., 2006. Metoda określenia oporów cięcia pędów wierzby energetycznej. Inżynieria Rolnicza, 13(88), 91-98.
- Frączek J., Mudryk K., 2008. Pomiar powierzchni przekroju pędu wierzby *Salix viminalis* L. z wykorzystaniem DIA. Inżynieria Rolnicza, 11(109), 47-54.
- Frączek J., Mudryk K., 2009. Wpływ wilgotności rozdrabnianych pędów wierzby *salix viminalis* na skład granulometryczny uzyskanych zrębków. Acta Agrophysica, 14(1), 49-60.
- Frączek J., Mudryk K., Wróbel M., 2010c. Nakłady energetyczne w procesie brykietowania wierzby *Salix Viminalis* L. Inżynieria Rolnicza, 3(121), 45-52.
- Kraszkiewicz A., 2008. Ocena ciepła spalania i wartości opałowej wybranych sortymentów drewna robinii akacjowej na tle klas grubości, MOTROL, 10, 67-72.
- Lisowski A., Klonowski J., Chlebowski J., Sypuła M., Kostyra K., Nowakowski T., Strużyk A., Kamiński J. R., Powalka M., 2012. Jednostkowa moc efektywna potrzebna do rozdrobnienia roślin energetycznych przeznaczonych na biogaz. Inżynieria Rolnicza, 2(136), 179-188.
- Niedziółka I., Zuchniarz A., 2006. Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia rolniczego, MOTROL, 8A, 232-237.
- Obidziński S., 2004. Ciepło spalania i wartość opałowa kory drzew liściastych i iglastych. Inżynieria Rolnicza, 5(60), 223-231.
- Pasyniuk P. (red.), 2008. Prawne, technologiczne, środowiskowe i ekonomiczne uwarunkowania rozwoju produkcji odnawialnych źródeł energii w Polsce opartych na biomase pochodzenia rolniczego. IBMER, Warszawa.
- Stolarski M., Szczukowski S., Tworowski J., 2008. Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych. Energetyka, 1(643).

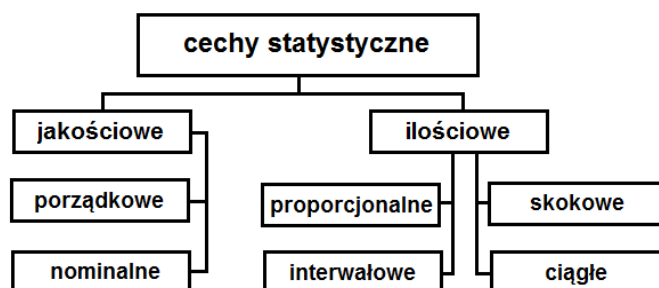
4. METODY

4.1. Metody statystyczne w agrofizyce

Elżbieta Skórska

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Agrofizyka jako nauka interdyscyplinarna wykorzystuje metody statystyczne typowe dla nauk rolniczych, fizycznych, biologicznych. Jej obiektem badawczym jest ekosystem i obiekty biologiczne kształtowane poprzez działalność człowieka. Ze względu na obiekt badawczy bardzo często stosowane są klasyczne metody statystyczne od dawna rozwijane dla potrzeb nauk rolniczych (Eland 1964). Statystyka to nauka, która zajmuje się pozyskiwaniem, prezentacją i analizą danych opisujących różnego rodzaju zjawiska. Spośród cech statystycznych opisujących badane obiekty można wyróżnić cechy jakościowe i ilościowe, które dzielą się na kolejne podgrupy (Rys. 4.1.1).



Rys. 4.1.1. Rodzaje cech statystycznych

Cechy **jakościowe**, których nie można jednoznacznie scharakteryzować za pomocą liczb, a jedynie opisać słowami, dzielą się na porządkowe umożliwiające uszeregowanie danych (np. niski, średni, wysoki) oraz nominalne (np. kolor, odmiana, gatunek). **Cechy ilościowe** (mieralne) dające się wyrazić za pomocą wartości liczbowej i często jednostki, można podzielić na cechy skokowe (np. liczba liści na roślinie, liczba drzew w parku) oraz cechy ciągłe (długość (cm), masa (kg), temperatura ($^{\circ}\text{C}$)). Ponadto wśród cech ilościowych można wyróżnić cechy proporcjonalne nie dopuszczające wartości ujemnych (temperatura (K), czas trwania (s), rezystancja (Ω)) oraz interwałowe (data, temperatura ($^{\circ}\text{C}$)).

Z podziałem cech na jakościowe i ilościowe wiąże się stosowanie określonych metod statystycznych, którym poddawane są zebrane wyniki. Badania polegające na pozyskiwaniu danych na temat rozkładu cechy w populacji, mają charakter:

- **pełny** – obejmujące całą populację, czyli skończoną zbiorowość generalną;
- **częściowy** – przeprowadzane na wybranych (zazwyczaj losowo) elementach populacji, czyli próbie losowej, reprezentatywnej dla populacji.

Przeprowadzenie badania na populacji eliminuje konieczność użycia metod wnioskowania statystycznego (uogólniania wyników z próby na całą populację), jednak badania prowadzone w zakresie agrofizyki są zwykle wykonywane nie na całych populacjach, ale na próbach, dlatego metody wnioskowania statystycznego stanowią dobre narzędzie do udowadniania stawianych hipotez badawczych oraz wyciągania wniosków. Wyróżnia się dwie grupy metod uogólniania wyników, definiujące jednocześnie dwa działy wnioskowania statystycznego:

- **estymacja** – szacowanie wartości nieznanymi parametrów rozkładu;
- **weryfikacja hipotez statystycznych** – sprawdzanie poprawności przypuszczeń.

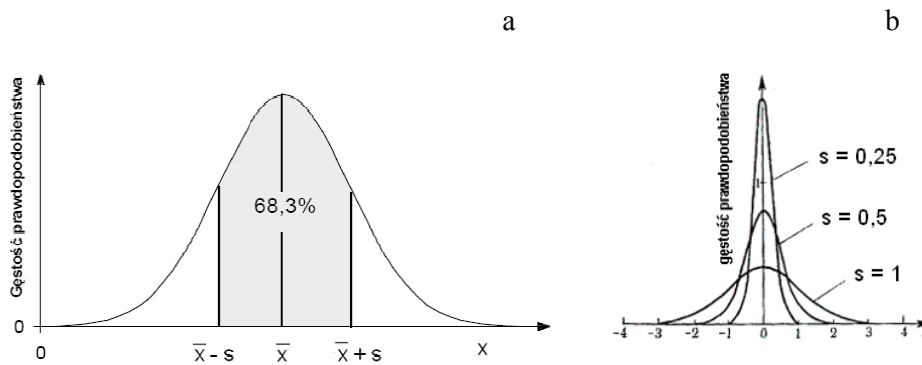
Estymacja zależnie od sposobu szacowania dzieli się na dwie grupy:

- estymację punktową – oceną wartości szukanego parametru jest konkretna wartość uzyskana z próby (estymator),
- estymację przedziałową – operuje się pojęciem przedziału ufności, tj. przedziału, do którego z pewnym prawdopodobieństwem należy szukana wartość.

Badaną zbiorowość statystyczną opisuje się zwykle za pomocą **rozkładu empirycznego**, który przedstawia gęstość prawdopodobieństwa, tj. częstotliwość występowania wartości uzyskanej w badaniu. Istnieje wiele rozkładów o różnych kształtach, z których najbardziej znany jest **rozkład normalny** obrazujący krzywą dzwonową (Rys. 4.1.2a). Najbardziej prawdopodobne jest wystąpienie wartości średniej \bar{x} , zaś wartości mniejszej bądź większej od średniej – mniej. Rozkład ten jest symetryczny wokół średniej arytmetycznej \bar{x} , a 68,3% wszystkich możliwych wartości x jest zawarta w przedziale $(\bar{x} - s, \bar{x} + s)$, gdzie s oznacza odchylenie standardowe. Jest ono miarą zmienności rozkładu, określającą „smukłość” krzywej: im jest większe, tym krzywa ta jest bardziej spłaszczona, a wartości x – bardziej oddalone od średniej (Rys. 4.1.2b).

Parametrami rozkładu empirycznego są wielkości liczbowe służące do opisu struktury zbiorowości, a można wśród nich wyróżnić następujące miary:

- **położenia**: średnia arytmetyczna, modalna, kwantyle, mediana, decyle;
- **zmienności**: wariancja, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności;
- **asymetrii**: skośność, pozycyjny współczynnik asymetrii;
- **skupienia**: kurtoza.



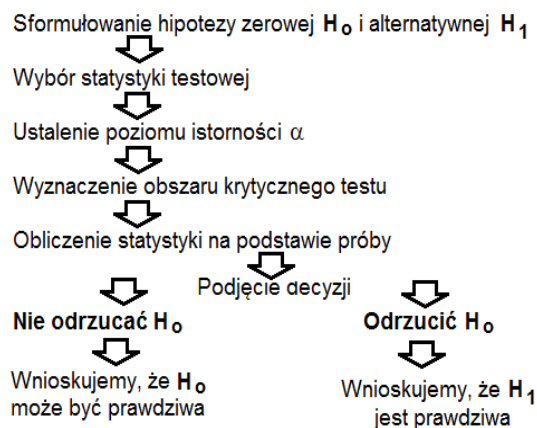
Rys. 4.1.2. Rozkład normalny (a) i różne wartości odchylenia standardowego (b)

Drugim narzędziem wnioskowania statystycznego jest **weryfikacja hipotez statystycznych**. Hipotezą statystyczną jest dowolne przypuszczenie dotyczące parametrów lub typu rozkładu określonego zbioru populacji generalnej. Hipotezy statystyczne mogą być dwojakiego rodzaju:

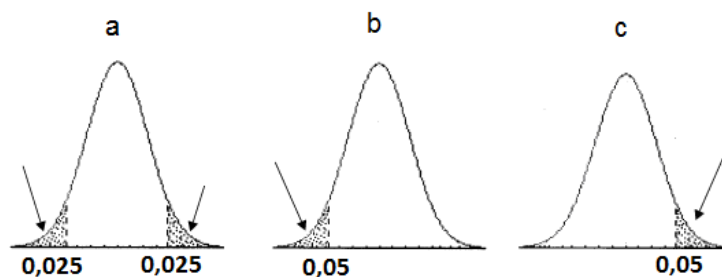
- parametryczne – precyzujące wartość parametru w rozkładzie populacji generalnej znanego typu;
- nieparametryczne – precyzujące typ rozkładu populacji generalnej lub inne.

W statystyce na ogół nie ma absolutnej pewności co do słuszności pewnej hipotezy, ponieważ bazuje ona na ustalonym z góry prawdopodobieństwie, zwanym **poziomem istotności**. W agrofizyce podobnie jak w agronomii zwykle przyjmuje się jego wartość równą 0,05 (5%). Weryfikacja hipotezy statystycznej polega na zastosowaniu wybranej statystyki, tj. **testu statystycznego**, stanowiącego regułę postępowania, która każdej możliwej próbie losowej przyporządkowuje decyzję przyjęcia lub odrzucenia sprawdzanej hipotezy zerowej. **Hipoteza zerowa** (H_0) to podstawowa hipoteza statystyczna sprawdzana za pomocą testu, zaś **hipoteza alternatywna** (H_1) jest hipotezą do niej przeciwną. Procedura sprawdzania postawionej hipotezy zerowej ma zwykle następujący przebieg: stawiamy pewną hipotezę dotyczącą populacji, pobieramy próbę, badamy ją i na tej podstawie akceptujemy lub odrzucamy postawioną hipotezę (Rys. 4.1.3).

Jeżeli obliczona przez nas wartość statystyki testowej znajdzie się w obszarze, krytycznym – na krańcach rozkładu, to weryfikowaną hipotezę H_0 odrzucamy. Wielkość obszaru krytycznego wyznacza poziom istotności α , a jego położenie określone jest przez hipotezę alternatywną. Obszar krytyczny, zależnie od postawionej hipotezy oraz zastosowanego testu, może mieć charakter dwustronny bądź jednostronny (Rys. 4.1.4).



Rys. 4.1.3. Przebieg procedury weryfikacji hipotezy statystycznej



Rys. 4.1.4. Obszar krytyczny (zakreskowany) a) dwustronny, b) lewostronny, c) prawostronny

Przy podejmowaniu decyzji dotyczącej sprawdzanej hipotezy zerowej H_0 możemy popełnić **błąd I rodzaju**, równy z góry założonemu poziomowi istotności α , w przypadku odrzucenia H_0 , gdy jest prawdziwa, na rzecz alternatywnej H_1 . Sytuacja ta jest najkorzystniejsza, gdyż prawdopodobieństwo popełnienia błędnej decyzji jest niewielkie (na ogół $\alpha = 0,05$), dlatego staramy się tak sformułować H_0 , aby ją odrzucić. **Błąd II rodzaju** β polega na przyjęciu hipotezy zerowej, gdy jest ona fałszywa, przy czym obliczenie wartości tego błędu nie jest łatwe (Tab. 4.1.1).

W podręcznikach statystyki matematycznej omawianych jest bardzo wiele testów i wciąż są tworzone nowe. Można je podzielić na testy parametryczne do weryfikacji hipotez parametrycznych dotyczących parametrów rozkładu badanej cechy w populacji generalnej oraz testy nieparametryczne.

Tabela 4.1.1. Błędy popełniane przy weryfikacji hipotez statystycznych

Hipoteza zerowa (H_0)	Decyzja	
	przyjąć H_0	odrzuć H_0
Prawdziwa	Decyzja prawidłowa	Błąd I rodzaju (α)
Falszywa	Błąd II rodzaju (β)	Decyzja prawidłowa

Testy parametryczne najczęściej weryfikują hipotezy o takich parametrach populacji jak średnia arytmetyczna, wskaźnik struktury i wariancja. Testy te konstruowane są przy założeniu znajomości postaci rozkładu w populacji generalnej i większość z nich zakłada, że rozkład badanej cechy w populacji jest rozkładem normalnym.

Testy nieparametryczne nie wymagają żadnych założeń dotyczących postaci badanych zmiennych w populacji i służą do weryfikacji hipotez dotyczących m.in. zgodności rozkładu cechy w populacji z określonym rozkładem teoretycznym, zgodności rozkładów w dwóch populacjach, a także losowości doboru próby. Gdy próby są małe, a założenie normalności rozkładu w populacji nie jest spełnione, są one stosowane w zastępstwie testów parametrycznych.

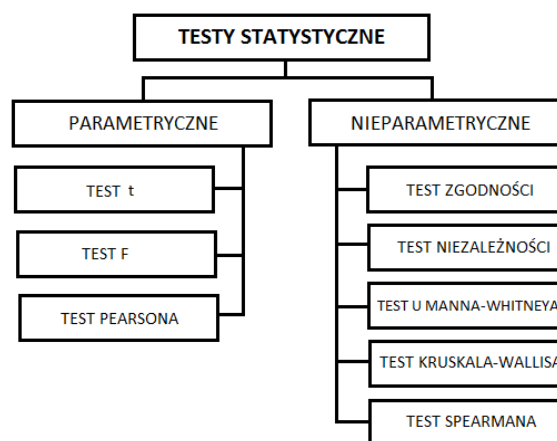
Obecnie do obliczeń statystycznych wykorzystywane są programy komputerowe jak np. Statistica, SPSS, SAS, dzięki którym procedura weryfikacji hipotez jest znacznie uproszczona, ponieważ wyniki podawane są natychmiast, dzięki czemu badacz skupia uwagę na ich interpretacji (Rys. 4.1.5).

**Rys. 4.1.5.** Etapy weryfikacji hipotezy statystycznej za pomocą pakietu statystycznego

Programy te podają także wartość tzw. **obserwowanego poziomu istotności p** – jest to minimalna wartość, przy której następuje odrzucenie hipotezy zerowej. Aby przyjąć tę hipotezę, poziom istotności należy ustalić poniżej wartości p.

Mocą testu statystycznego jest wartość $1 - p$, czyli prawdopodobieństwo odrzucenia hipotezy zerowej, gdy jest ona fałszywa. Moc testu zależy od konkretnych ustawień testu: liczności próby, rozproszenia wyników w próbie, przyjętego poziomu istotności, przyjętych w teście założeń oraz od wielkości efektu, którego wykrycie interesuje badacza. Moc testów nieparametrycznych jest mniejsza niż testów parametrycznych.

Najczęściej wykorzystywane testy statystyczne w agrofizyce przedstawia rysunek 4.1.6.



Rys. 4.1.6. Testy statystyczne wykorzystywane w agrofizyce

W celu doboru do danych odpowiedniego testu statystycznego, należy przede wszystkim sprawdzić zgodność otrzymanego rozkładu empirycznego z rozkładem normalnym. W przypadku gdy pobrana próba liczy mniej niż 100 elementów, najlepiej do tego celu nadaje się nieparametryczny **test Szapiro-Wilka**, dostępny w większości pakietów statystycznych. Przykładowo, chcemy na poziomie istotności 0,05 sprawdzić hipotezę zerową o normalności rozkładu masy nasion (g) w populacji generalnej dla następujących 20 danych stanowiących badaną próbę: 5,1; 5,2; 6,1; 4,8; 6,0; 7,1; 7,0; 5,0; 4,9; 7,3; 8,7; 4,9; 5,4; 5,1; 4,8; 5,9; 8,0; 7,2; 7,1; 5,2. Po wpisaniu danych do arkusza programu Statistica i wybraniu kolejno opcji ‘Statystyka’ ... ‘Statystyki podstawowe i tabele’ ... ‘Statystyki opisowe’ ... ‘Normalność’ ... ‘Test Shapiro-Wilka’ ... ‘Histogramy’ otrzymujemy wartość testu $W = 0,872$ i obliczoną wartość prawdopodobieństwa $p = 0,013$. Oznacza to, że hipotezę zerową o normalności rozkładu można odrzucić na rzecz hipotezy alterna-

tywnej, że rozkład empiryczny nie jest zgodny z normalnym. A skoro rozkład nie jest zgodny z normalnym, to do dalszych analiz dane te należy poddać takiej transformacji matematycznej, aby uzyskać zgodność z rozkładem normalnym, a jeśli to nie da efektu, stosować testy nieparametryczne.

W agrofizyce podobnie jak i w naukach rolniczych najczęściej wykonuje się:

- porównywania dwóch średnich badanych cech,
- porównywania kilku średnich badanych cech,
- badania współzależności między cechami, tzw. korelacji.

Gdy chcemy **porównać dwie niezależne średnie** wartości prób, a oba rozkłady danych są zgodne z normalnym, stosujemy test t (test t Studenta) dla prób niezależnych. Przykładowo, chcemy sprawdzić hipotezę zerową o równości średnich dwóch prób A i B o wartościach dla A: 5,9; 6,2; 6,7; 8,3; 7,1; 6,9 i dla B: 5,1; 5,2; 6,1; 6,0; 6,5. Sprawdzamy, że rozkłady obu prób są zgodne z rozkładem normalnym. Wartości testu Shapiro-Wilka oraz p wynoszą odpowiednio dla A:

$W = 0,936$, $p = 0,624$, a dla B: $W = 0,897$, $p = 0,395$, zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o normalności rozkładów. Wartości średnie prób A i B wynoszą odpowiednio 5,8 i 6,8. W programie Statistica wybieramy kolejno ‘Statystyka’... ‘Statystyki podstawowe i tabele’... ‘Test t dla prób niezależnych (wzgl. zm.)’, wybieramy obie próby potraktowane jako ‘zmienne’ oraz Podsumowanie: testy t. Odczytana wartość testu t wynosi 2,37 oraz $p = 0,041$ wskazuje na to, że hipotezę zerową można odrzucić na rzecz hipotezy alternatywnej mówiącej o tym, że obie średnie różnią się istotnie, gdyż obliczona wartość p jest mniejsza niż założony z góry poziom istotności 0,05.

Gdyby nie był spełniony warunek normalności rozkładu jednej lub obu prób, wtedy można zastosować nieparametryczny **test U Manna-Whitneya**. W programie Statistica jest on dostępny poprzez wybranie kolejno opcji ‘Statystyka’... ‘Statystyki nieparametryczne’... ‘Porównanie dwóch prób niezależnych’... Test U Manna-Whitneya. Dalej postępujemy podobnie jak w poprzednio opisanym teście.

W przypadku, gdy próby są ze sobą powiązane, a dotyczy to sytuacji, gdy badamy jakąś cechę (masą nasion) przed i po jakimś zabiegu, którym może być np. napromieniowanie UV, wtedy w przypadku spełnienia warunku normalności rozkładu stosujemy parametryczny **test t dla prób zależnych** poprzez wybranie kolejno opcji ‘Statystyka’... ‘Statystyki podstawowe i tabele’... ‘Test t dla prób zależnych’. Gdy nie jest spełniony warunek zgodności rozkładu z próby z rozkładem normalnym, wykorzystujemy ‘bliźniaczy’ test nieparametryczny o nazwie ‘Test kolejności par Wilcoxon’a’.

Znacznie częściej rozwiązywanym problemem jest **porównywanie kilku średnich** ze sobą. Służy do tego analiza wariancji, tzw. ANOVA, którą stosujemy,

gdy interesuje nas wpływ jednego czynnika na przebieg eksperymentu. Test analizy wariancji można stosować wówczas, gdy rozkłady populacji są normalne lub zbliżone do normalnego oraz mają jednakowe wariancje. Może bowiem zdarzyć się tak, że wszystkie populacje mają rozkłady normalne i jednakowe wariancje, ale różnią się wartościami średnimi. Równość wariancji w pakiecie Statistica sprawdzamy zwykle za pomocą testu Levene'a. Bardziej złożonymi są doświadczenia z wieloma oddziaływującymi czynnikami, które rozwiązuje wieloczynnikowa analiza wariancji MANOVA. Metoda ta pozwala uwzględnić efekt łącznego oddziaływania dwóch lub więcej zmiennych niezależnych na zmienną zależną poprzez porównanie wielu średnich poszczególnych wariantów. W przypadku takich porównań stawiamy hipotezę zerową, że między średnimi populacji, z których zostały pobrane próby nie ma różnic: $H_0: m_1 = m_2 = \dots = m_n$. Jeśli w wyniku obliczeń uda się odrzucić hipotezę zerową, możemy dalej analizować, które średnie różnią się między sobą. Służą do tego tzw. *testy post hoc*, z których w agrofizyce najczęściej wykorzystywany jest test Tukey'a.

Jeśli którykolwiek z założeń analizy wariancji nie jest spełniony, do porównań wielu średnich możemy zastosować nieparametryczny test Kruskala-Wallisa.

Do zbadania współzależności między dwiema cechami wykorzystujemy *analizę korelacyjną* oceniającą siłę i kierunek zależności. Wykrycie zależności jest możliwe, jeżeli dane empiryczne przedstawimy w postaci par dwóch cech jednocześnie. W przypadku, gdy obie cechy mają rozkłady zgodne z normalnym, do oceny współzależności stosujemy współczynnik *korelacji liniowej Pearsona*. Jeśli warunek normalności nie jest spełniony, ale cechy, niekoniecznie mierzalne, dają się uporządkować przez nadanie im kolejnego numeru, stosujemy nieparametryczny odpowiednik w postaci współczynnika *korelacji rangowej Spearmana*. Uporządkowanie określa się bowiem mianem rangi, a procedurę – rangowaniem. Oba te współczynniki (r_{xy}) pozwalają badać korelacje między dwoma cechami mierzalnymi, przyjmując wartości z przedziału od -1 do $+1$. Dodatni znak współczynnika korelacji wskazuje na dodatnią korelację między cechami, co oznacza, że wzrostowi jednej cechy towarzyszy na ogół wzrost wartości drugiej cechy. Ujemny znak współczynnika korelacji wskazuje na ujemną korelację między zmiennymi, czyli wzrostowi jednej cechy towarzyszy na ogół spadek wartości drugiej cechy. Współczynnik korelacji równy zero może świadczyć o zupełnym braku związku korelacyjnego między badanymi cechami. Należy jednak pamiętać, że pojęcie korelacji różni się od związku przyczynowego.

Orientacyjnie przyjmuje się, że siła korelacji między dwoma cechami jest:

- niewyraźna, gdy $0 < r_{xy} < 0,2$;
- wyraźna, ale niska, gdy $0,2 < r_{xy} < 0,4$;

- umiarkowana, gdy $0,4 < r_{xy} < 0,7$;
- znacząca, gdy $0,7 < r_{xy} < 0,9$;
- bardzo silna, gdy $0,9 < r_{xy} < 1$.

Dla ilustracji zbadajmy zależność między łączną ilością opadów (mm) od maja do sierpnia a plonem trawy ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) zebranej z pastwiska w 6 kolejnych latach:

Ilość opadów (mm)	222	178	96	278	118	357
Plon trawy ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	3,01	3,66	2,01	4,21	2,52	4,08

Stawiamy hipotezę zerową o braku zależności między badanymi cechami, czyli że wartość współczynnika korelacji wynosi zero. Po wybraniu w programie Statistica kolejnych opcji ‘Statystyka’ ... ‘Statystyki nieparametryczne’ ... ‘Korelacje (Spearmana)’ otrzymamy wartość współczynnika korelacji równą 0,886 oraz $p = 0,019$, co pozwala na odrzucenie hipotezy zerowej, zatem istnieje dodatnia korelacja między plonem trawy a opadami na badanym terenie w ciągu 6 lat.

Regresja w statystyce matematycznej oznacza empirycznie wyznaczoną zależność funkcyjną między skorelowanymi zmiennymi losowymi. Po ustaleniu, że między badanymi cechami istnieje niezbyt słaba korelacja, przystępuje się do znalezienia funkcji regresji, która pozwala na przewidywanie wartości jednej cechy przy założeniu, że druga cecha przyjęła określoną wartość. W praktyce największe znaczenie ma regresja liniowa, odpowiadająca liniowej zależności pomiędzy analizowanymi cechami. Przy bardziej skomplikowanych zależnościach stosuje się regresję nieliniową, np. kwadratową. Współczynnik regresji dodatni oznacza, że wraz ze wzrostem zmiennej niezależnej o jednostkę zmienna zależna wzrośnie o określoną liczbę jednostek; w tym przypadku funkcja regresji jest rosnąca. Ujemna wartość współczynnika regresji wskazuje na to, że przy jednostkowym wzroście zmiennej niezależnej zmienna zależna zmaleje średnio o określoną liczbę jednostek (funkcja regresji malejąca). Współczynnik regresji równy zero świadczy o tym, że zmienna niezależna nie wywiera żadnego wpływu na zmienną zależną.

Poza wyżej opisanymi klasycznymi metodami statystyki matematycznej coraz bardziej popularne w agrofizyce stają się **analizy wielowymiarowe**. Sprzyjają temu z jednej strony dostępne powszechnie pakiety statystyczne z odpowiednimi modułami obliczeniowymi, a z drugiej – coraz większa łatwość pozyskiwania dużych zbiorów danych dzięki stosowaniu skomputeryzowanej aparatury pomiarowej. Poniżej zostaną omówione dwie takie analizy: analiza skupień oraz analiza głównych składowych PCA.

Analiza skupień jest narzędziem analizy danych służącym do grupowania obiektów (jednostek) w rozłączne grupy, zwane skupieniami. Obiekty należące do

danego skupienia powinny być „podobne” do siebie, a obiekty należące do różnych skupień powinny być z kolei możliwie mocno „niepodobne” do siebie. Grupowanie danych odbywa się przez zastosowanie algorytmów hierarchicznych lub aglomeracyjnych oraz różnych metod wiązania skupień: pojedynczego wiązania (najbliższego sąsiedztwa), pełnego wiązania (najdalszego sąsiedztwa), średniego wiązania bądź metodą Warda. Graficzną ilustracją przebiegu aglomeracji jest wykres zwany **dendrogramem** w postaci binarnego drzewa, którego węzły reprezentują skupienia, a liście pojedyncze obiekty. Liście umieszczone są na poziomie zerowym, pozostałe węzły drzewa umieszczone są na wysokości odpowiadającej mierze niepodobieństwa pomiędzy skupieniami (Marek 1989). Analiza skupień znalazła zastosowanie w agrofizyce m.in. do klasyfikacji materiału suszonego za pomocą promieniowania mikrofalowego i podczerwonego (Rząca 2009).

Analiza czynnikowa PCA to metoda redukcji liczby cech (zmiennych) w sytuacji, gdy każdy badany obiekt opisany jest za pomocą wielu z nich. Dążymy do wykrycia najważniejszych wymiarów opisujących badane obiekty poprzez określenie niewielkiej liczby nowych zmiennych – czynników, które:

- wystarczają do opisu (zawierają większość informacji);
- są od siebie niezależne (nieskorelowane);
- ujawniają niewidoczną inaczej strukturę danych;
- mają interesującą, przejrzystą interpretację.

Analiza ta może służyć do wykrywania ‘ukrytej’ struktury w złożonym opisie. Jeśli dwie zmienne są ze sobą skorelowane, to wariancję każdej z nich można podzielić na wariancję wspólną i wariancję właściwą każdej tych zmiennych z osobna. Wspólną wariancję można interpretować jako tę część informacji, która jest powielona w obu zmiennych. Wspólna wariancja (w % całej wariancji) określona jest przez kwadrat współczynnika korelacji. Wszystkie zmienne wejściowe do analizy czynnikowej powinny być traktowane na tych samych prawach, co wymaga wykonania **standaryzacji**. Całkowita wariancja zbioru jest sumą wariancji wszystkich zmiennych. Po standaryzacji każda zmienna ma wariancję równą 1. Liczbę nowych czynników określamy arbitralnie za pomocą wybranych kryteriów. Najprostsze z nich mówi, aby odrzucić te czynniki, których wartości własne wynoszą poniżej 1, bo wtedy taki czynnik wyjaśnia mniejszą część wariancji niż pierwotne dane. Drugie kryterium określa część wyjaśnianej wariancji na określonym poziomie np. 70%. Trzecie kryterium o charakterze graficznym wykorzystuje tzw. wykres osypiska. Etapy analizy czynnikowej to: standaryzacja wszystkich danych wejściowych; wstępna analiza tabeli korelacji; otrzymanie pierwszego rozwiązania; decyzja o rodzaju rotacji; decyzja, ile czynników zostawiamy do dalszej pracy; interpretacja czynników; nadanie nazw czynnikom.

Analiza PCA została zastosowana m.in. do klasyfikacji jabłek o różnej jędrności (Kuczyński 2003) i do wyodrębnienia dwóch grup ciastek różniących się właściwościami akustycznymi podczas ich łamania (Marzec i in. 2012).

PIŚMIENNICTWO

- Elandt R., 1964. Statystyka matematyczna w zastosowaniu do doświadczalnictwa rolniczego. PWN, Warszawa. <http://www.malgorzata-nowacka.waw.pl> (14.08.2013).
- Kuczyński A., 2003. Ocena jędrności przechowywanych jabłek przy zastosowaniu statystycznej metody redukcji wymiarów w modelu. *Acta Agrophysica*, 2, 787-802.
- Marek T., 1989. Analiza skupień w badaniach empirycznych. PWN, Warszawa.
- Marzec A., Kowalska H., Suwińska S., 2012. Wpływ rodzaju i zawartości tłuszczu na właściwości akustyczne ciastek kruchych. *Acta Agrophysica*, 19, 611-619.
- Rząca M., 2009. Studia nad wykorzystaniem promieniowania podczerwonego i mikrofalowego do suszenia jabłek. Praca doktorska. Wydział Nauki o Żywności SGGW, Warszawa.

4.2. Fizyczne metody badania gleb i środowiska przyrodniczego

Wojciech Skierucha, Andrzej Wilczek, Agnieszka Szyplowska

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Wstęp

Fizyczne metody badania gleb i środowiska przyrodniczego, jak każde zadanie badawcze związane z obiektami przyrodniczymi, muszą łączyć elementy pomiaru i modelowania. Takie podejście jest typową nowoczesną metodą poznania wywodzącą się z filozofii Bacona, który doceniał wagę zarówno eksperymentu jak i rozumowania w rozwoju nauki. Obserwacja, pomiar lub monitoring służą do zebrania danych, które będą interpretowane przy pomocy ogólnie znanych praw fizycznych opisanych odpowiednimi modelami matematyczno-fizycznymi. Budując model musimy zdecydować, jakie procesy wchodzące w skład danego zjawiska mają wpływ na końcowy efekt, który chcemy odzwierciedlić za pomocą modelu, a które procesy można pominąć. Po zbudowaniu modelu kolej na jego weryfikację. Trzeba zatem zaprojektować odpowiednie eksperymenty — dopóki wyniki eksperymentów nie przeczą wnioskowi płynącemu z modelu, dopóty model możemy uważać za poprawny.

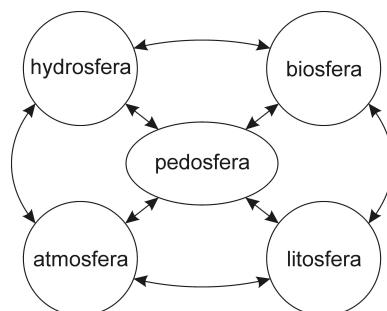
Gleba i środowisko przyrodnicze badane są przy użyciu wielu metod fizycznych. Wynika to z oczywistej ich złożoności, których tajniki zgłębiane są przez człowieka od początku istnienia w celach poznawczych i użytecznych. Poniżej przedstawiono wybiórczo zasady fizycznego pomiaru kilku wielkości związanych z fazą stałą i ciekłą gleby (Lal and Shukla 2004).

Badawcze obiekty przyrodnicze

Środowisko przyrodnicze stanowi system, którego elementy są wzajemnie zależne tworząc zintegrowaną całość. Wyróżnikiem tej całości jest funkcja jaką pełni środowisko przyrodnicze w rozwoju i utrzymaniu życia, a przede wszystkim w zrównoważonym zaspokajaniu potrzeb człowieka.

Centralnym elementem środowiska przyrodniczego jest pedosfera, czyli powierzchniowa warstwa skorupy ziemskiej, składająca się z części mineralnych i organicznych powstałych w wyniku oddziaływania czynników glebotwórczych, takich jak klimat, woda, drobnoustroje glebowe, rośliny, zwierzęta oraz działalność człowieka. Pedosfera znajduje się w dynamicznej zależności z innymi elementami środowiska glebowego, czyli litosferą, atmosferą, hydrosferą oraz bios-

ferą (Rys. 4.2.1) i stanowi ośrodek transferu masy i energii między elementami środowiska glebowego.



Rys. 4.2.1. Elementy środowiska przyrodniczego związane z glebą

Litosfera dostarcza materiału glebowego poprzez wietrzenie skał i ich rozkład pod wpływem roztworów glebowych przesiąkających z gleby. Masa i energia w glebie ulegają ciągłym przemieszczaniom i przekształceniom w obrębie hydrosfery i biosfery w wyniku różnicy temperatury, wilgotności, przemian chemicznych, biologicznych oraz działalności człowieka. W glebie deponowane są nowe składniki, ale pod wpływem erozji ubywa innych. Powierzchnia gleby oraz roślinność biorą czynny udział w transporcie masy i energii między glebą i atmosferą poprzez ewaporację (parowanie), ewapotranspirację, fotosyntezę i opady deszczu. Szczególną rolę w tej wymianie spełnia woda, która jest nośnikiem składników odżywczych dla flory i fauny jak również wpływa na lokalny i globalny klimat. Transport masy i energii w glebie osiąga równowagę dynamiczną, która jest podstawą jej żyzności i odnawialności.

Ze względu na dynamikę procesów zachodzących w środowisku przyrodniczym oraz na wzajemne zależności między poszczególnymi jego elementami, w większości przypadków parametry opisujące jego stan powinny być monitorowane w sposób ciągły. Równie ważnym aspektem jest wybór reprezentatywnych lokalizacji, w których zainstalowany będzie system monitoringu, co wynika z niejednorodności obiektów pomiaru oraz ich zmienności czasowo-przestrzennej.

Obiektami badań fizycznych są gleba i środowisko przyrodnicze, w szczególności strefa aeracji (ang. vadose zone) gleby, której wpływ na inne elementy środowiska przyrodniczego, tzn. wodę gruntową, wodę powierzchniową oraz powietrze przy powierzchni gruntu jest ważny z punktu widzenia wpływu człowieka na środowisko przyrodnicze.

Gleba jako wielofazowy element środowiska przyrodniczego

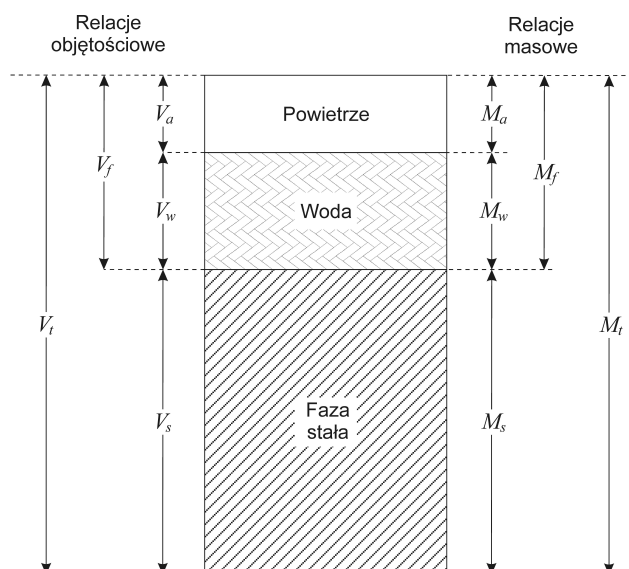
Gleba jest niejednorodnym, wielofazowym, zdyspergowanym, ziarnistym i porowatym systemem, który nigdy nie osiąga stanu równowagi w czasie i przestrzeni. Procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne przebiegają w niej nieprzerwanie, co czyni ją systemem żywym. Dyspersyjna natura gleby i wynikająca z tego aktywność międzyfazowa skutkują takimi zjawiskami jak adsorpcja wody i składników chemicznych, zjawiskami kapilarnymi, wymianą jonów oraz pęcznieniem i kurczeniem. Trzy fazy materii podstawowej reprezentowane są w glebie jako: faza stała w postaci matrycy glebowej, faza ciekła jako roztwór wodny w glebie oraz faza gazowa jako atmosfera glebowa (Hillel 2012).

Podstawowe właściwości fizyczne gleby to: tekstura, struktura, barwa, przepuszczalność wodna i powietrzna, zwięzłość wskazująca na stopień (siłę) związania poszczególnych cząstek glebowych ze sobą, stan natlenienia gleby. Większość właściwości fizycznych gleby i środowiska przyrodniczego nie można zmierzyć w sposób bezpośredni tak jak oceniając kolor danej warstwy gleby, który identyfikuje określony poziom profilu glebowego. Właściwości fizyczne gleby mające wpływ na jej żyzność wyznacza się na podstawie pomiarów wielu parametrów gleby, w szczególności realizowanych metodami fizycznymi.

Objętościowe i masowe elementy gleby jako systemu trójfazowego przedstawia rysunek 4.2.2. Posłuży on do przedstawienia w tabeli 4.2.1 relacji między podstawowymi wielkościami opisującymi fizyczne właściwości gleb mineralnych. Gleby zawierające dużą ilość substancji organicznej, takie jak torfy, mogą absorbować więcej wody niż gleby mineralne.

Gęstość właściwa ρ_s dla gleb ciężkich oraz zawierających tlenki żelaza przekracza wartość $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a dla gleb zawierających substancje organiczne o małej gęstości, wartość ρ_s jest mniejsza niż $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Powszechnym narzędziem do pomiaru gęstości właściwej gleby jest piknometr wodny. Objętość gleby V_s określana jest przez pomiar masy cieczy o znanej objętości (np. wody), która jest wypierana z naczynka po całkowitym zanurzeniu gleby, której masę M_s wyznaczono wcześniej przy pomocy precyzyjnej wagi.

Gęstość gleby suchej ρ_b wyrażana jest jako stosunek masy fazy stałej gleby do całkowitej objętości gleby. Wielkość ta zależy od tego, czy gleba jest luźna bądź ugnieciona, oraz od podatności gleby na pęcznienie i kurczenie. Wartość ρ_b zawsze jest mniejsza od ρ_s , ponieważ przestrzeń porów w glebie nigdy nie osiąga zerowej objętości. Gęstość chwilowa gleby ρ_t wyraża całkowitą masę gleby w jednostce objętości. Parametr ten zależy od wilgotności gleby.



Rys. 4.2.2. Objętościowe i masowe elementy gleby jako systemu trójfazowego. V_a , V_w , V_s i V_f to objętości odpowiednio powietrza, wody, fazy stałej i porów w próbce gleby, której objętość całkowita wynosi V_t . M_a , M_w , M_s i M_f to masa odpowiednio powietrza, wody, fazy stałej i zawartości porów w próbce gleby, której masa całkowita wynosi M_t .

Tabela 4.2.1. Podstawowe wielkości masowe i objętościowe opisujące glebę mineralną jako materiał trójfazowy

Nazwa, symbol (jednostka)	Formuła	Zakres zmienności	Referencyjna metoda pomiaru
Gęstość właściwa gleby, ρ_s ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_s = M_s/V_s$	2600-2700 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Metoda piknometryczna
Gęstość gleby suchej, ρ_b ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_b = M_s/V_t = M_s/(V_s + V_a + V_w)$	1100-1900 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Metoda termogravimetryczna
Gęstość chwilowa gleby, ρ_t ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_t = M_t/V_t = (M_s + M_w)/V_t = (M_s + M_w)/(V_s + V_a + V_w)$	1100-1900 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Metoda wagowa
Porowatość gleby, f (-/-)	$f = V_f/V_t = (V_a + V_w)/(V_s + V_a + V_w)$	0,35-0,9 (-/-)	Metoda termogravimetryczna
Wilgotność masowa gleby, w , (-/-)	$w = M_w/M_s$	0-0,6 (-/-)	Metoda termogravimetryczna
Wilgotność objętościowa gleby, θ (-/-)	$\theta = V_w/V_t = V_w/(V_s + V_f)$	0-0,6 (-/-)	Metoda termogravimetryczna

V_a , V_w , V_s i V_f to objętości odpowiednio powietrza, wody, fazy stałej i porów w próbce gleby, której objętość całkowita wynosi V_t . M_a , M_w , M_s i M_f to masa odpowiednio powietrza, wody, fazy stałej i zawartości porów w próbce gleby, której masa całkowita wynosi M_t .

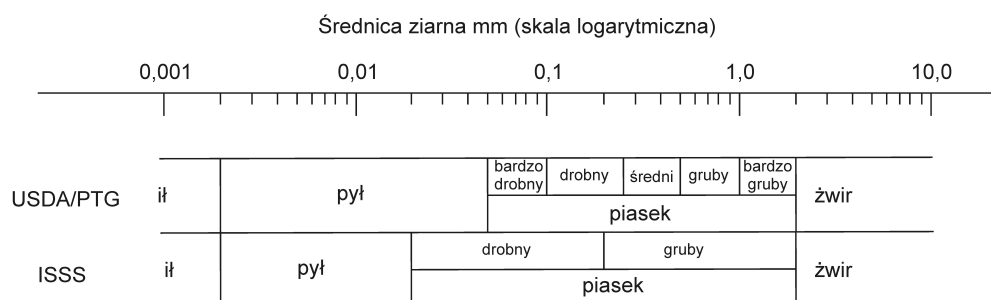
Porowatość gleby f wyraża objętość porów gleby w stosunku do jej całkowitej objętości. Porowatość zawiera się w przedziale od 0,3 do 0,6, przy czym gleby o dużym uziarnieniu mają z reguły mniejszą porowatość od gleb posiadających małe uziarnienie, chociaż średnią objętość porów posiadają większą. W glebach ilastych porowatość jest zmienna ze względu na ciągłe pęcznienie, kurczenie, ugniatanie, agregowanie i powstawanie pęknięć gleby.

Analiza składu granulometrycznego

Metoda sitowa i aerometryczna

Analiza składu granulometrycznego zwana również analizą uziarnienia gleby wyróżnia trzy frakcje ziarn: piasek, pył i il, różniące się średnicą (Rys. 4.2.3).

Większe ziarna mineralne (o ϕ 2-75 mm) nazywa się żwirem. Powszechnie stosowaną w Polsce metodą jest metoda areometryczna Bouyoucosa w modyfikacji Casagrande'a i Prószyńskiego dla frakcji mniejszych od 0,1 mm w połączeniu z zastosowaniem sit o odpowiednio dobranych średnicach oczek dla frakcji większych od 0,1 mm. Metoda areometryczna polega na pomiarach gęstości zawiesiny glebowej podczas sedimentacji cząstek gleby w stałej temperaturze. Gęstość zawiesiny w cylindrze mierzy się odpowiednio wyskalowanym areometrem, tzn. różnica dwóch kolejnych odczytów skorygowana z odczytem w płynie kontrolnym, określa procentową zawartość frakcji, która osiada na dnie naczynia w czasie dzielącym te odczyty. Okresy czasu sedimentacji poszczególnych frakcji gleby, zależne od ich wielkości oraz od temperatury zawiesiny podane są w ogólnie dostępnych tablicach opracowanych przez Prószyńskiego dla różnych grup granulometrycznych.



Rys. 4.2.3. Klasyfikacja USDA (*United States Department of Agriculture*) oraz polska klasyfikacja PTG (*Polskie Towarzystwo Gleboznawcze*) z 2008 r. uziarnienia gleby oraz klasyfikacja ISSS (*International Soil Science Society*)

Metoda dyfrakcji laserowej

Postęp technologiczny i dostępność aparatury pomiarowej uczynił popularną metodę dyfrakcji laserowej w zastosowaniu do analizy składu granulometrycznego gleby. Metoda ta polega na pomiarze odchylenia promienia laserowego oraz jego natężenia podczas przejścia przez dany ośrodek. Kąt odchylenia promienia laserowego padającego na cząsteczkę jest odwrotnie proporcjonalny do jej wielkości. Małe cząsteczki odchylają/rozpraszają promień lasera bardziej niż cząsteczki duże. Analiza składu granulometrycznego gleby polega na porównaniu otrzymanego rozkładu rozproszenia światła laserowego z odpowiednimi modelami optycznymi. Metoda dyfrakcji laserowej jest nieniszcząca, nieinwazyjna i może być zastosowana zarówno do suchych jak i wilgotnych próbek. Umożliwia pomiar cząsteczek w zakresie od 0,02 mikrona do kilku milimetrów i charakteryzuje się wysoką powtarzalnością.

Badanie zagęszczenia gleby

Znaczne zagęszczenie gleby zmienia warunki fizyczne, chemiczne i biologiczne w glebie i wywołuje wiele negatywnych zjawisk. Ogranicza wzrost korzeni i możliwość pobierania wody oraz składników mineralnych przez rośliny. Niewchłonięte nawozy i inne chemikalia dłużej utrzymują się w glebie i są z niej dłużej wymywane, co prowadzi do zanieczyszczenia środowiska i wzrostu kosztów produkcji roślinnej. Większa wilgotność i ograniczony dostęp tlenu stymuluje bakterie denitryfikacyjne do produkcji gazu cieplarnianego, podtlenu azotu, i jego emisję do atmosfery, przyczyniając się do globalnego ocieplenia i zanikania warstwy ozonowej. Wzrost stanu zagęszczenia gleby prowadzi także do wzrostu stężenia metanu atmosferycznego. Uprawa gleb o zwartej strukturze nie jest łatwa, użycie maszyn zwiększa spalanie paliwa napędowego i emisję innych gazów szklarniowych, takich jak dwutlenek węgla i tlenki azotu (NO_x). Zagęszczona gleba pozbawiona jest możliwości infiltracji i magazynowania wody opadowej, co powoduje spływanie wód po powierzchni gleby i jej erozję.

Jedną z wielkości fizycznych stosowanych do oceny zagęszczenia gleby jest zwięzłość gleby, rozumiana jako siła, z jaką gleba przeciwstawia się naciskowi mechanicznemu. Przyrządem do oznaczania zwięzłości gleby jest zwięzłościomierz lub penetrometr glebowy. Najczęściej są to urządzenia sprężynowe, uderzeniowe, hydrauliczne lub pneumatyczne. Rozróżniamy penetrometry statyczne i dynamiczne, z których pierwsze przeznaczone są do pomiaru siły potrzebnej do wbicia sondy (zwykle w kształcie stożka) w glebę ze stałą prędkością. Wielkością mierzoną jest siła na powierzchnię podstawy stożka sondy (N/m²). Penetrometry dynamiczne umożliwiają pomiar energii kinetycznej niezbędnej do przemieszcze-

nia sondy pomiarowej w glebie, a wielkością mierzoną jest energia wymagana do przemieszczenia sondy na jednostkową głębokość (W/m).

Stan wody w glebie i środowisku przyrodniczym

Kluczowym zagadnieniem agrofizyki jest status wody w glebie (tzn. jej ilość, potencjał, zasolenie, natlenienie i temperatura), ponieważ każde z badanych zjawisk fizycznych, chemicznych i biologicznych w glebie jest nim uwarunkowane. Szczególnie ważna jest tutaj możliwość monitoringu statusu wody, który należy realizować w oparciu o technikę cyfrową. Ze względu na to, że w cyfrowych systemach akwizycji danych czytelne są wyłącznie sygnały elektryczne, stosowane w nich czujniki muszą przetwarzać mierzoną wielkość na proporcjonalny sygnał elektryczny. Najtrudniejszym do elektrycznego pomiaru parametrem statusu wody w systemie: gleba-roślina-atmosfera jest wilgotność gleby, ponieważ przepływ prądu przez glebę jest warunkowany nie tylko jej wilgotnością, lecz również porowatością, uziarnieniem, kwasowością, temperaturą oraz zasoleniem.

Metoda termograwimetryczna oznaczania wilgotności w glebie

Ogólnie przyjętą bezpośrednią i referencyjną pomiaru wilgotności objętościowej gleby jest metoda termograwimetryczna. Polega ona na wyznaczeniu ubytku masy gleby po jej ogrzewaniu, zwykle w temperaturze 105°C, do momentu gdy nie będzie obserwowany ubytek masy. Oznaczać to będzie całkowite odparowanie wody swobodnej z gleby. Jednakże woda w glebie, szczególnie ilastej, może być na tyle silnie związana z fazą stałą, że zawsze pozostanie w niej pewna ilość, nawet po bardzo długotrwałym ogrzewaniu. Metoda termograwimetryczna jest pracochłonna, czasochłonna, wymaga wykorzystania oprzyrządowania laboratoryjnego, pobrane próbki gleby są niszczone i nie można jej zastosować w automatycznych systemach pomiarowych. Główną jej zaletą jest prostota i niewielkie wymagania aparaturowe. Metoda termograwimetryczna pomiaru wilgotności gleby jest niszcząca, bowiem badana próbka jest usuwana z gleby, a procedura pomiarowa niszczy jej strukturę.

Nieniszczące metody pomiaru wody w glebie

Pomiary nieniszczące odnoszą się do technik, których użycie nie niszczy w sposób bezpowrotny badanego materiału. Potrzeba powszechnego monitoringu wilgotności gleby, jak również innych wielkości fizycznych charakteryzujących glebę i środowisko przyrodnicze, wymusza szukanie metod nieniszczących pomiaru, których kilka opisano poniżej.

Metoda neutronowa

Popularna, wydajna i niezawodna metoda polowa monitoringu wilgotności gleby. W stosunku do metody termograwimetrycznej cechuje ją mniejsza pracochłonność, szybkość uzyskania wyniku, umożliwia dokonanie pomiarów nieniszczących (po wcześniejszym zainstalowaniu) w dowolnym poziomie profilu glebowego, praktycznie niewrażliwa na wpływ temperatury pomiaru. Istotną wadą metody neutronowej jest wysoki koszt urządzenia, duży błąd pomiaru w warstwie powierzchniowej gleby oraz niebezpieczeństwo napromieniowania promieniowaniem neutronowym i gamma. Wielkością mierzoną jest liczba wolnych neutronów, które powstają podczas zderzenia szybkich neutronów z cząsteczkami wody w glebie. Liczba ta jest proporcjonalna do wilgotności objętościowej gleby. Generator szybkich neutronów oraz licznik wolnych neutronów przesuwane są w pionowej rurze zakopanej w glebie, mierząc jej wilgotność w wybranej warstwie.

Reflektometria w dziedzinie czasu (TDR – Time Domain Reflectometry)

Poglądowy schemat urządzenia do pomiaru prędkości propagacji fal elektromagnetycznych w materiałach porowatych, stosujący reflektometryczną technikę pomiaru przedstawiony jest na rysunku 4.2.4. Impuls wejściowy, o czasie narastania i opadania około 300×10^{-12} s, przemieszcza się z generatora impulsu szpilkowego wzdłuż kabla koncentrycznego o impedancji 50Ω do sondy pomiarowej w postaci falowodu z dielektrykiem o przenikalności dielektrycznej, którą chcemy wyznaczyć.

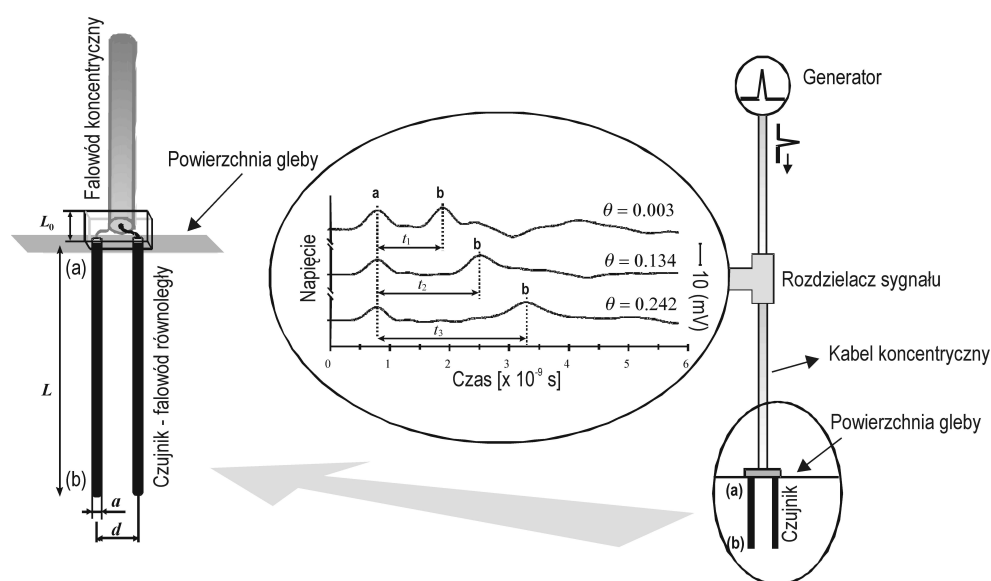
Może to być falowód utworzony z dwóch lub trzech równoległych prętów ze stali nierdzewnej, których długość wynosi L . Między generatorem i sondą umieszczony jest rejestrator monitorujący stan linii transmisyjnej. Z powodu nieciągłości impedancji między kablem koncentrycznym i sondą, część impulsu z generatora ulega odbiciu, co jest rejestrowane jako (a). Część impulsu, która nie uległa odbiciu propaguje wzdłuż prętów czujnika i ulega odbiciu od ich końca (b). Reflektogramy zebrane w przypadkach, gdy sonda pomiarowa umieszczona była w suchym, wilgotnym oraz nasyconym piasku wykazują, że czas t między odbiciami (a) i (b) zwiększa się wraz ze wzrostem wilgotności gleby (Malicki i Skierucha 1989).

Prędkość propagacji v impulsu elektrycznego wzdłuż prętów sondy wyrażana jest wzorem:

$$v = \frac{2L}{t_b - t_a} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_b}} \quad (1)$$

gdzie: c jest prędkością światła w próżni, $\epsilon_b(\theta)$ jest pozorną względną przenikalnością elektryczną ośrodka, która zależna jest od jego wilgotności. Wynika to z faktu, że wartość względnej przenikalności elektrycznej fazy ciekłej gleby

w temperaturze pokojowej wynosi około 80, natomiast fazy stałej 3-5, a fazy gazowej wynosi 1. Zatem posiadając miernik czasu propagacji impulsu elektromagnetycznego można przy pomocy metody oraz sondy TDR wyznaczyć pozorną przenikalność dielektryczną materiału, $\epsilon_b(\theta)$, i w sposób pośredni jej wilgotność objętościową θ .



Rys. 4.2.4. Zasada działania reflektometrycznego miernika prędkości propagacji fal elektromagnetycznych w glebie

Wilgotność objętościowa materiału, θ , czyli wielkość, która jest celem pomiaru reflektometrycznego, wyznaczana jest przez wykorzystanie empirycznej zależności kalibracyjnej $\theta_{TDR} = f(\epsilon_b)$ lub poprzez stosowanie modeli mieszanin dielektryków. Zaletą metody TDR pomiaru wilgotności gleby jest to, że jest ona nieniszcząca, szybka, nie wymaga wyposażenia laboratoryjnego, uniwersalna zależność kalibracyjna dla gleb mineralnych umożliwia pomiar z błędem $\pm 2\%$ wartości mierzonej oraz umożliwia zastosowanie w automatycznych stacjach monitoringu wilgotności gleby.

Reflektometria w dziedzinie częstotliwości (FDR – Frequency Domain Reflectometry)

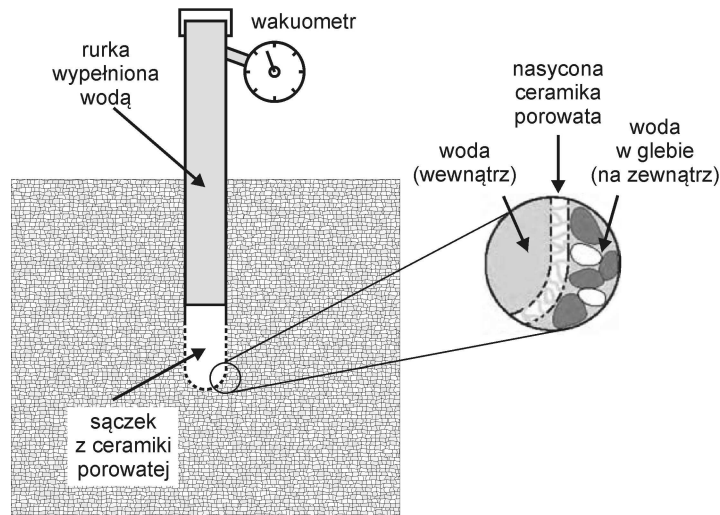
Mierniki TDR i neutronowe są zbyt drogie do powszechnego zastosowania w aplikacjach innych niż badania naukowe. Tańsze, lecz obciążone większym

błędem pomiaru mierniki i sondy do pomiaru wilgotności gleby to: mierniki i czujniki FDR (Frequency Domain Reflectometry – reflektometria w dziedzinie częstotliwości). Czujniki FDR zbudowane są z dwóch do pięciu prętów ze stali nierdzewnej stanowiących elektrody czujnika. Na jeden z prętów, zazwyczaj środkowy podawany jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości w zakresie 10-100 MHz, pozostałe elektrody połączone są do potencjału masy układu pomiarowego. Elektrody czujnika z glebą stanowią obciążenie impedancyjne, które w dużym uproszczeniu można przedstawić jako równoległe połączenia oporu i pojemności elektrycznej układu elektrody-gleba. Wartość pojemności zależy od przenikalności elektrycznej ośrodka glebowego i zależy od wilgotności gleby. Wartość oporu elektrycznego zależy od przewodnictwa elektrycznego gleby, głównie od ilości rozpuszczonych jonów w glebie. Ze względu na wpływ konduktywności gleby na wartość zmierzonej impedancji, niezbędna jest indywidualna kalibracja sond dla różnych gleb. Używając częstotliwości z górnego zakresu i powyżej, możliwe jest zwiększenie selektywności pomiaru i minimalizacja szkodliwego na pomiar wpływu konduktywności gleby.

Tensjometry glebowe

W glebie będącej materiałem porowatym występują zjawiska kapilarne oraz adhezji powierzchniowej, których efektem jest podsiąk wody ponad zwierciadło wody gruntowej oraz zjawisko retencji czyli zatrzymania wody w glebie. Aby pobrać wodę z kapilar tworzonych przez pory glebowe, korzenie roślin muszą wytworzyć podciśnienie odpowiednio większe. Stan wody determinowany siłami kapilarnymi i adhezji opisywany jest terminem potencjału matrycowego wody w glebie, którego jednostką jest N/m^2 . Potencjał matrycowy wody w glebie zależy od jej tekstury oraz zagęszczenia i agregacji. Powszechną metodą pomiaru potencjału matrycowego wody w glebie jest użycie tensjometru glebowego (Rys. 4.2.5).

Tensjometr składa się z porowatego sączka ceramicznego połączonego z wakuometrem (miernik podciśnienia) za pomocą rurki plastikowej wypełnionej wodą. Sączek porowaty umieszczony jest w glebie na określonej głębokości pomiaru. Gdy potencjał matrycowy gleby jest niższy od odpowiadającego mu podciśnienia wewnątrz sączka porowatego tensjometru, woda przemieszcza się z tensjometru do gleby poprzez nasycony sączek ceramiczny, wytwarzając w ten sposób podciśnienie rejestrowane w wakuometrze. Woda przepływa do gleby dopóki uzyskany będzie stan równowagi, gdy podciśnienie wewnątrz tensjometru równe jest potencjałowi matrycowemu gleby. Gdy gleba zostanie nawilżona, przepływ wody dokonuje się w kierunku odwrotnym, tzn. woda glebowa przemieszcza się do tensjometru do momentu osiągnięcia nowego stanu równowagi.



Rys. 4.2.5. Tensjometr glebowy z wakuometrem i sączkiem z ceramiki porowatej (Or i Wraith 2002)

Wymiana gazów w glebie

Roślinność przez proces fotosyntezy potrafi wiązać duże ilości CO_2 z powietrza i przechowywać przez długi okres jako węgiel w postaci materii organicznej (strumień pochłaniania gazów). Jednocześnie masa organiczna ulega przemianom mikrobiologicznym i te procesy często prowadzą do emisji gazów cieplarnianych do atmosfery np. dwutlenku węgla, metanu czy podtlenku azotu (strumień emisji gazów). W ten sposób ekosystemy biorą czynny udział w wymianie gazów szklarniowych między glebą, a atmosferą, a suma obu strumieni (pochłanianie minus emisja) stanowi o tym, czy dany ekosystem jest netto pochłaniaczem czy netto emitentem gazów szklarniowych. Określenie tych zależności ma fundamentalne znaczenie dla całego bilansu węgla ekosystemów lądowych w skali naszego kraju i dalej w skali całego kontynentu. Poniżej przedstawione zostaną podstawowe techniki, które są obecnie stosowane do ciągłych pomiarów strumieni niektórych gazów cieplarnianych (Smith i in. 2003).

Technika komorowa

Technika ta polega na pomiarach zmian stężenia gazów szklarniowych w powietrzu zamkniętym na pewien czas w komorze umieszczonej nad roślinnością. Stosuje się dwa typy komór: przezroczystą przez którą przenika promieniowanie słoneczne i „ciemną” odcinającą dopływ światła do badanych roślin. W obecności

światła (komora przezroczysta) zachodzi proces fotosyntezy i CO₂ z atmosfery jest pochłaniany przez rośliny, co objawia się spadkiem stężenia tego gazu wewnątrz komory w czasie pomiaru. Bez obecności światła (komora ciemna) proces fotosyntezy nie zachodzi, a w zamkniętej komorze stężenie dwutlenku węgla rośnie na skutek oddychania przykrytego komorą fragmentu ekosystemu. Metoda komorowa jest obecnie stosowana bardzo często razem z metodą kowariancji wirów stanowiąc znakomite uzupełnienie badań nad wymianą gazów szklarniowych. Metodą kowariancji wirów badacz obserwuje ekosystem jako całość, metodą komorową może badać poszczególne składniki ekosystemu – ma to szczególne znaczenie w badaniach ekosystemów o niehomogenicznej strukturze.

Technika kowariancji wirów

Pomiary z zastosowaniem metody kowariancji wirów polegają na obserwacji mikroruchów porcji powietrza (wirów), które transportują zarówno gazy jak i ciepło z, lub do powierzchni ekosystemu. Szybki i dokładny pomiar prędkości ruchu wirów oraz zawartych w nich gazów i ciepła pozwalają na ocenę wielkości strumieni netto powierzchni nad którymi prowadzony jest pomiar. Minimalna wymagana prędkość zbierania danych wynosi 10 Hz (przynajmniej dziesięć razy na sekundę), co w połączeniu z dużą liczbą mierzonych parametrów powoduje, że w ciągu minuty pomiarów trzeba zebrać kilka tysięcy danych. Stwarza to nowe wyzwanie w badaniach środowiskowych, w których trzeba przetransmitować, zebrać i przeanalizować miliony danych w celu oszacowania strumieni gazów cieplarnianych. Oprócz całego systemu pomiarowego, w skład którego wchodzi szybkie komputery, automatyczne rejestratory danych, podsystemy zasilania i transmisji danych, podstawowymi przyrządami są tzw. anemometry soniczne do badania składowych prędkości wiatru oraz spektrometry do badania stężenia gazów szklarniowych. Mimo tak skomplikowanej struktury systemu pomiarowego, metoda kowariancji wirów stała się światowym standardem w badaniach nad strumieniami gazów szklarniowych wymienianych między różnymi ekosystemami a atmosferą. Ograniczenie natury technicznej stanowi obecnie niemożność budowy analizatorów pozwalających na szybkie i dokładne pomiary fluktuacji stężeń substancji występujących w atmosferze w małych stężeniach (np. lotne związki organiczne, amoniak).

Technika akumulacji wirów

Technika akumulacji wirów polega na gromadzeniu (w oddzielnych zbiornikach) porcji powietrza poruszających się do góry i w dół zgodnie z „pulsowaniem” atmosfery nad badaną powierzchnią w określonym czasie. Różnica stężeń gazów w zgromadzonych porcjach powietrza jest w dużym stopniu proporcjonal-

na do wielkości strumieni wymiany obserwowanych gazów. Niewątpliwą zaletą techniki akumulacji wirów jest prostota i stosunkowo małe, w porównaniu z techniką kowariancji wirów, wymagania techniczne stawiane przed zastosowanym sprzętem pomiarowym. Dzięki nim możliwe są pomiary strumieni substancji występujących w atmosferze w bardzo małych stężeniach.

Podsumowanie

Nieustający rozwój technologiczny stwarza nowe narzędzia poznawcze zarówno w sferze aparatury pomiarowej (sensory, techniki pozyskania danych) oraz przetwarzania coraz większych ilości danych opisujących otoczenie człowieka, również glebę i środowisko przyrodnicze. Dzieje się to w różnej skali czasowej i przestrzennej stwarzając problemy z przeniesieniem wniosków ze skali mikro do makro i odwrotnie. Jak na przykład konwertować informację uzyskaną z satelitów w skali dziesiątków kilometrów na skalę pola uprawnego? Kluczem do rozwiązania tych problemów jest połączenie eksperymentu z modelowaniem, tzn. stosowanie metody, którą używają naukowcy z powodzeniem od czasów Bacona i wcześniej, gdy jeszcze nie zwerbalizował on swej filozofii przyrody.

PIŚMIENNICTWO

- Hillel D., 2012. Fizyczne właściwości gleb. W: Gleba w środowisku, red. Nowak B., 60-86. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Lal R., Shukla M.K., 2004. Importance of Soil Physics. W: Principles of Soil Physics, edited by Rattan Lal and Manoj K. Shukla, 1-28. New York, Basel, Marcel Dekker, Inc.
- Malicki M.A., Skierucha W., 1989. A Manually Controlled TDR Soil Moisture Meter Operating with 300 Ps Rise-Time Needle Pulse. *Irrigation Science*, 10(2), 153-163.
- Or D., Wraith J.M., 2002. Soil Water Content and Water Potential Relationships. W: Soil Physics Companion, edited by Warrick A.W., Boca Raton, Florida, USA, CRC Press LLC, 49-84.
- Smith K.A., Ball T., Conen F., Dobbie K.E., Massheder J., Rey A., 2003. Exchange of Greenhousegases between Soil and Atmosphere: Interactions of Soil Physical Factors and Biological Processes. *European Journal of Soil Science*, 54, 779-791.

4.3. Modelowanie procesów fizycznych zachodzących w środowisku glebowym

Cezary Sławiński, Piotr Baranowski, Krzysztof Lamorski, Jaromir Krzyszczak

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Modelowanie to obecnie jedna z najbardziej rozwijanych metod badawczych w naukach przyrodniczych. Pozwala ono z jednej strony lepiej zrozumieć procesy i zjawiska zachodzące w przyrodzie poprzez ich przybliżenie, a z drugiej na bazie danych historycznych przewidywać zachowanie się obiektu lub przebieg procesu w przyszłości. Zgodnie z definicją przedstawioną w encyklopedii fizyki modelem nazywamy zespół założeń upraszczających opis danego obiektu fizycznego, procesu lub zjawiska, ujmującego najważniejsze własności obiektu badań i przedstawiający go w ten sposób, że pewien obiekt, proces lub zjawisko, które na ogół w rzeczywistości nie istnieje, ma cechy dostatecznie zbliżone do rzeczywistego obiektu badań. W zależności od sposobu opisu przez model badanego procesu fizycznego mogą one być podzielone na modele rzeczywiste, analogowe, fenomenologiczne i matematyczno-fizyczne. Pierwsze trzy grupy modeli, a więc modele rzeczywiste, analogowe i fenomenologiczne były szeroko rozwijane i stosowane do momentu szerokiej komputeryzacji i informatyzacji. Koniec XX i początek XXI wieku to bardzo szybki rozwój zarówno metod numerycznych, jak też, a może przede wszystkim wzrost szybkości, pojemności i niezawodności komputerów. Spowodowało to gwałtowny rozwój różnych metod modelowania numerycznego. Pozwoliło na konstrukcję fizyczno-matematycznych modeli umożliwiających symulowanie rzeczywistych procesów zachodzących w systemie gleba-roślina-atmosfera. Modele takie charakteryzują się tym, że do opisu fizycznych procesów używa się konstytutywnych równań fizycznych. Rozwiązując w sposób analityczny lub numeryczny te równania możemy, na podstawie wprowadzonych warunków początkowych i brzegowych, przewidzieć zachowanie się danej wielkości fizycznej w czasie i przestrzeni.

Gleba jest jednym z elementów środowiska przyrodniczego, które zdefiniowane jest jako zespół naturalnych elementów ściśle ze sobą powiązanych otaczających organizmy żywe. Zatem gleba będąc elementem systemu gleba-roślina-atmosfera jest pomostem pomiędzy rośliną i atmosferą. W glebie oraz na styku gleba-roślina oraz gleba-atmosfera zachodzą wszystkie procesy transportu i akumulacji masy, pędu i energii, które decydują o wszystkich zjawiskach zachodzących w tym układzie.

Mnogość tych procesów nie pozwala ich wszystkich opisać, ograniczymy się zatem do przedstawienia kilku spektakularnych przykładów. Ważnymi procesami

zachodzącymi w środowisku glebowym, które powodują połączenie gleby, rośliny i atmosfery w system zwany też kontinuum gleba-roślina-atmosfera są procesy transportu masy i energii. A najważniejszym z nich jest transport wody. Zazwyczaj przy jego opisie, ze względu na rozkład wymiarów porów, traktuje się glebę jako układ homogeniczny. Jednakże jak wiadomo gleba jest układem heterogenicznym, zatem do jego opisu należy tworzyć modele uwzględniające ten fakt. Przykładem zastosowania takiego opisu procesu jest opis kształtowania się wilgotności w heterogenicznym profilu glebowym zbudowanym z poziomych homogenicznych warstw, w którym w warunkach naturalnych występują makropory zarówno pochodzenia biologicznego (biopory) jak też powstałe w wyniku fizycznego procesu pęcznienia i kurczenia gleby. Makropory zdefiniowane są jako pory gdzie zachodzi nierównowagowy, szybki przepływ ze względu na relatywnie ich duże wymiary i ciągłość. Doświadczenie mówi, że w porach o średnicach większych niż 0,3 mm taki nierównowagowy przepływ ma miejsce. Zatem wysokie przewodnictwo hydrauliczne takiego układu uniemożliwia zastosowania równania Richardsa do opisu przepływu roztworu glebowego. Do opisu i modelowania tego procesu często stosuje się tzw. model dwudomenowy, zwany też często modelem podwójnej przepuszczalności (dual-permeability model). W opisie tym jedną domenę, strefę przepływu stanowi matryca glebowa, natomiast makropory są drugą domeną, gdzie do opisu przepływu stosuje się równania termodynamiki procesów nierównowagowych.

Innym bardzo ważnym procesem z punktu widzenia zachowania się systemu gleba-roślina-atmosfera jest ewapotranspiracja. Zjawisko to stanowi warunek brzegowy dla modeli opisujących przepływ masy i energii w tym układzie. Istnieje wiele metod określania ewapotranspiracji, bazujących na pomiarach turbulencyjnego transportu masy, energii i pędu w przygruntowej warstwie atmosfery. Jedną z nich jest metoda bazująca na pomiarach średnich wartości profili elementów meteorologicznych takich jak prędkość wiatru, prężność pary wodnej w powietrzu i temperatura. Szereg metod określenia ewapotranspiracji bazuje na równaniu bilansu cieplnego powierzchni czynnej uwzględniającego transport energii w postaci ciepła pomiędzy przygruntową warstwą atmosfery, pokrywą roślinną i glebą. Często też wykorzystywane są metody kombinowane polegające na połączeniu metody bilansu energetycznego powierzchni czynnej i elementów aerodynamicznych opisujących poziomy i pionowy ruch powietrza.

Bardzo ważne z punktu widzenia agrofizyki jest modelowanie samego ośrodka glebowego jako układu wielofazowego. Bardzo często do opisu i modelowania mechanicznych właściwości tego ośrodka stosuje się metody badawcze zaczerpnięte z reologii – nauki o płynięciu materiałów. Wilgotność decyduje o właściwościach fizycznych gleby. Mechaniczne właściwości gleby, jak plastyczność, lepkość, zwięzłość oraz pęcznienie i kurczenie zmieniają się wraz z jej wilgotnością.

Tak np. gleba sucha zachowuje się podobnie jak ciało sztywne, krusząc się przy dostatecznie dużym nacisku, natomiast gleba wilgotna może wykazywać zdolność do plastycznego odkształcania. Dlatego też bardzo często do jej opisu wykorzystuje się modele reologiczne.

Należy podkreślić, że gleba oprócz tego że jest układem trójfazowym to jest układem aktywnym biologicznie zmiennym zarówno w czasie jak też w przestrzeni. Przedstawione przykłady pokazują zatem jak skomplikowane i trudne do opisu jest środowisko glebowe i procesy w nim zachodzące.

PIŚMIENNICTWO

- Baranowski P., 1999. Porównanie i weryfikacja modeli ewapotranspiracji rzeczywistej i potencjalnej z zastosowaniem pomiaru temperatury radiacyjnej roślin. *Acta Agrophysica*, 22, 7-15.
- Walczak R.T., Baranowski P., Mazurek W., 2004. Modelling of actual evapotranspiration with the use of crop cover radiation temperature and soil data. ISBN 83-87385-82-4, Plant growth in relation to soil physical conditions. Edited by Jerzy Lipiec, Ryszard Walczak, Grzegorz Jóźefaciuk, EU 5th Framework Program QLAM-2001-00428, Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture AGROPHYSICS, Lublin, 144-152.
- Baranowski P., Usowicz B., Walczak R.T., Mazurek W., 2005. Evaporation into the boundary layer of the atmosphere. ISBN 83-87385-99-9, Edited by Piotr Baranowski and Bogusław Usowicz, EU 5th Framework Program QLAM-2001-00428, Centre of Excellence for Applied Physics in Sustainable Agriculture AGROPHYSICS, Lublin, 1-160.
- Lamorski K., Pachepsky Y., Sławiński C., Walczak R., 2008. Using Support Vector Machines to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention of Soils in Poland. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 72, No 5, 53-57.
- Gerke H.H., van Genuchten M.T., 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research*, 29, 305-319.
- Simunek J., Jarvis N.J., van Genuchten M.T., Gardenas A., 2003. Review and comparison of models for describing nonequilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272, 14-35.

4.4. Metody luminescencyjne w badaniach środowiska glebowego i roślin

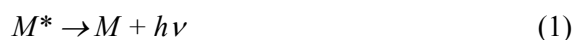
Aleksander Brzóstowicz

Katedra Fizyki i Agrofizyki, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Istotny wkład do charakterystyki procesów w układach roślina-gleba-atmosfera wnoszą rozwijające się intensywnie w ostatnich dziesięcioleciach metody luminescencyjne. Umożliwiają one badanie wpływu różnych czynników oddziałujących ze środowiska glebowego, jak i z atmosfery, na rośliny. Metody luminescencyjne stosowane są również w badaniach właściwości związków humusowych ekstrahowanych z gleb oraz osadów dennych zbiorników wodnych.

Luminescencja to zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego o natężeniu większym od promieniowania cieplnego w danej temperaturze.

Luminescencja powstaje podczas przejść promienistych, w trakcie których cząsteczka wzbudzona (M^*) traci energię emitując foton i przechodzi do stanu podstawowego (M):



gdzie: h – stała Plancka; ν – częstotliwość fali.

Wzbudzenie może odbywać się na drodze fizycznej (np. przez pochłonięcie energii światła → fotoluminescencja) lub chemicznej (przekazywanie energii z reakcji chemicznej → chemiluminescencja).



Efektywna transformacja energii światła lub reakcji chemicznej w luminescencję wymaga spełnienia kilku warunków:

1. dostarczenie dostatecznie dużej porcji energii,
2. istnienie takiego stanu, dla którego prawdopodobieństwo generowania stanu elektronowego wzbudzonego jest większe niż generowanie produktów w stanie podstawowym,
3. obecność cząsteczek o odpowiednich właściwościach spektroskopowych (zdolnych do tworzenia stanu elektronowego – wzbudzonego),
4. obecność cząsteczek lub ich układów zdolnych do emisji światła ze stanów wzbudzonych.

5. W układach wielocząsteczkowych, tak skomplikowanych jakimi są układy biologiczne, przekazywanie wzbudzenia może odbywać się pomiędzy wieloma cząsteczkami, jak i całymi kompleksami związków chemicznych.

Stanami wzbudzonymi cząsteczki są, w porządku wzrastającej energii, stany translacyjne, rotacyjne, oscylacyjne i elektronowe. Efekty fotochemiczne związane są tylko ze wzbudzonymi stanami elektronowymi, bo tylko one mają energię, która odpowiada energii światła. Przejście elektronowe przeprowadza atom lub cząsteczkę z elektronowego stanu podstawowego do jednego z elektronowych stanów wzbudzonych. Oczywiście może zachodzić proces odwrotny. Przejście w górę skali energii wymaga absorpcji energii natomiast przejście w dół może zachodzić z jednoczesną emisją światła (dezaktywacja promienista \Rightarrow luminescencja) lub z utratą energii na ciepło (dezaktywacja bezpromienista).

Różne stany energii atomu lub cząsteczki są zazwyczaj przedstawiane w postaci schematu Jabłońskiego. Na schemacie tym stany elektronowe zaznaczone są w postaci poziomych linii, a ich numeracja odpowiada kolejności w skali energii.

W małych cząsteczkach oprócz linii widmowych absorpcyjnych i emisyjnych odpowiadających przejściom czysto elektronowym mogą pojawiać się linie związane z przejściami od różnych poziomów oscylacyjnych i rotacyjnych. Utrata wzbudzenia może zachodzić również przez jakieś reakcje chemiczne.

W cząsteczkach wieloatomowych, jakimi są np.: związki organiczne, schemat stanów i przejść energetycznych może być bardziej skomplikowany. Mimo, że cząsteczki wieloatomowe mają wiele wzbudzonych stanów elektronowych, to jednak obserwowana luminescencja pochodzi zwykle od najmniejszego stanu wzbudzonego (tzn. z S_1 na S_0).

W układach skomplikowanej materii organicznej jakie występują w glebie czy w roślinach stany wzbudzone na drodze chemicznej uzyskiwane są przez:

1. proces przenoszenia elektronu z donora na akceptor,
2. procesy rodnikowe (rekombinacje rodników nadtlenkowych w nieenzymatycznych i enzymatycznych reakcjach utleniania np. utlenianie kwasów tłuszczowych),
3. rozrywanie słabych wiązań w nadtlenukach cyklicznych (np. kwasów tłuszczowych, aldehydów),
4. kooperacyjne oddziaływanie międzycząsteczkowe (np. zmiany konformacyjne lub hydratacyjne białek, celuloz, jonów itp.).

Poszczególne związki chemiczne, czy całe kompleksy związków materii organicznej (związki humusowe, aparat fotosyntetyczny) mogą również spełniać warunki do wzbudzenia na drodze pochłaniania energii światła.

Cząsteczka wzbudzona (M^*) może przekazywać swoją energię innej cząsteczce (Q) w sposób bezpromienisty i w rezultacie na ciepło. Taka cząsteczka, która pochłania energię nosi nazwę „wygaszacza”.

Prawdopodobieństwo przejścia promienistego jest takie samo dla wszystkich cząsteczek substancji wzbudzonej. Wobec tego zmniejszanie się liczby cząsteczek wzbudzonych, w krótkich przedziałach czasu jest proporcjonalne do liczby cząsteczek wzbudzonych.

Można więc w rezultacie napisać:

$$N_t = N_0 e^{-k \cdot t} \quad (3)$$

gdzie: N_t – liczba cząsteczek wzbudzonych po czasie t z początkowej liczby N_0 ; $k = \tau^{-1}$ – stała szybkości reakcji promienistej, τ – czas życia wzbudzonej cząsteczki (czas, po którym liczba cząsteczek wzbudzonych zmniejszy się „e” razy, $e = 2,71..$).

Wygaszanie stanów wzbudzonych cząsteczek może być obserwowane jako zanik natężenia (I) luminescencji, bowiem I jest proporcjonalne m.in. do liczby cząsteczek wzbudzonych. Proces ten można opisać wzorem:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

gdzie: I_0 – początkowe natężenie luminescencji, I – natężenie luminescencji po czasie t , τ – czas „życia” luminescencji (czas, po którym natężenie luminescencji zmniejszy się „e” razy, $e = 2,71..$).

Charakter zaniku luminescencji można podzielić na wygaszanie statyczne i dynamiczne. W wygaszaniu statycznym czas zaniku luminescencji pozostaje stały natomiast początkowe natężenie luminescencji zmniejsza się. Wygaszanie to następuje gdy wygaszacz wiąże się z cząsteczką w stanie podstawowym. Charakterystyczną cechą wygaszania statycznego jest jego niezależność od lepkości roztworu, w którym znajdują się cząsteczki.

Przy wygaszaniu dynamicznym (dyfuzyjnym) początkowe natężenie pozostaje stałe, natomiast czas zaniku skraca się wraz ze wzrostem stężenia wygaszacza. Proces ten może być wynikiem kontaktu wzbudzonej cząsteczki z ciężkimi jonami wygaszacza (np.: tlen, dwutlenek azotu). Wygaszacz zwiększa wydajność przejścia do stanu trypletowego lub wiąże się ze wzbudzoną cząsteczką w niefluoryzujący kompleks.

W badaniach luminescencyjnych obiektami badań mogą być zarówno roztwory, przesącza, zawiesiny jak i fragmenty roślin.

Układy do pomiarów luminescencji dają zwykle wyniki w postaci pewnej liczby zliczeń, która jest proporcjonalna do ilości emitowanych fotonów, a te z kolei do liczby cząsteczek wzbudzonych. Liczba zliczeń (w danym czasie) daje intensywność emisji czyli natężenie luminescencji. Badając kinetykę zaniku natężenia luminescencji w czasie można uzyskać informacje o ilości procesów, szybkości ich przebiegu oraz o charakterze wygaszaczy luminescencji. Jeśli w trakcie pomiaru natężenia luminescencji wykona się jego analizę spektralną, wówczas można identyfikować związki chemiczne i określić ich stężenie oraz oszacować energetykę procesów odpowiedzialnych za luminescencję.

PIŚMIENNICTWO

- Brzóstowicz A., 2001. Świecenia biologiczne. *Acta Agrophysica*, 45, 42-52.
- Brzóstowicz A., 2002. Luminescencja w badaniach agrofizycznych. *Acta Agrophysica*, 60, 27-38.
- Brzóstowicz A., Murkowski A., Prokowski Z., 2003. Luminescencyjna ocena stanu zagrożeń środowiska. *Inżynieria Rolnicza*, 10(52), 75-81.
- Lavorel J., 1975. Luminescence. W: Govindjee (red.), *Bioenergetics of photosynthesis*, New York, Academic Press, 223-317.
- Sławiński J., 1989. Metody badania słabych emisji fotonowych z układów biologicznych, W: Twardowski J. (red.), *Biospektroskopia 3*, PWN, Warszawa, 107-214.
- Suppan P., 1997. *Chemia i światło*, Wyd. Nauk. PWN Sp. z o.o., Warszawa.
- Veselovsky V.A., Veselova T.V., 1990. Luminescence of plants (in Russian). "Science" Moscow.

4.5. Zastosowanie metod luminescencyjnych w badaniach materii organicznej gleb i osadów dennych

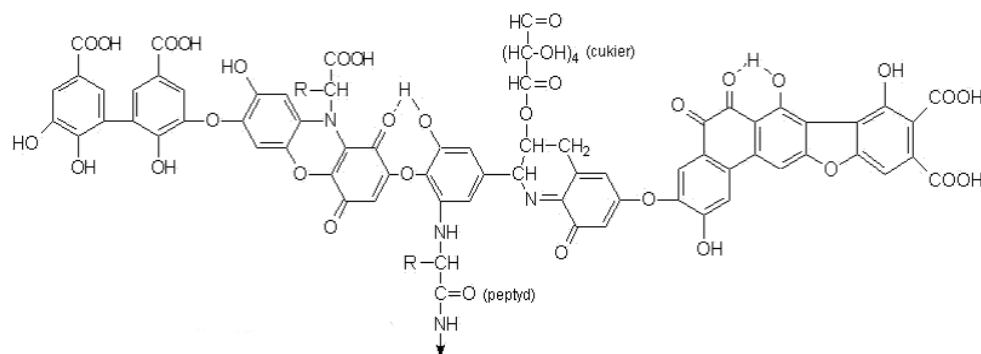
Dorota Gołbiowska, Lilla Mielnik, Romualda Bejger, Mariola Sienkiewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Specyficzna materia organiczna (SMO) ekosystemów lądowych i wodnych

Pod pojęciem SMO należy rozumieć produkt końcowy transformacji obumarłej materii organicznej powstały z resztek roślinnych i zwierzęcych przy udziale różnorodnych mikroorganizmów i czynników fizykochemicznych. Jest to rodzaj wytworzonego w danych warunkach środowiska „niedopałka”. Ta grupa związków to substancje humusowe (SH). O ich strukturze mówimy, że mają charakter „statystyczny”, polidispersyjny i polimolekularny (Kononowa 1968, Stevenson 1982).

Najszerzej badaną frakcją SH są kwasy huminowe (KH) i fulwowe (KF), które niezależnie od ekosystemu, mają wiele cech wspólnych. Wszystkie mają aromatyczne „jądro”, które stanowi sieć pierścieni aromatycznych (głównie pochodnych benzenu) połączonych różnymi mostkami i fragmentami łańcuchów alifatycznych. W strukturze KH występują liczne grupy funkcyjne w szczególności karboksylowe (COOH) i hydroksylowe (OH), nadające im charakter polikarboksylowych kwasów organicznych (Rys. 4.5.1).



Rys. 4.5.1. Struktura kwasów huminowych według Stevensona (1982)

Taka struktura oraz stosunek ugrupowań aromatycznych, o charakterze hydrofobowym, znajdujących się w „jądrze” KH do ilości grup funkcyjnych, o charakterze hydrofilowym, występujących w bocznych łańcuchach alifatycznych, wpływa na zdolności sorpcyjne tych związków. Podstawowymi pierwiastkami

w strukturze KH są C, H, N oraz O i S. Trwałe formy azotu w strukturze KH związane są w dużej mierze bezpośrednio z pierścieniami aromatycznymi w postaci amin lub struktur heterocyklicznych.

KH ze względu na swoje właściwości, pełnią wiele ważnych funkcji w środowisku. Mogą wpływać w istotny sposób na strukturę i właściwości gleb oraz osadów dennych. Bezpośrednio lub pośrednio mogą wpływać na procesy życiowe flory i fauny ekosystemów. Mają również zdolność tworzenia kompleksów z różnymi metalami oraz stabilnych kompleksów humus-enzym, co jest przyczyną ich względnie stałej aktywności enzymatycznej. W latach 80. XX w., odkryto fotosensybilizacyjne właściwości SH i ich udział w procesach fotodegradacji – w szczególności w ekosystemach wodnych. Stosowanie nieinwazyjnych technik spektroskopowych, w szczególności pomiarów absorbancji roztworów SH i KH w zakresie UV-VIS i IR pokazało, że badając stan SH wytworzonych w różnych ekosystemach, możemy się wiele dowiedzieć o zmianach zachodzących w środowisku (Gołębiowska, 2004). Od ok. 25 lat w badaniach substancji humusowych wykorzystuje się coraz szerzej spektroskopię fluorescencyjną (Senesi 1990, Milori i in. 2002, Mielnik 2013).

W niniejszym rozdziale przedstawimy, w jaki sposób i jakie informacje możemy uzyskać stosując techniki fotoluminescencyjne – pomiary fluorescencji i „długożyciowej” opóźnionej luminescencji.

Pomiary fluorescencji (FI)

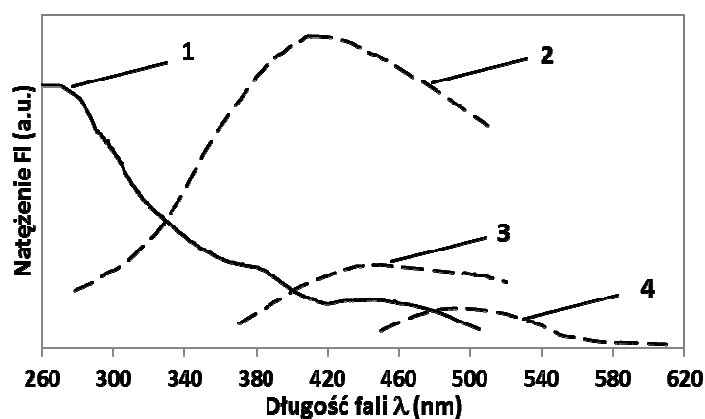
Pozornie, fluorescencja jest metodą bardzo atrakcyjną, ponieważ może być łatwo stosowana, a gromadzenie danych jest proste i stosunkowo szybkie. Jednak łatwość gromadzenia danych i szerokie możliwości zastosowania spektroskopii fluorescencyjnej używane do monitorowania składu i zmienności SH zderzają się, ze względu na złożoną i niepowtarzalną naturę badanych obiektów, z możliwościami interpretacyjnymi uzyskanych wyników. Na wyniki pomiarów fluorescencji SH wpływa szereg różnych czynników związanych z używaną aparaturą jak i z przygotowaniem próbek do pomiarów (stężenia, pH, stosowane rozpuszczalniki, ewentualne zanieczyszczenia itp.). Powinna być również wzięta pod uwagę korekta rachunkowa wahań natężenia źródła światła wzbudzającego, z powodu różnej czułości instrumentalnej układów detekcyjnych, jak i innych czynników instrumentalnych. Mogą one powodować zniekształcenia widm rzeczywistych np. przez występowanie w nich dodatkowych pasm wywołanych przez promieniowanie rozproszone jak również pochodzących od samej próbki. Zakłócenia te, w szczególności, gdy dokonuje się ilościowych porównań pomiędzy widmami fluorescencyjnymi mierzonymi na różnych spektrofluorymetrach i na materiale humusowym z różnych źródeł powodują, że interpretacja widm fluorescencji nie jest łatwa.

Wśród metod fluorescencyjnych stosowanych do charakterystyki SH bardzo powszechnie wykorzystuje się jednowymiarową spektroskopię fluorescencji widm emisji i wzbudzenia przy zastosowaniu różnych długości fali. Coraz bardziej popularne stają się także synchroniczne skanowanie (ang. *synchronous-scan spectra*) oraz, zyskująca w ostatnim okresie coraz większą popularność, fluorescencja trójwymiarowa 3D (ang. *emission-excitation matrix* – EEM).

Widma emisji FI kwasów huminowych

Podstawową informację o fluorescencyjnych właściwościach roztworów SH uzyskujemy rejestrując krzywą emisji FI w postaci $I_{FI} = f(\lambda)$ lub częściej zapisane jako $FI = f(\lambda)$.

Kształt widm emisji FI zależy od długości fali wzbudzającej (Rys. 4.5.2). Najlepiej stosować wzbudzenie „wysokoenergetyczne” przy krótkich długościach fal. Tak uzyskane widma emisji SH charakteryzują się wyższym natężeniem FI i czasem trochę bogatszą strukturą w porównaniu do widm FI wzbudzanych długofalowo. Widmo emisji FI SH ma zazwyczaj szerokie jedno lub dwa maksima (częściej jedno z charakterystycznym przegięciem).

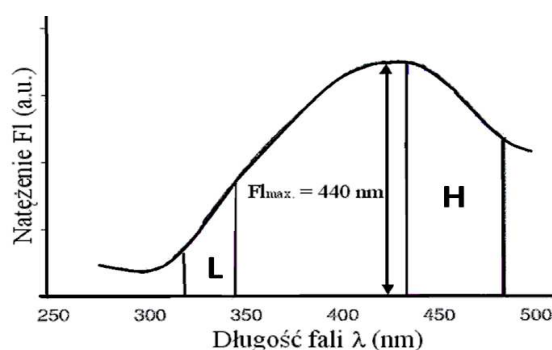


Rys. 4.5.2. Przykładowe widmo wzbudzenia FI $\lambda_{\text{obs}} = 520$ nm (1) oraz widma emisji FI rejestrowane przy różnych długościach fali wzbudzenia: (2) $\lambda_{\text{wzb}} = 260$ nm, (3) $\lambda_{\text{wzb}} = 380$ nm, (4) $\lambda_{\text{wzb}} = 460$ nm

Opisując cechy danego widma, by je móc porównać z innymi, określamy: położenie maksimum oraz tzw. integralne natężenie fluorescencji (ΣFI) jako powierzchnię pod krzywą widmową emisji FI .

$$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{Fl} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{Fl} \cdot d\lambda \quad (1)$$

Jako cechę charakterystyczną widm emisji możemy również traktować położenie ich maksimum przy wybranych λ i wartości natężeń Fl oraz wzajemne stosunki natężeń jak i stosunki powierzchni pod wybranymi fragmentami krzywej widmowej (Rys. 4.5.3).



Rys. 4.5.3. Przykładowe widmo emisji Fl rejestrowane przy $\lambda_{wzb} = 260$ nm

Ważnym parametrem służącym do porównania SH różnego pochodzenia mogą być, przy zachowaniu takich samych warunków pomiaru, współczynniki efektywności emisji fluorescencji El rozumiane jako stosunki integralnego natężenia emisji Fl do wartości współczynnika absorpcji badanego roztworu SH, zmierzonego w danych warunkach, przy długości fali wzbudzającej.

$$E_{Fl} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{Fl_{em}}}{\varepsilon_{\lambda_{wzb}}} \quad (2)$$

Obecnie w wielu pracach można znaleźć informacje na temat wykorzystania techniki analizy fluorescencyjnej do oceny stopnia przeobrażenia (humifikacji) makrocząsteczek, jakimi są kwasy huminowe (Milor i in. 2002, Zsolnay 2003) oraz do oceny warunków produktywności biologicznej w zbiornikach wodnych (Huguet i in. 2009).

Milor i in. (2002) wprowadziła do oceny stopnia humifikacji KH współczynnik A_{465} , wyznaczany na podstawie pomiaru powierzchni pod krzywą emisji Fl roztworów KH przy długości fali wzbudzenia $\lambda_{wzb} = 465$ nm. Z kolei Zsolnay (2003) za-

proponował parametr HIX (*humification index*) wyznaczany z widm emisji Fl roztworów KH przy wzbudzeniu $\lambda_{wzb} = 254$ nm jako stosunek powierzchni pod krzywą widmową w przedziałach 435÷480 nm i 330÷345 nm (powierzchnia oznaczona literą H do powierzchni oznaczonej literą L) (Rys. 4.5.3).

$$HIX = \frac{\sum(IF_{435} \div IF_{480})}{\sum(IF_{330} \div IF_{345})} \quad (3)$$

Wysokie wartości HIX (w zakresie 10-16) są charakterystyczne dla KH pochodzenia lądowego. Natomiast indeks HIX < 4 dla KH ekosystemów wodnych.

Wskaźnik BIX zaproponowany przez Huguet in. (2009) stosowany jest do oceny aktywności biologicznej środowiska wodnego, w którym powstają KH.

$$BIX = \frac{IF(\lambda_{380})}{IF(\lambda_{430})} \quad (4)$$

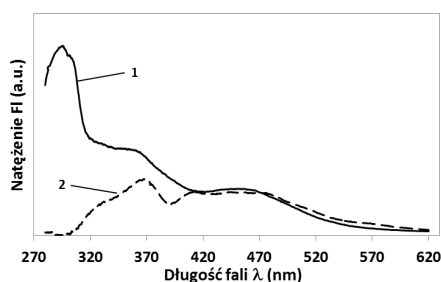
Oblicza się go na podstawie widm emisji Fl roztworów KH przy wzbudzeniu $\lambda = 320$ nm jako stosunek natężenia Fl przy długości fali $\lambda = 380$ nm do natężenia Fl przy $\lambda = 430$ nm. Wartości tego współczynnika > 1 wskazują na wysoką aktywność biologiczną środowiska i są charakterystyczne dla KH wytworzonych głównie z materiału pochodzenia glonowego.

Widma wzbudzenia Fl

W metodach fluorescencyjnych chcemy również odpowiedzieć na pytanie, przy jakiej λ absorbują fluorofory odpowiedzialne za emisję Fl w jej maksimum. W tym celu rejestrujemy widma wzbudzenia ustawiając obserwację Fl przy λ odpowiadającym maksimum Fl, zmieniając w sposób ciągły długość fali wzbudzającej fluorescencję. Kończymy rejestrację przy długości fali o 10 nm krótszej od λ max emisji fluorescencji. Widmo wzbudzenia Fl substancji humusowych powinno być podobne do ich widma absorpcji, ale zazwyczaj jest od niego mniej monotoniczne (Rys. 4.5.2), gdyż rodzajów fluoroforów w strukturze KH jest mniej niż chromoforów i nie tworzą one podobnego do chromoforów kontinuum. Widma wzbudzenia odzwierciedlają absorpcję tych struktur w cząsteczkach SH lub KH, które mogą fluoryzować bezpośrednio bądź wywoływać (sensybilizować) świecenie „sąsiednich” fluoroforów.

Widma fluorescencji skanowane synchronicznie

W technice pomiarów widm fluorescencji skanowanych synchronicznie za pomocą nowoczesnych spektrofluorometrów istnieje możliwość ustalenia stałej różnicy $\Delta\lambda$ pomiędzy długością fali wzbudzającej FI a długością fali, przy której rejestruje się emisję FI ($\Delta\lambda = \lambda_e - \lambda_{wzb}$), przy czym długość fali wzbudzającej jest, co najmniej o 10 nm krótsza od fali emisji. Takie widmo jest bardzo charakterystyczne dla pochodzenia próbki, gdyż rejestruje tylko emisję z fluoroforów odpowiedzialnych za emisję przy określonej różnicy energii między wzbudzeniem i emisją. Badania pokazują, że w miarę poszerzania się $\Delta\lambda$ rejestrowane pasma się poszerzają, a ich natężenia maleje. Widma FI kwasów huminowych skanowane synchronicznie traktowane są jako „finger print” środowiska, z którego pochodzą. Cechą odróżniającą widma pochodzące z glebowych SH jest brak pasma w obszarze krótkofalowym – charakterystycznego dla SH osadów jeziornych (Rys. 4.5.4).

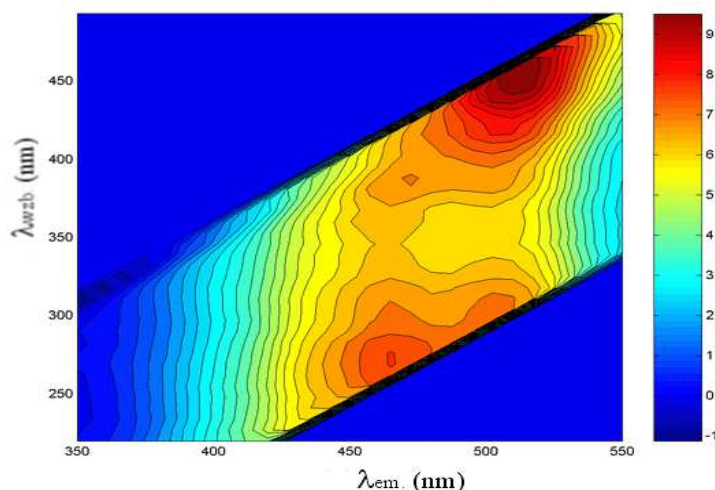


Rys. 4.5.4. Widma FI skanowane synchronicznie KH pochodzących z osadów jeziornych (1) i gleb (2) rejestrowane dla $\Delta\lambda = 20$ nm

Trójwymiarowe widma fluorescencji 3-D – macierzowe widma wzbudzenia i emisji (spektroskopia EEM)

Rejestracja widm macierzowych (map fluorescencji) stała się popularną techniką do charakteryzowania SMO pochodzącej z różnych środowisk. Technika ta zapewnia całościowy i kompletny wgląd we wszystkie cechy występujące w wybranym zakresie widma oraz pozwala na analizę par długości fal wzbudzenia i emisji, przy których badany obiekt wykazuje maksima fluorescencji (Rys. 4.5.5).

W ostatnich latach interpretację widm FI 3-D prowadzi się w połączeniu z równoległą analizą czynnikową (PARAFAC) Analiza ta pozwala na wydzielenie poszczególnych grup fluoroforów oraz ocenę podobieństw lub ich braku w składzie grup fluoryzujących występujących w SH. Technika ta może również dostarczać informacji na temat dynamiki przemian SH w środowisku (Mielnik 2013).



Rys. 4.5.5. Przykładowe widmo fluorescencji 3-D roztworu kwasów huminowych (www.humicsubstances.org, 30.07.13 – rysunek zmodyfikowany)

Pomiary „długożyciowej” opóźnionej luminescencji (DOL)

Z prac prezentowanych przez Mielnik (2009), Mielnik i in. (2009), Mielnik (2013) wynika, że roztwory SH (zarówno KH i KF) wykazują zdolność do emisji „długożyciowej” opóźnionej luminescencji.

Zjawisko „długożyciowej” fotoindukowanej luminescencji polega na wolniejszym, niż to ma miejsce w przypadku fluorescencji, zanikaniu świecenia materiału po zaprzestaniu jego naświetlania. Związane jest z łańcuchowymi procesami wywołanymi pochłonięciem (absorpcją) światła, w których zaabsorbowana energia inicjuje transport energii wewnątrz cząsteczki. Proces ten prowadzi do zmian strukturalnych i konformacyjnych w obrębie danej molekuly. Emisja DOL rozciąga się w całym zakresie widma, jednak jej maksimum przesunięte jest hipsochromowo (w kierunku krótszych długości fal) w stosunku do maksimum „normalnej” Fl (Istvánovics i in. 2005).

Badanie opóźnionej luminescencji, SH jest stosunkowo nowym, ale obiecującym zastosowaniem tej metody w badaniach ekologicznych. Wskazują na to badania prowadzone w Katedrze Fizyki i Agrofizyki ZUT w Szczecinie. Prototypowe na razie techniki pomiaru DOL dostarczają informacji na temat fotoreaktywności SH. Mogą również pozwolić na monitorowanie przemian, zachodzących podczas procesu tworzenia się tych substancji. DOL bada się zazwyczaj poprzez rejestrację kinetyki zaniku tego świecenia lub rejestrację jego natężenia w określonym czasie po naświetleniu materiału. Natężenie DOL danego materiału, reje-

strowane w ustalonych warunkach pomiarowych, zależy od szeregu czynników takich jak: długość światła wzbudzającego DOL oraz jego natężenie, liczba i rodzaj luminoforów, pH, obecność lub brak tlenu, szybkość przepływu (szybkość mieszania próby podczas pomiaru, Mielnik 2009, Mielnik 2013). Wadą tej metody jest wymagana stosunkowo duża objętość badanego roztworu, więc i użytej substancji – zaletą, możliwość zastosowania tej metody badaniach „in situ” w szczególności w badaniach wodnego humusu.

PIŚMIENNICTWO

- Gołębiowska D., 2004. Metody badań substancji humusowych ekosystemów wodnych i lądowych. Gołębiowska D. (red.), Wyd. Akademii Rolniczej w Szczecinie.
- Huguet A., Vacher L., Relexans S., Saubusse S., Froidefond J.M., Parlanti E., 2009. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 40, 706-719.
- Istvámovics V., Honti M., Osztóics A., Shafik H.M., Panisk J., Yacobi Y., Eckert W., 2005. Continuous monitoring of phytoplankton dynamics in lake Balaton (Hungary) using on-line delayed fluorescence excitation spectroscopy. *Freshwater Biology*, 50, 1950-1970.
- Kononowa M., 1968. Substancje organiczne gleby, ich budowa, właściwości i metody badań. PWRiL, Warszawa.
- Mielnik L., 2009. The application of photoinduced luminescence in research on humic substances of various origins. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 38(3), 61-67.
- Mielnik L., 2013. Charakterystyka materii organicznej osadów jeziornych przy zastosowaniu metod fotoluminescencyjnych. Rozprawa habilitacyjna, PTSH, Wrocław, str. 90.
- Mielnik L., Prokowski Z., Mila A., 2009. Długożyciowa opóźniona luminescencja materii organicznej – nowa metoda badania substancji humusowych. *Gaz, Woda i technika Sanitarna*, 9, 57-59.
- Milori D.M.B.P., Martin-Neto L., Bayer C., Mielniczuk J., 2002. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. *Soil Science*, 167(11), 739-749.
- Senesi N., 1990. Molecular and quantitative aspects of the chemistry of fulvic acid and its interactions with metal ions and organic chemicals. Part II. The fluorescence spectroscopy approach. *Anal. Chim. Acta.*, 232, 77-106.
- Stevenson F.J., 1982. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. John Wiley and Sons (ed), New York Chichester Brisbane Toronto Singapore.
- Zsolnay A., 2003. Dissolved organic matter: artefacts, definitions and functions. *Geoderma*, 187-209.

4.6. Zastosowanie metod luminescencyjnych w badaniach roślin

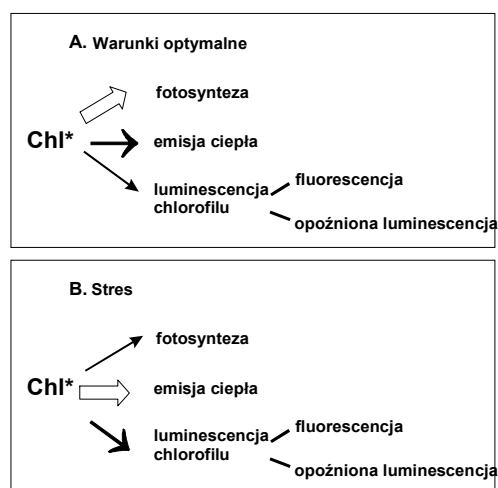
Antoni Murkowski, Renata Matuszak-Slamani, Andrzej Gawlik, Andrzej Mila

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Na rośliny rosnące w naturalnych warunkach oddziałuje wiele niekorzystnych biotycznych i abiotycznych czynników stresowych, które mogą zakłócać procesy bioenergetyczne, zmieniać metabolizm roślin, powodować uszkodzenia ich struktur komórkowych i tym samym wpływać na obniżenie plonu.

Do identyfikacji stanów stresowych stosuje się wiele klasycznych ekofizjologicznych metod pomiaru intensywności fotosyntezy, oddychania, przewodnictwa szparkowego, potencjału wody, zawartości fotosyntetycznych barwników lub koncentracji metabolitów po stresie. Jednak najbardziej precyzyjne metody opierają się na badaniu procesów fizjologicznych, a wśród nich procesu fotosyntezy. Większość czynników stresowych, nawet, jeśli nie oddziałują bezpośrednio na aparat fotosyntetyczny lub jego funkcje, będzie w końcu oddziaływać na proces fotosyntezy.

W fizjologicznie optymalnych warunkach około 80-90% zaabsorbowanej energii przez cząsteczki chlorofilu jest przekazywana na proces fotosyntezy, 5-15% rozpraszane w postaci ciepła, a 0,5-5% stanowi luminescencję (Rys. 4.6.1).



Rys. 4.6.1. Schemat przekazywania wzbudzenia przez chlorofil a (Chl*) w warunkach optymalnych (A) i stresowych (B) (wg. Lichtenthaler 1996)

W stanach stresowych produkcja fotosyntetyczna maleje natomiast wzrasta emisja ciepła i luminescencja chlorofilu (Rys. 4.6.1B). Wywołane zmiany w transporcie elektronowym, jak i uszkodzenia aparatu fotosyntetycznego, mogą być łatwo wykryte przez nieinwazyjne i niedestrukcyjne dla roślin metody pomiaru luminescencji (indukcję fluorescencji lub opóźnioną luminescencję) chlorofilu.

Fluorescencja chlorofilu

Fotosynteza jest najważniejszym procesem energetycznym w naszej biosferze, bowiem umożliwia zamianę labilnej energii promieniowania słonecznego w zakresie fotosyntetycznie czynnym PAR (400-700 nm) na stabilne formy energii chemicznej zawartej w roślinnych produktach żywnościowych i paszowych. Kluczową reakcją, w tym złożonym procesie jest fotochemiczny rozkład cząsteczek wody na wodór (niezbędny czynnik umożliwiający redukcję CO₂) oraz tlen cząsteczkowy, będący dla roślin produktem ubocznym.

Podczas fotosyntezy można wyróżnić trzy główne etapy konwersji energii świetlnej: fotofizyczny (przekazanie energii fotowzbudzenia z cząsteczek barwników fotosyntetycznych w „antenie” do chlorofilu w centrach reakcji), fotochemiczny (ciąg reakcji oksydo-redukcyjnych, w których następuje fotoliza wody, wytwarzany jest czynnik redukcyjny NADPH oraz wysokoenergetyczny związek ATP) i biochemiczny (cykl Calvina-Bensona), w którym CO₂ zostaje zredukowane przez NADPH do poziomu cukrów. Efektywność całego procesu fotosyntezy zależy od zharmonizowania jego etapów, mających różny czas trwania (od nanosekund do minut). Na skutek oddziaływania niesprzyjających warunków środowiska maleje efektywność przemian energetycznych w przebiegu wymienionych etapów i zwiększa się ilość energii traconej, głównie w postaci rozproszenia ciepłego oraz emisji fluorescencji z cząsteczek chlorofilu (Kalaji i Łoboda 2010, Murkowski 2002, Veselovsky i Veselova, 1990).

Analizując zmiany natężenia fluorescencji emitowanej z fotosyntetyzujących tkanek roślin można w sposób nieinwazyjny, szybko i wnikliwie wnioskować o kondycji roślin i ich odporności na czynniki stresowe, a pośrednio również o aktualnym stanie fizjologicznym całej rośliny (Kalaji i Łoboda 2010, Murkowski 2002, Rizza i in. 2001). Szczególnie dużo wartościowych informacji można uzyskać rejestrując zmiany wydajności fluorescencji chlorofilu podczas indukcji tego procesu, który następuje w momencie oświetlenia roślin poddanych wcześniej kilkunastominutowej adaptacji ciemniowej. Do pomiarów i analizy przebiegu indukcji fluorescencji chlorofilu służą specjalne fluorymetry do pomiarów bezpośrednich, np. Handy PEA prod. Hansatech, OS-30p prod. ADC, lub fluorymetry do pomiarów impulsowych, np. FMS2 prod. Hansatech, PAM-2500, PAM 200, Mini PAM prod. Walz (Kalaji i Łoboda 2010).

Opóźniona luminescencja

Opóźniona luminescencja (OL) aparatu fotosyntetycznego została odkryta w 1951 r. przez Strehlera i Arnolda, a teoretycznie opisana w późniejszych latach (Jursinic 1986, Veselovsky i Veselova 1990). OL jest obserwowana po odcięciu dopływu światła aktywnego do fotosyntetyzujących tkanek roślinnych lub komórek glonów. Emisja OL jest wynikiem rekombinacji promienistej wzbudzonych elektronów znajdujących się aktualnie na zredukowanych poziomach akceptorowych (w łańcuchu przenośników elektronów w II fotosystemie), z dodatnimi ładunkami zlokalizowanymi na jonach manganu w kompleksie rozkładu wody (Rutherford i Inoue 1984).

W zależności od zastosowanej aparatury i od czułości fotodetektora OL może być rejestrowana w zakresie od kilku milisekund, aż do kilkudziesięciu minut od momentu wyłączeniu oświetlenia. Widmo jej emisji jest podobne do widma fluorescencji chlorofilu, ponieważ OL jest prawie w całości emitowana z cząsteczek chlorofilu w fotosystemie II (Jursinic 1986, Veselovsky i Veselova 1990).

Nieinwazyjne metody pomiaru OL (podobnie jak pomiary fluorescencji chlorofilu) służą do badania przebiegu reakcji fotosyntezy i wpływu na nie różnych czynników stresowych (Murkowski, 2002, Veselovsky i Veselova, 1990). Rejestrując i analizując przebieg OL w poszczególnych przedziałach czasowych można badać początkowe reakcje fotosyntezy, określać mrozoodporność roślin oraz ich tolerancję na chłód i suszę, oceniać zanieczyszczenie gleby i wody herbicydami (Brzóstowicz i in. 2002, Murkowski i Skórska 1994), Pomiary OL służą do badania glonów, a także z dużą dokładnością pozwalają określać biomasę fitoplanktonu (Prokowski i in. 1985, Prokowski i Mielnik 2012).

Detekcja OL zielonych liści pozwala na ocenę wrażliwości ich błon chloroplastowych, a pośrednio dostarcza informacji o stanie fizjologicznym całej rośliny i jej odporności na czynniki stresowe. a także pozwala na szybką ocenę uszkodzeń poststresowych (Brzóstowicz 1999, Brzóstowicz i in. 2002, Matuszak i Brzóstowicz 2006).

Właściwości OL, mechanizmy jej generacji, wydajność kwantową, kinetyki zaniku, widma wzbudzenia i emisji i in., można badać przy użyciu fosforoskopów lub specjalnych wysokoczułych luminometrów. Detekcja OL, zwłaszcza w zakresie sekundowym i dłuższym, jest dotąd rzadko wykorzystywana w praktyce, a przyczyną tego jest brak dostępnej, profesjonalnej aparatury pomiarowej. W Polsce, badania OL oraz prace nad wdrożeniem tego zjawiska w ekofizjologii, hydrobiologii i w praktyce rolniczej są prowadzone w Katedrze Fizyki i Agrofizyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Ultraślaba biochemiluminescencja

Świecenie żywych organizmów, czyli bioluminescencja jest zjawiskiem, które od niepamiętnych czasów fascynuje człowieka. Bioluminescencję opisywali już starożytni, a także uczeni w średniowieczu. To widoczne promieniowanie ma charakter enzymatyczny i jest wynikiem utleniania organicznych substancji – lucyferyn przy udziale specyficznych enzymów – lucyferaz. Zdolność do bioluminescencji posiadają niektóre bakterie, stawonogi i zwierzęta wodne żyjące, na ogół w tropikalnym klimacie. Dopiero w wieku XX wykryto, że bardzo słabe emisje promieniowania z żywych tkanek są zjawiskiem powszechnym i nazwano to zjawisko ultrasłabą biochemiluminescencją (UBCL). W 1954 roku dwaj astrofizycy włoscy L. Colli i U. Facchini, dysponując wysokoczułym fotodetekтором – fotopowielaczem, po raz pierwszy zarejestrowali emisję fotonów z kielków roślinnych. W latach sześćdziesiątych rosyjscy naukowcy zaobserwowali emisję UBCL z 90 różnych obiektów biologicznych (Tarusov i Veselovsky 1978). UBCL – jest jedną z form bardzo słabego świecenia organizmów żywych. Polega ona na emisji promieniowania elektromagnetycznego o długości fali od 180 nm do 800 nm. Natężenie tego sygnału jest bardzo małe, zwykle poniżej 10^4 fotonów w czasie sekundy z 1 cm² próbki (Sławiński i in. 1989).

Różnym reakcjom biochemicznym zachodzącym w roślinach odpowiadają odmienne widma biochemiluminescencji. Długość fali tego promieniowania jest uzależniona od ilości energii wydzielonej podczas danej reakcji biochemicznej. Stwierdzono, że UBCL pochodząca od wewnętrznie wzbudzonych cząsteczek chlorofilu *a* i *b*, emitowana jest w zakresie dalekiej czerwieni, powyżej 665 nm (Sławiński 1989, Grabikowski 1977, Murkowski 2002). Emisja ultrasłabego świecenia, towarzysząca rozpadowi H₂O₂, rozciąga się od 430 nm do 530 nm, z maksimumami w 460 nm i 510 nm (Kruk 1998). Chemiluminescencję związaną z utlenianiem niektórych substancji przez H₂O₂ charakteryzują maksima w 480 nm; 535 nm; 580 nm i 635 nm. Aktywne mitochondria wypromieniowują UBCL w zakresie (450-600) nm z maksimum w 540 nm (Sławiński 1989, Grabikowski 1977). Podczas utleniania lipidów rejestrowana jest UBCL w szerokim zakresie części widzialnej. Przy utlenianiu kwasu oleinowego stwierdzono maksima 500-510 nm, 550-570 nm, 600-610 nm (Skórska 1993). Zarejestrowano również emisję słabego promieniowania pochodzącego od cząsteczek tlenu, a związanego z ich przejściem od wzbudzonych stanów singletowych do podstawowego stanu trypletowego. Luminescencja tego rodzaju znajduje się w zakresie widmowym z maksimum w 381 nm, 478 nm, 580 nm oraz 635 nm (Sławiński 1989, Grabikowski 1977, Kruk 1998). Badania rejestrujące skład widmowy UBCL są utrudnione z powodu braku na rynku profesjonalnej aparatury pomiarowej. Wszelkie dotychczasowe badania

prowadzone są na wysokoczułych, prototypowych urządzeniach własnej konstrukcji, co w znacznym stopniu ogranicza krąg potencjalnych użytkowników.

PIŚMIENNICTWO

- Brzóstowicz A., 1999. Zastosowanie opóźnionej luminescencji do badania wpływu niskiej temperatury na rośliny uprawne. Rozprawy, nr 188, Akademia Rolnicza w Szczecinie.
- Brzóstowicz A., Janicki W., Matuszak R., 2002. Badanie roślin metodami luminescencyjnymi. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 221-225.
- Grabikowski E., Pieniawski J., Puzyna W., Sławiński J., 1977. The influence of photooxidation products of humic acids on germination and growth of wheat seeds. *Zesz. Nauk. AR w Szczecinie, Rolnictwo*, XVI, 117-127.
- Jursinic P.A., 1986. Delayed fluorescence: current concepts and status. In: *Light emission by plants and bacteria*, ed. Govindjee, J. Amesz, D.C. Fork, Academic Press, Orlando, 291-328.
- Kalaji M.H., Løboda T., 2010. Fluorescencja chlorofilu w badaniach stanu fizjologicznego roślin. *Wyd. Agrophys.*, 61, 3-158. SGGW, Warszawa.
- Kruk I., 1998. *Environmental Toxicology and Chemistry of Oxygen Species*. Verlag Berlin Heidelberg.
- Lichtenthaler H.K., 1996. *Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants*. *J. Plant Physiol.*, 148, 4-14.
- Matuszak R., Brzóstowicz A., 2006. Luminescence evaluation of the influence of NaCl on frost resistance of triticale seedlings. *Ecological Chemistry and Engineering*, 13(7), 675-679.
- Murkowski A., 2002. Oddziaływanie czynników stresowych na luminescencję chlorofilu w aparacie fotosyntetycznym roślin uprawnych. *Acta Agrophysica* 61, monografia.
- Murkowski A., Skórska E., 1994. Ocena wrażliwości pszenżyta na herbicydy triazynowe. *Zesz. Nauk. AR w Szczecinie* 162, 179-183.
- Prokowski Z., Brzóstowicz A., Grabikowski E., Murkowski A., 1985. Wykorzystanie detekcji luminescencji aparatu fotosyntetycznego do określenia zawartości chlorofilu *a* w fitoplanktonie. *Studia i Materiały Oceanologiczne*, 49, *Fizyka Morza*, 14, PAN KBM, 79-90.
- Prokowski Z., Mielnik L., 2012. Application of the Long-Term Delayed Luminescence for Study of Natural Water Environments. W: *Oceanography*. Marcelli M. (red.), 79-94.
- Rizza F., Pagani D., Stanca A.M., Cattivelli L., 2001. Use of chlorophyll fluorescence to evaluate the cold acclimation and freezing tolerance of winter and spring oats. *Plant Breeding*, 120, 389-396.
- Rutherford A. W., Inoue Y., 1984. Oscillation of the light luminescence from PSII: recombination of $S_2Q_B^-$ and $S_3Q_B^-$. *FEBS Lett.*, 165(2), 165-170.
- Skórska E., 1993. Adaptation of the measuring set recording ultra – weak chemiluminescence to evaluation of plant oil oxidation. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 399, 209-211.
- Sławiński J., 1989. Metody badania słabych emisji fotonowych z układów biologicznych. W: *Biospektroskopia 3*, pod red. J. Twardowskiego. Warszawa, 107-207.
- Tarusov B.N., Veselovsky V.A., 1978. Ultraweak luminescence from plants and its application (in Russian). Moscow State Publ. House, Moscow.
- Veselovsky V. A., Veselova T. V. 1990. Luminescence of plants (in Russian). Science, Moscow.

4.7. Fizyczne metody oceny jakości surowców roślinnych i produktów żywnościowych

Dorota Witrowa-Rajchert¹, Artur Zdunek², Paulina Wrona³, Barbara Krzysztofik³

¹Katedra Inżynierii Żywności i Organizacji Produkcji, Wydział Nauk o Żywności, SGGW w Warszawie

²Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

³Zakład Inżynierii Produkcji Rolno-Spożywczej, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, UR w Krakowie

Dynamicznie rozwijające się rolnictwo, przemysł przetwórczy i technologia żywności wymagają precyzyjnego określenia parametrów fizycznych surowców, półproduktów i produktów. Znajomość właściwości fizycznych jest niezbędna do oceny jakości surowców przeznaczonych do bezpośredniego spożycia, do prawidłowego zaprojektowania produktu, procesu technologicznego i sterowania nim oraz do projektowania urządzeń. Jest ona również niezbędna do przewidywania okresu trwałości żywności oraz doboru opakowań i warunków jej przechowywania. Określenie poszczególnych właściwości fizycznych jest możliwe dzięki zastosowaniu odpowiednich, najlepiej szybkich i skutecznych metod ich pomiaru.

Metody pomiaru rozmiaru, kształtu, objętości i wynikających z nich właściwości fizycznych

Kształt jest istotnym parametrem, mającym wpływ na przebieg procesów wymiany ciepła lub masy, sortowania, przesiewania i oceny jakości surowców i produktów żywnościowych. Najczęściej za miarę kształtu przyjmuje się jeden ze wskaźników, jak kolistość, kulistość, wydłużenie lub wypukłość. Stosowane w praktyce różne formuły współczynników kształtu wynikają z możliwości pomiarowych oraz metody pomiaru parametrów wyjściowych, czyli powierzchni i objętości materiału (cząstki) oraz obwodu i powierzchni rzutu materiału (cząstki).

Cząstki ciał stałych są najczęściej nieregularnymi bryłami, których wymiar jest niezwykle trudno wyznaczyć. Stosuje się pojęcie cząstki zastępczej, której rozmiar jest, co do wartości liczbowej, identyczny z odpowiednim rozmiarem cząstki rzeczywistej. Najczęściej średnica zastępcza to średnica cząstki kulistej, charakteryzującej się identycznymi właściwościami geometrycznymi, optycznymi, elektrycznymi lub aerodynamicznymi jak cząstka badana.

Objętość materiału (cząstki) może być wyznaczona na podstawie:

- obliczeń, w przypadku obiektu o regularnym kształcie;
- pomiarów eksperymentalnych, polegających na pomiarze objętości cieczy, gazu lub ciała stałego wypartego przez zanurzone w nim ciało;

- analizy obrazu danego obiektu.

Znajomość gęstości materiału jest niezbędna przy projektowaniu i analizie procesu separacji (np. wirowania czy sedymentacji), fluidyzacji (np. w suszarkach lub zamrażarkach fluidyzacyjnych), pneumatycznego i hydraulicznego transportu złóż ciał stałych i proszków, a w przypadku cieczy – do określania mocy pomp służących do ich transportu. Gęstość może być obliczona na podstawie pomiarów masy i objętości obiektu.

Oznaczenie gęstości surowców i produktów spożywczych przeprowadza się trzema metodami: **areometrycznie, hydrostatycznie oraz piknometrycznie**.

Metody **areometryczne** stosuje się do badania gęstości cieczy. Pomiar polega na zanurzeniu odpowiedniego aerometru, zbudowanego z bańki, trzpienia, na którym znajduje się skala, oraz z obciążenia w postaci śrutu lub rtęci, w badanym roztworze i odczytaniu jego gęstości ze skali.

Metoda **hydrostatyczna**, podobnie jak areometryczny pomiar gęstości, opiera się na prawie Archimedesesa. W metodzie hydrostatycznej do pomiaru gęstości używa się wagi hydrostatycznej. W przypadku pomiaru hydrostatycznego wykorzystuje się stałą objętość nurnika i masę roztworu wypartego przez nurnik, wynikająca z gęstości roztworu. Metoda hydrostatyczna jest nieco dokładniejsza od metody areometrycznej i pozwala określić gęstość roztworu do czwartego miejsca po przecinku.

Metoda **piknometryczna** polega na określeniu gęstości roztworu za pomocą piknometru, którego zasada działania wynika bezpośrednio z definicji gęstości, tzn. stosunek masy określonej objętości roztworu do masy tej samej objętości wody w tej samej temperaturze. Samo oznaczenie sprowadza się do oznaczenia masy piknometru pustego, z wodą i z badanym roztworem. Do pomiarów gęstości ciał stałych stosuje się piknometry gazowe, opisane w następnym rozdziale.

Metody pomiaru właściwości materiałów sypkich

Materiały sypkie, surowce, półprodukty czy też produkty w formie zbioru cząstek stałych stosowane są w wielu technologiach w przetwórstwie żywności. Procesy jednostkowe, w których występują materiały sypkie obejmują zarówno operacje związane bezpośrednio z wytwarzaniem żywności, jak również operacje transportu, magazynowania, dozowania i przechowywania. Odrębność i złożoność właściwości fizycznych wynika z dwu- lub trójfazowej budowy materiałów sypkich: jedną stanowią cząstki ciała stałego, pozostałe to gaz i ciecz wypełniające pory. Do najważniejszych właściwości proszków należą m.in.: skład granulometryczny, gęstość, sypkość, właściwości rekonstrykcyjne.

Pomiar **rozkładu granulometrycznego** materiałów sypkich polega na zakwalifikowaniu średnicy każdej cząstki do odpowiedniej frakcji. Realizuje się go

najczęściej za pomocą **sitowej analizy geometrycznej** lub metodą **dyfrakcji laserowej**. W sitowej analizie granulometrycznej wyznacza się masę cząstek, które w trakcie przesiewania proszku przez kolejne sита o coraz mniejszych średnicach oczek pozostają na konkretnym sicie. Podstawą metody dyfrakcji laserowej jest fakt, że kąt dyfrakcji rozproszonego światła laserowego jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości cząstek. Pomiar cząstek odbywa się w zawiesinie cieczowej lub gazowej. Metoda jest bardzo dokładna w szerokim zakresie wielkości cząstek, szybka i powtarzalna, ale musi być znany współczynnik załamania światła materiału cząstki i ośrodka dyspergującego.

Gęstość materiałów sypkich jest definiowana, w zależności od rodzaju ich objętości i metody jej oznaczania, jako: gęstość rzeczywista, pozorna i nasypowa. **Gęstość rzeczywista** cząstki to gęstość substancji tworzącej cząstkę (objętość cząstki pomniejszona o objętość porów zamkniętych i otwartych). Oblicza się ją na podstawie gęstości poszczególnych składników suchej substancji i ich udziału w składzie cząstki.

Gęstość pozorna cząstki to stosunek masy cząstki do jej objętości zmniejszonej o objętość porów otwartych. Objętość cząstki, obejmująca pory wewnętrzne, które nie są połączone z otaczającą atmosferą, oznacza się metodami piknometrii gazowej lub cieczowej. Piknometry cieczowe umożliwiają tylko przybliżony pomiar objętości, z uwagi na niecałkowitą penetrację wszystkich porów w obrębie cząstki i przestrzeni międzycząsteczkowych. Dokładniejszy pomiar objętości uzyskuje się przy zastosowaniu piknometrów gazowych, w których gaz, jako medium pomiarowe, penetruje wszystkie pory otwarte cząstek. Gazem zalecanym do pomiaru jest hel, którego małe cząsteczki mogą wnikać w pory o rozmiarach 10^{-10} m.

Gęstość nasypowa proszków to stosunek masy proszku do całkowitej jego objętości, która uwzględnia objętość substancji proszku, otwarte i zamknięte pory cząstek oraz przestrzenie międzycząsteczkowe. Gęstość nasypowa pozwala ocenić stopień wypełnienia materiałami sypkimi zbiorników i opakowań, a jej wartość zależy od stopnia upakowania cząstek w złożu. Podstawowe typy gęstości nasypowej to luźna i utrzęsiona. Gęstość nasypowa luźna to gęstość złoża proszku swobodnie usypanego, zaś gęstość nasypowa utrzęsiona to gęstość złoża proszku utrzęsionego standardowo, w specjalnych warunkach. Zgodnie z wytycznymi norm, pomiar gęstości nasypowej utrzęsionej polega na doprowadzeniu znanej masy proszku do najmniejszej objętości poprzez zastosowanie drgań o stałej amplitudzie i częstotliwości.

Możliwość ilościowej oceny zdolności materiałów sypkich do płynięcia, określanej jako **sympkość**, a zależnej od sił kohezji i adhezji oraz tarcia wewnętrznego, jest istotna przy projektowaniu procesów technologicznych i wpływa na jakość surowca i produktu. W praktyce nie ma jednej uniwersalnej standardowej metody, pozwalającej na miarodajne i szybkie pomiary płynięcia proszków. Często w kontroli jakości użyteczne są metody szybkie, powtarzalne i dokładne. Dla-

tego jako wyróżniki jakościowe sypkości wykorzystuje się następujące właściwości: kąt nasypu, kąt zsypania, ściśliwość, gęstość nasypowa, zdolność do upakowania na skutek wstrząsania, czas przesypu przez znormalizowany otwór, czas wysypu w określonych warunkach.

W ostatnich latach zaproponowano szereg konstrukcji testerów proszków, które mogą być wykorzystywane w odpowiednim miejscu linii produkcyjnej. Urządzenia te, w przeciwieństwie do fizycznych metod wyznaczania parametrów materiałowych pozwalają ocenić jakość (sypkość) proszku w umownej skali, z pominięciem bezpośredniego odniesienia do takich właściwości jak kohezja, adhezja czy tarcie wewnętrzne.

Właściwości rekonstruktoryjne są określane na podstawie zdolności proszków do zwilżania, opadania, dyspersji i rozpuszczania. Proszki charakteryzują się właściwościami instant, jeśli całkowity czas ich odtwarzania w cieczy, przy wysokości nasypu na powierzchnię cieczy 10 mm, wynosi od kilku do kilkudziesięciu sekund. W pomiarach właściwości instant najważniejszym wskaźnikiem jest **czas zwilżania**. Procedury oceny właściwości instant dotyczą maksymalnego dozwolonego czasu zwilżania w określonych warunkach pomiaru, do których zalicza się: temperaturę rozpuszczania, obszar powierzchni cieczy, masa proszku, metoda podawania proszku na powierzchnię cieczy, sposób mieszania/bez mieszania.

Metody pomiaru właściwości sorpcyjnych

Zjawisko adsorpcji fizycznej par i gazów, a także ich desorpcja decydują o przebiegu takich procesów, jak suszenie, wędzenie, osuszanie powietrza, a także determinują w znacznym stopniu jakość i trwałość surowców i produktów spożywczych. W badaniach równowagi adsorpcyjnej najczęściej określa się zależność pomiędzy ilością zaadsorbowanej wody przez jednostkę masy próbki i aktywnością wody w stałej temperaturze i przy stałym ciśnieniu całkowitym, czyli izotermę sorpcji (adsorpcji lub desorpcji).

Do wyznaczania izoterm sorpcji najczęściej stosowane są metody oparte na zasadach równowagi termodynamicznej. Najprostszą i najpowszechniejszą jest metoda statyczno-eksykatorowa. Próbki o znanej masie umieszczane są w zamkniętych ekcykatorach, w których jako czynnik higrostatyczny stosowane są nasycone roztwory soli. Po osiągnięciu stanu równowagi określany jest wagowo przyrost lub ubytek masy próbki. Istotną wadą tej metody jest długi czas pomiaru, wynoszący około 12 tygodni. Zaproponowano wiele rozwiązań, pozwalających skrócić ten czas, np. poprzez zmniejszenie ciśnienia w układzie, równoczesne mieszanie powietrza nad próbką oraz nasyconymi roztworami soli czy obracanie próbek.

Coraz częściej w badaniach właściwości sorpcyjnych stosowane są automatyczne, wielofunkcyjne analizatory, pozwalające szybko określić izotermę ad-

sorpcji i desorpcji, powierzchnię właściwą, ciepło adsorpcji i desorpcji, całkowitą objętość porów oraz ich średnią wielkość. Czas pomiaru trwa 15-20 godzin w zakresie temperatur 15-45°C, a aparaty charakteryzują się dużą dokładnością.

Metody pomiaru właściwości cieplnych

Znajomość właściwości cieplnych surowców i produktów jest istotna przy ilościowym opisie procesów cieplnych, występujących podczas przetwarzania, przechowywania i transportu żywności. Największe znaczenie w projektowaniu procesów technologicznych oraz konstruowaniu urządzeń mają ciepło właściwe, przewodność cieplna właściwa, współczynnik wyrównywania temperatury (dyfuzyjność cieplna) oraz entalpia właściwa.

Najczęściej stosowaną metodą kalorymetryczną do pomiaru ciepła właściwego i entalpii, charakteryzującą się dużą dokładnością, krótkim czasem pomiaru i niewielką masą próbki, jest metoda różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC – *differential scanning calorimetry*). Jej zasada polega na pomiarze zmiany różnicy strumienia ciepła, powstającego między próbką badaną i referencyjną w trakcie przemiany termicznej, polegającej najczęściej na ogrzewaniu próbek ze stałą szybkością do temperatury założonej w eksperymencie. Ciepło właściwe może być określone z odpowiedniego wzoru, na podstawie wartości strumienia ciepła, szybkości ogrzewania i masy próbki. Entalpię właściwą można wyznaczyć jako pole pod krzywą DSC, będącej graficznym obrazem zależności strumienia ciepła i temperatury. Termogram ten umożliwi również określenie wartości temperatury przemiany szklistej, rejestrowanej jako załamanie na krzywej, wynikające ze zmiany pojemności cieplnej pomiędzy stanem szklistym i gumiatym.

Metody pomiaru przewodności cieplnej właściwej można podzielić na stacjonarne i niestacjonarne. Metody niestacjonarne charakteryzują się niezmiennością pola temperatury w badanej próbce. Można wśród nich wyróżnić metody stacjonarne porównawcze, które wymagają wzorca o znanej przewodności cieplnej właściwej, oraz bezwzględne, w których niezbędna jest znajomość gęstości strumienia ciepła przepływającego przez próbkę. W metodach stacjonarnych można stosować nagrzewanie zewnętrzne lub wewnętrzne źródło ciepła (nagrzewanie zachodzi w wyniku przepływającego prądu elektrycznego). Przewodność cieplną właściwą oblicza się na podstawie znajomości strumienia ciepła, odległości pomiędzy umieszczonymi w próbce czujnikami temperatury oraz odpowiadającymi im wartościami temperatury.

W metodach niestacjonarnych wyznacza się dyfuzyjność cieplną, określającą zdolność ciała do przewodzenia ciepła w warunkach nieustalonych (zmiennosc pola temperatury w próbce w czasie). Przewodność cieplną właściwą oblicza się na podstawie znajomości dyfuzyjności cieplnej, gęstości oraz ciepła właściwego

badanej próbki. Do metod niestacjonarnych zalicza się metody: sondy cieplnej, ogrzewanego drutu, ogrzewanej taśmy, skoku jednostkowego i fal cieplnych. Najpopularniejsze są metody, w których wykorzystuje się liniowe źródło ciepła w postaci sondy cieplnej lub ogrzewanego drutu.

Metody niestacjonarne są bardziej przydatne do pomiaru przewodności cieplnej heterogenicznej żywności, zawierającej duże ilości wody. Charakteryzują się krótkim czasem pomiaru i ograniczonym wzrostem temperatury próbki, co, mimo niezbyt wysokiej dokładności wyników, faworyzuje te metody do zastosowania w pomiarach właściwości cieplnych surowców i produktów żywnościowych. Metody stacjonarne charakteryzują się dużą dokładnością, ale czas pomiaru może dochodzić nawet do kilkunastu godzin.

Metody pomiaru właściwości reologicznych

Surowce, półprodukty i produkty w przemyśle spożywczym występują w stałym i ciekłym stanie skupienia. W trakcie przetwarzania bardzo często zmienia się konsystencja bądź struktura materiału. Istotna jest więc znajomość właściwości materiału, które wiążą się z jego zachowaniem pod wpływem różnego rodzaju odkształceń, wywołanych przez siły zewnętrzne oddziałujące podczas zbioru, przechowywania i procesu technologicznego.

Ciekłe półprodukty i produkty żywnościowe (np. soki owocowe lub warzywne) często są transportowane wewnątrz zakładu produkcyjnego, a wiele operacji technologicznych odbywa się w przepływie, np. ogrzewanie i chłodzenie, mieszanie czy dozowanie. Wymagana jest więc znajomość właściwości związanych z zachowaniem się płynu pod wpływem odkształceń wywołanych przez siły zewnętrzne, np. lepkości płynnych produktów. **Metody wiskozymetryczne** są wykorzystywane do pomiarów parametrów reologicznych, charakteryzujących zachowanie podczas przepływu cieczy niutonowskich, nieniuonowskich reostabilnych oraz reologicznie niestabilnych.

Lepkość dynamiczną cieczy niutonowskich można wyznaczyć za pomocą lepkościomierza z opadającą kulką, tzw. **lepkościomierza Hoepplera**. Parametry kulki, wykonanej z materiału o znanej gęstości (tzw. stała kulki), określa się wstępnie w cieczy wzorcowej, o znanej lepkości i gęstości. Lepkość badanej cieczy (o znanej gęstości) wyznacza się, mierząc czas opadania kulki w rurce szklanej na tym samym odcinku co w cieczy wzorcowej. Pomiar lepkości przy pomocy wiskozymetru Hoepplera nie pozwala jednak stwierdzić, czy badana ciecz jest niutonowska, czy nie.

Aby określić właściwości reologiczne cieczy nieniuonowskiej, należy wyznaczyć jej krzywą płynięcia, w możliwie szerokim zakresie prędkości ścinania. Do wielopunktowych pomiarów parametrów reologicznych cieczy nieniuonow-

skich stosuje się wiskozymetry, zwane reometrami, których dwa podstawowe rodzaje to rotacyjne i kapilarne.

W **reometrach rotacyjnych** ścinanie badanej próbki o określonej objętości następuje pod wpływem obrotów elementu pomiarowego. Jako elementy pomiarowe najczęściej stosuje się współosiowe cylindry (do cieczy o małej lepkości <10 Pa·s lub niestabilnych zawiesin), równoległe płyty (do cieczy bardzo lepkich) lub układ płyta-stożek (do cieczy bardzo lepkich, a także zdyspergowanych, zawierających cząstki znacznych rozmiarów). Zmieniając częstość obrotów elementu wirującego, uzyskuje się dane (prędkość ścinania – naprężenie styczne) potrzebne do wykreślenia krzywej płynięcia.

W **wiskozymetrze kapilarnym** badana ciecz jest przetłaczana przez długie cylindryczne rurki (kapilary) o gładkiej powierzchni wewnętrznej. Wyznacza się zależność między strumieniem objętościowym przetłaczanej cieczy i spadkiem ciśnienia spowodowanym tarcie wewnętrznych cieczy. Jeśli zależność ta zostanie wyznaczona przy różnych strumieniach (lub spadkach ciśnienia), to, stosując odpowiednie obliczenia, można określić krzywą płynięcia. Najlepsze wiskozymetry kapilarne (np. model Ubbelohde) mają długie kapilary o małej średnicy (stosunek długości do średnicy wynosi zwykle 30:1 lub więcej). Zaletą reometrów kapilarnych jest, dzięki możliwości zastosowania zmiennych średnic kapilar oraz zmiennych ciśnień, bardzo szeroki zakres prędkości ścinania, co nie jest możliwe w przypadku reometrów rotacyjnych. Nie mogą być jednak stosowane do badania cieczy reologicznie niestabilnych, wykazujących zjawisko tiksotropii lub antytiksotropii.

Obecnie opracowuje się szereg metod instrumentalnych do oceny jakości surowców roślinnych i produktów żywnościowych, w tym opartych głównie na pomiarze zależności siła-odkształcenie-czas i wielkości fizycznych z nich wynikających. Takie obiektywne metody mogą być tańsze i szybsze, szczególnie w zastosowaniach przemysłowych. Metody instrumentalne można podzielić na niedestrukcyjne i destrukcyjne. Do pierwszych zalicza się np. metody wykorzystujące fale akustyczne, zjawisko rezonansu własnego czy metody laserowe lub sensory tarcia czy niedestrukcyjnych uderzeń. W drugiej grupie metod znajdują się metody wytrzymałościowe. Ponieważ proces jedzenia jest procesem destrukcyjnym, najwłaściwszym wydaje się stosowanie dużych deformacji i testów zniszczeniowych do jego symulacji. Najpopularniejszymi testami mechanicznymi w badaniach żywności są: **zginanie, rozciąganie i ściskanie**. Ściskanie jest testem najczęściej stosowanym, ponieważ jest najbliższe symulacji procesu gryzienia i żucia. Spośród wielu konfiguracji próbników używanych w testach ściskania najczęściej spotykanymi są ściskanie pomiędzy równoległymi płytami (np. test profilowej analizy tekstury lub jednokrotne jednoosiowe ściskanie) i test przebicia. Spośród innych testów wytrzymałościowych na uwagę zasługuje test trójpunktowego zginania próbki z karbem jednostronnym, który w ostatnich latach jest wprowadzany jako nowa metoda instrumentalna w ocenie tekstury owo-

ców i warzyw. W testach mechanicznych analizie poddawane są parametry krzywej naprężenie-odkształcenie-czas, takie jak moduł sprężystości, granica płynności biologicznej, granica wytrzymałości biologicznej, odporność na kruche pękanie oraz inne parametry związane z siłą i odkształceniem, które próbuje się korelować z cechami sensorycznymi badanych materiałów. Mimo wielu sukcesów tych prac należy stwierdzić, że procesy pękania, tak istotne dla konsumenta, są zawarte (a raczej „ukryte”) w parametrach mechanicznych. O amplitudzie sygnału dźwiękowego podczas niszczenia tkanki czy o liczbie zniszczonych komórek można się tylko domyślać z analizy krzywej siła-przemieszczenie. Nie ma więc bezpośredniej możliwości oceny kruchości lub chrupkości, czy prześledzenia procesu pękania podczas testu. W ostatnich latach razem z testem mechanicznym zaczęto stosować pomiar **emisji akustycznej** w trybie bezkontaktowym i kontaktowym. W pierwszym sposobie rejestruje się dźwięk, który powstaje w wyniku niszczenia przy pomocy mikrofonu, w drugim rozwiązaniu stosuje się sensor drgań będący w kontakcie z próbką. Szczególnie drugie rozwiązanie, ze względu na wysoką czułość i małą wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne, pokazało liczne możliwości klasyfikacji owoców pod kątem dojrzałości, różnic odmianowych, uwodnienia oraz suchych produktów żywnościowych ze względu na ich rodzaj, kruchość oraz stan wilgotności. Wyróżniki akustyczne tekstury produktów kruchych/chrupkich silnie korelują z wyróżnikami sensorycznymi tekstury i mogą być stosowane do oceny tekstury nawet w linii produkcyjnej, zastępując z powodzeniem drogie metody analizy sensorycznej.

Metody spektralne i optyczne w ocenie jakości surowców roślinnych i produktów żywnościowych

Zastosowanie metod spektroskopowych do oceny jakości surowców roślinnych i produktów żywnościowych opiera się na wykorzystaniu i interpretacji zjawisk, zachodzących podczas oddziaływania światła z materią. Padające światło na obiekt biologiczny może zostać zaabsorbowane, wypromieniowane, odbite lub rozproszone co dostarcza informacji o mikro- i makrostrukturze oświetlanego obiektu, budowie biochemicznej oraz ruchu i kształtach poszczególnych jego składników. Analizie poddawane są widma, w których na osi x odkłada się długość fali, natomiast na osi y intensywność widma absorpcji, odbicia, lub fluorescencji.

W ostatnich latach intensywnie rozwijają się **metody multispektralne i hiperspektralne**, które polegają na pozyskiwaniu przestrzennych map intensywności w wybranych lub pełnych zakresach widm spektralnych. Metoda multispektralnego obrazowania polega na uzyskaniu obrazu z danego obszaru w wybranym paśmie optycznym lub w kilku wybranych, bardzo wąskich pasmach (np. w trzech kanałach RGB), zwykle wycinanych przy pomocy filtrów lub zapisywanych przez wyspecjalizowane detektory. Metoda hiperspektralnego obrazowania polega na uży-

skaniu obrazu z danego obszaru, gdzie każdy piksel jest reprezentowany przez pełne widmo lub wybrany zakres widma. W zależności od badanego obiektu używa się różnych zakresów długości fali promieniowania elektromagnetycznego, np. niebieskie (450-520 nm) do analizy atmosfery i wody, zielone (515-600 nm) do analizy roślin i wody, czerwone (600-690 nm) do analizy wody, gleby i roślin, bliska podczerwień (750-900 nm) do analizy cech roślin. Aby z dużej ilości danych spektralnych użyć uproszczonych wartości, do charakterystyki pokrywy roślinnej wprowadzono tzw. teledetekcyjne wskaźniki roślinności, np. simple ratio index – vegetation index (RVI) – wskaźnik kondycji roślin, mierzony jest za pomocą stosunku odbicia w dwóch kanałach – podczerwonym i czerwonym: $RVI = NIR / RED$ lub normalized difference vegetation index (NDVI) – wskaźnik kondycji roślin, proces fotosyntezy, prognozuje plony itd. Obliczany jest za pomocą stosunku różnicy odbicia w kanale podczerwonym i czerwonym do sumy odbicia w tych kanałach: $NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED)$.

Odrębną grupę metod optycznych stanowią te, które używają światła laserowego tj. **spektroskopia fali odbitej analizowanej w funkcji czasu – TRS** (*time-resolved reflectance spectroscopy*), **rozpraszania wstecznego** (*light backscattering*) i **biospeckle**.

Metoda TRS polega na oświetleniu badanego obiektu bardzo krótkim monochromatycznym impulsem i analizie kształtu oraz przesunięcia w czasie tego impulsu po przejściu przez badany materiał. W przypadku owoców nadajnik (końcówka światłowodu) jest przyłożony do skórki, a odbiornik znajduje się odległości ok. 1 cm od nadajnika. Światło wchodzące do materiału biologicznego ulega biochemicznej absorpcji oraz fizycznemu rozpraszaniu wewnątrz materiału, co powoduje, że impuls wychodzący jest zmieniony w stosunku do wchodzącego: ulega poszerzeniu. Uważa się, że w wyniku oddziaływań światła na poszczególnych elementach struktury tkanki metoda TRS dostarcza informacji o absorpcji i odbiciu z obszaru o charakterystycznym kształcie banana. Na podstawie teorii dyfuzji w jednorodnym medium można opisać profil rejestrowanego impulsu i wyznaczyć współczynniki absorpcji i rozpraszania. Współczynnik absorpcji wiąże się ze składem chemicznym próbki, podczas gdy współczynnik rozpraszania powiązany jest ze strukturą tkanki i rozmieszczeniem powietrza i wody.

Rozproszenie wsteczne jest techniką wykorzystująca ciągle monochromatyczne światło laserowe. Analizowany jest przestrzenny rozkład światła rozproszonego od obiektu. W metodzie tej wąska wiązka laserowa pada na badany obiekt, tworząc charakterystyczny dla danego materiału obszar rozpraszania. Stosuje się dwa sposoby analizy tego rozpraszania. W pierwszym, wzdłuż promienia wzoru rozproszonego umieszcza się spektrometry, uzyskując w ten sposób widma spektralne w zależności od odległości od miejsca padania wiązki lasera. Jest to metoda zbliżona do analizy hiperspektralnej – zamiast kilku detektorów możliwe

jest użycie kamery hiperspektralnej. W drugim sposobie analizowana jest tylko średnica pierścienia rozpraszania. Drugi sposób, o wiele prostszy, wykorzystuje zazwyczaj kamery CCD, a do analizy powierzchni plamy stosowane są proste metody analizy obrazu z korektą uwzględniającą krzywiznę badanego obiektu.

Jeżeli powierzchnia chropowatego obiektu zostanie oświetlona koherentnym (stałym w czasie i przestrzeni) światłem laserowym, w wyniku interferencji promieni odbitych, na płaszczyźnie obrazowania (kamera CCD lub klisza fotograficzna) powstanie pewien wzór jasnych i ciemnych punktów nazywany obrazem plamkowym. Gdy badany materiał jest przezroczysty dla światła laserowego, obraz plamek będzie wynikiem interferencji z powierzchni i z warstw wewnętrznych materiału. Jeżeli natomiast materiał wykazuje jakiegokolwiek zmiany w czasie, zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz, obraz plamkowy dodatkowo będzie się zmieniał w czasie. Na zarejestrowanym filmie (lub sekwencji kolejnych klatek) widoczny jest wówczas ruch plamek. W komórkach roślinnych następuje ciągły ruch organeli i cząstek wywołany z jednej strony ruchami Browna, a z drugiej cyklicznym ruchem cytoplazmy, a wraz z nią organelli komórkowych. Skutkiem tego ruchu jest zmiana w czasie i przestrzeni obrazu plamkowego. Charakterystyczne jest to, że dla materiałów biologicznych ruch plamek może być bardzo dynamiczny. Stąd zjawisko to, dla tych szczególnych materiałów, zostało określone jako **biospeckle**. Analizie poddawana jest zmiana rozkładu odcieni szarości poszczególnych pikseli w czasie, co dostarcza informacji o stanie dojrzałości, zawartości barwników, porażeniu chorobowym lub uszkodzeniu mechanicznym.

Barwa jest jednym z głównych wyznaczników jakości żywności. Mimo że barwa nie odzwierciedla wartości odżywczej, smaku lub właściwości funkcjonalnych, to jest podstawą akceptacji produktu przez konsumenta.

Czasami prosty i szybki pomiar barwy może być stosowany do oceny zawartości barwników, będących często wyznacznikiem wartości odżywczej surowca roślinnego lub produktu żywnościowego, zamiast skomplikowanej analizy chemicznej. Barwę można określić jako sumę wrażeń, wywołanych energią promienistą widzialnej części widma elektromagnetycznego (380-780 nm), przekazywanych przez siatkówkę oka ludzkiego do systemu nerwowego. Barwa wynika więc z obecności barwników, ale także z pochłaniania, rozpraszania czy interferencji fal promieniowania widzialnego.

Barwa surowca lub produktu żywnościowego może być oceniana wizualnie przez porównanie ich barwy z barwą wzorca w atlasie barw. Instrumentalny pomiar barwy może być wykonany z użyciem kolorymetrów w świetle odbitym lub w świetle przechodzącym. Kolorymetry trójbodźcowe stosowane są do pomiaru barwy ciał stałych i ciekłych, mają symulować wrażenia barwne odbierane przez oko ludzkie. Do pomiaru barwy w świetle przechodzącym, głównie cieczy i zawiesin, służą spektrofotometri i turbidymetri.

W instrumentalnych pomiarach wykorzystuje się różnego rodzaju modele matematyczne, opisujące barwę najczęściej w postaci punktu o trzech współrzędnych. Na podstawie rozkładu widma promieniowania, które zostało odbite od próby, program obsługujący urządzenie wylicza współrzędne barwy w systemie XYZ. Na podstawie tych trzech składowych istnieje możliwość wyliczania innych modeli barwy, np. najczęściej stosowanego do opisu barwy modelu CIE L*a*b*. System ten uwzględnia trzy psychofizyczne atrybuty barwy, a mianowicie ton, nasycenie i jasność barwy.

Metody **kolorymetryczne** stosowane są do ustalenia zawartości określonej substancji na podstawie jej barwy i w porównaniu z barwnym wzorcem o znanym składzie chemicznym. Metody kolorymetryczne opierają się na działaniu promieniowania elektromagnetycznego na badane substancje, a dokładnie na określeniu absorpcji tego promieniowania przez produkt, w szczególności w zakresie światła białego o długości fali 380-780 nm i dają dokładne wyniki w krótkim czasie.

Metody **refraktometryczne** wykorzystują zjawisko załamania światła. Jest to właściwość charakterystyczna dla wszystkich substancji, zarówno ciekłych, stałych jak i gazowych. Promień światła, przechodząc z ośrodka A do ośrodka B, ulega załamaniu, co wynika ze zmiany prędkości przechodzenia światła przez ośrodki o różnej gęstości. Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania nosi nazwę współczynnika refrakcji (załamania). Wartość współczynnika refrakcji zależy od długości padającej fali oraz od rodzaju i stężenia substancji. W praktyce metody refraktometryczne najczęściej stosuje się do pomiaru zawartości ekstraktu oraz do zawartości cukru w roztworach. Zawartość ekstraktu jest jedną z istotnych cech jakościowych warzyw i owoców, skorelowaną z ilością rozpuszczalnych substancji w świeżym soku roślinnym.

Inne, niedestrukcyjne metody oceny jakości surowców roślinnych i produktów żywnościowych

Z wielu metod fizycznych stosowanych ostatnio do nieinwazyjnej oceny jakości owoców i warzyw wyróżnić można **termografię**. Termografia to metoda, która w czasie rzeczywistym i w sposób bezkontaktowy pokazuje rozkład temperatur na powierzchni badanych obiektów. Termografia polega na określeniu promieniowania w zakresie podczerwieni termalnej, emitowanego przez ciała o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego. Urządzenia termograficzne wizualizują to promieniowanie w postaci termalnej mapy badanego obiektu. Badania nad wykorzystaniem termografii do badania materiału roślinnego dotyczą określenia zdolności kiełkowania nasion na podstawie ich temperatury na powierzchni podczas kiełkowania jak również do określenia warunków przechowywania i przetwarzania owoców i warzyw. Wykazano również przydatność tej metody do wykrywania spowodowa-

nych obiciem uszkodzeń na powierzchni jabłek, określeniem ich dojrzałości i mączystości, intensywności transpiracji owoców po zbiorze, a także w systemach kontroli czasu suszenia owoców, pozwalających określić moment, w którym kończy się proces suszenia powierzchniowego i zaczyna się wysychanie skórki owocu.

Szczególnie przydatne do określania defektów wewnętrznych miąższu owoców i warzyw okazały się metoda **rentgenograficzna**, oparta na zjawisku związanym z wybijaniem elektronu z powłoki wewnętrznej atomu, który ulega jonizacji pod wpływem promieniowania w zakresie rentgenowskim o długości fali 0,03-30 nm, oraz metoda **magnetycznego rezonansu jądrowego**, polegająca na wzbudzaniu spinów jądrowych znajdujących się w zewnętrznym polu magnetycznym poprzez szybkie zmiany tego pola, a następnie rejestrację promieniowania elektromagnetycznego powstającego na skutek zjawisk relaksacji. Jednak trudności związane z wykonaniem takich analiz oraz koszt urządzeń spowodowały, że te metody nie są stosowane na skalę przemysłową.

Analiza obrazu

Mikroskopia, kamery i aparaty cyfrowe dostarczają wartościowych informacji o cechach surowców roślinnych i produktów żywnościowych. W celu uzyskania informacji ilościowej przydatnej do klasyfikacji badanego materiału należy stosować metody analizy obrazu. Analiza obrazu jest procesem, w którym danymi wejściowymi jest obraz lub seria obrazów, a danymi wyjściowymi nie jest obraz a liczba lub wektor liczb, tekst lub zmienna logiczna, lub wreszcie ich kombinacja. Celem analizy obrazów jest między innymi: wydobycie cech opisujących obraz, rozpoznanie obrazu, interpretacja jakościowa i ilościowa. Analiza obrazu jest zwykle poprzedzona uzyskaniem zdjęcia w określony przez użytkownika sposób i w wybranym formacie oraz obróbką obrazu. Obróbka jest niezbędna w celu zmniejszenia błędów analizy końcowej. Cyfrowa reprezentacja obrazu umożliwia łatwą obróbkę komputerową, która jest operacjami na pikselach. W zależności od celu operacje te wykonuje się, stosując sekwencje ściśle zdefiniowanych przekształceń (operatorów) obrazu. Przekształcenia obrazu można podzielić na:

- przekształcenia geometryczne: przesunięcia, obroty, odbicia oraz zniekształcenia;
- przekształcenia punktowe: poszczególne punkty obrazu są modyfikowane niezależnie od tego, jakich mają sąsiadów, za pomocą między innymi operacji arytmetycznych i logicznych;
- filtry: przekształcenia, których wynik zależy od modyfikowanego punktu i jego otoczenia, a modyfikacja jest wykonywana zawsze. Przekształcenie to ma zdefiniowany element strukturalny i działanie;

- przekształcenia morfologiczne: przekształcenia, których wynik zależy od modyfikowanego punktu i jego otoczenia, a modyfikacja wykonywana jest po spełnieniu konkretnego warunku. Przekształcenie to ma zdefiniowany element strukturalny i warunek.

W wyniku analizy obrazu uzyskuje się dane ilościowe, które mogą służyć bądź do szukania korelacji z innymi cechami, na przykład jakościowymi, badanego materiału lub obiektu, albo do klasyfikowania obiektów poprzez dopasowanie do wzorca. W badaniach podstawowych właściwości materiałów rolniczych, jak i w większości aplikacji w rolnictwie precyzyjnym, najważniejszą funkcją analizy obrazów jest klasyfikacja obiektów. W tym celu konieczne jest stosowanie metod statystycznych, najczęściej wielowymiarowych, ze względu na dużą liczbę zmiennych uzyskiwanych z obrazów.

Kombinacja analizy obrazu i analiza statystyczna wraz z algorytmami klasyfikacji znacznie skraca czas potrzebny na analizę i podjęcie decyzji. Można stwierdzić, że największą zaletą analizy obrazu jest możliwość automatycznej i obiektywnej (bez ingerencji człowieka) analizy dużej liczby danych w bardzo krótkim czasie.

PIŚMIENNICTWO

- Baranowski P., 2008. Temperatura radiacyjna wybranych owoców i warzyw jako parametr oceny ich jakości. *Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie*, 159, 1-108.
- Horabik J., 2013. Stan badań w zakresie właściwości fizycznych surowców roślinnych w aspekcie ich przetwarzania. W: *Współczesna inżynieria rolnicza – osiągnięcia i nowe wyzwania* (red. R. Hołownicki, M. Kuboń). Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Inżynierii Rolniczej, Kraków, t. III, 127-150.
- Pałacha Z., Sitkiewicz I. (red.), 2010. *Właściwości fizyczne żywności*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Sahin S., Gulum Sumnu S. (eds), 2006. *Physical properties of foods*. Springer, USA, New York.
- Zdunek A., 2008. Instrumentalna metoda oceny wybranych cech tekstury jabłek na podstawie emisji akustycznej. *Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie*, 155, 1-98.

4.8. Modelowanie procesu suszenia biomasy

Bogusława Łapczyńska-Kordon

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

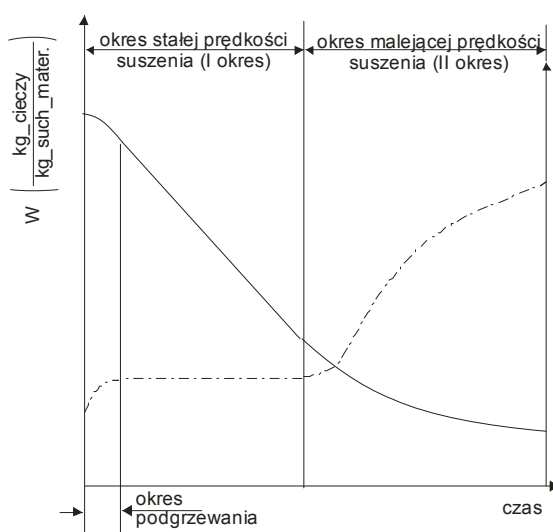
Modele pełnią ważną funkcję w poznawaniu świata i doskonaleniu warunków życia. Szczególne znaczenie w naukach przyrodniczych i technicznych mają modele sformalizowane, między innymi matematyczne empiryczne, teoretyczne oraz modele operacyjne (Pabis 2009). Modele empiryczne są tylko formułami empirycznymi dobieranymi tak, aby możliwie dokładnie opisywały wyniki pomiarów przedstawiających działanie badanego systemu empirycznego, procesu. Modele teoretyczne uważane są za modele strukturalnie podobne do modelowanych systemów, procesów, formułowane na bazie teorii i praw nauki.

Powstające problemy badawcze, związane z prowadzonymi procesami suszenia biomasy, mogą być rozwiązywane z punktu widzenia naukowego, którego celem jest poznanie i wyjaśnienie zjawisk występujących podczas suszenia lub praktycznego, którego celem jest wskazanie optymalnych sposobów suszenia i dobranie optymalnych parametrów suszenia, ze względu na określone kryteria. Najlepiej, gdy oba te problemy są rozwiązywane z wykorzystaniem uznanych teorii wymiany ciepła i masy, szczególowej teorii suszenia konwekcyjnego, praw termodynamiki. Takie podejście jest zgodne z zasadami metodologii.

Suszenie biomasy jest złożonym procesem wymiany ciepła i masy w materiale o strukturze kapilarno-porowatej lub kapilarno-koloidalno-porowatej. W czasie procesu występują jednocześnie wszystkie podstawowe sposoby przekazywania ciepła: przewodzenie, konwekcja i promieniowanie, a także masy: konwekcyjna wymiana, dyfuzja, hydrauliczny przepływ. W zależności od sposobu przekazywania ciepła – konwekcyjnie, bądź za pomocą mikrofal lub podczerwieni, albo przewodzenia – dominuje określony, wynikający z metody, sposób dostarczania ciepła. Przenoszenie ciepła i masy odbywa się pod wpływem powstających potencjałów temperatury i zawartości wody. Niezależnie od metody suszenia, woda znajdująca się wewnątrz wilgotnego materiału jest transportowana do jego powierzchni, odparowuje i jest przenoszona do otaczającego ośrodka w wyniku dyfuzji. W procesie konwekcyjnego suszenia otaczające środowisko jest równocześnie nośnikiem ciepła. Intensywność tych procesów zależy od mechanizmu ruchu wody wewnątrz materiału, odparowania cieczy i przenoszenia pary wodnej od powierzchni materiału do otaczającego ośrodka poprzez warstwę graniczną przylegającą do powierzchni międzyfazowej. W przypadku złożonego procesu suszenia, kiedy na przykład strumień ciepła jest generowany wewnątrz materiału,

przenoszenie wody do powierzchni materiału odbywa się zarówno w fazie ciekłej, jak i gazowej w postaci pary wodnej (Łykow 1968, Pabis 1982).

Podczas procesu przenoszenia ciepła i masy w trakcie suszenia zmienia się zawartość wody w materiale i jego temperatura. Zmiany zawartości wody i temperatury w zależności od czasu suszenia określone są za pomocą kinetyki procesu suszenia. Na podstawie przebiegu zmian zawartości wody i temperatury w czasie suszenia, wyróżnia się dwa okresy suszenia: pierwszy o stałej szybkości suszenia i drugi o malejącej szybkości suszenia (Rys. 4.8.1).



Rys. 4.8.1. Krzywe kinetyki suszenia (www.pomoc-dydaktyczna.tce.put.poznan.pl)

W pierwszym okresie suszenia dominuje przenoszenie ciepła i masy pomiędzy powierzchnią suszonego materiału a otoczeniem poprzez warstwę graniczną, natomiast w drugim okresie zachodzi dyfuzyjny ruch masy i ciepła wewnątrz materiału. Oba okresy suszenia występują wtedy, gdy początkowa zawartość wody w suszonych materiałach biologicznych jest wyższa od higroskopijnej. Jeśli jest niższa, wówczas zakłada się, że cały proces suszenia zachodzi w drugim okresie. Takie założenia są stosowane do opisu procesu konwekcyjnego suszenia pojedynczych ziarniaków i nasion lub suszenia cienkiej warstwy (Pabis 1982).

Do opisu kinetyki konwekcyjnego suszenia pojedynczych materiałów roślinnych najczęściej stosowano modele informacyjne w postaci formuł empirycznych aproksymujących doświadczalne wyniki pomiarów zmian zawartości wody oraz temperatury w czasie suszenia z satysfakcjonującą dokładnością. Modele te, jednak, nie pozwalały na wyjaśnienie i poznanie procesu, ponieważ występujące w równa-

niach współczynniki nie miały interpretacji fizycznej. Modele te obecnie służą do weryfikowania modeli teoretycznych lub semi-empirycznych (Pabis 1982).

Kinetyka suszenia materiałów roślinnych była przedstawiana również za pomocą udoskonalonych modeli empirycznych, tzw. semi-empirycznych, takich np. jak (Jayas i in. 1992):

model Lewisa (Newton:

$$U = \exp(-kt) \quad (1)$$

model Page:

$$U = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

model Hendersona i Pabisa

$$U = a \exp(-kt) \quad (3)$$

zmodyfikowany model Hendersona i Pabisa

$$U = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) + c \exp(-k_3 t) \quad (4)$$

gdzie: a, b, c, k, k₁, k₂, k₃, n – parametry empiryczne

$$U = \frac{u - u_r}{u_0 - u_r} \quad (5)$$

gdzie:

U – zredukowana zawartość wody, t – czas suszenia, s,
u, u_r – chwilowa i równowagowa zawartość wody, kg·kg⁻¹.

Takimi modelami opisywany był nieliniowy przebieg zmian zawartości wody podczas całego procesu suszenia ziaren zbóż, nasion, a także owoców i warzyw (Jayas i in. 1992). Na podstawie analizy wyników pomiarów zaobserwowano dwie fazy malejącej szybkości suszenia: pierwszą zależną od temperatury powietrza suszącego i drugą niezależną od temperatury. Jednocześnie przyjęto założenie o decydującym w okresie malejącej szybkości suszenia dyfuzyjnym mechanizmie wymiany masy. Struktura matematyczna tych modeli jest podobna do rozwiązania teoretycznego równania dyfuzji masy – zawiera jeden lub dwa składniki o postaci eksponentialnej lub zmodyfikowanej.

Matematyczne teoretyczne modele suszenia pojedynczych obiektów materiałów roślinnych lub ich pojedynczej warstwy sformułowano na podstawie opracowanej przez Łykowa (1965), ogólnej teorii konwekcyjnego suszenia ciał stałych kapilarno-porowatych lub kapilarno-koloidalno porowatych, o regularnych kształ-

tach (kuli, prostopadłościanu, walca, płyty itp.), opisującej wymianę ciepła i masy między pojedynczymi obiektami i ośrodkiem gazowym. Podstawowymi równaniami tej teorii były: prawo Ficka, opisujące dyfuzję masy (wody), oraz prawo Fouriera – przewodzenia ciepła. Strukturę tej teorii tworzą równania (Pabis 1982): dyfuzji ciepła w wilgotnym ciele stałym, określające związek między szybkością zmian temperatury $\partial T/\partial t$ i laplasjanem temperatury $\nabla^2 T$ w danym miejscu ciała stałego i czasie trwania procesu oraz współczynnikiem dyfuzji ciepła w tym ciele oraz ciepłem parowania wody, ciepłem właściwym tego ciała i szybkością zmian w nim zawartości wody $\partial u/\partial t$, wówczas, gdy stosunek masy wody w postaci pary wodnej do całkowitej masy wody:

$$\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{r}{c} \varepsilon \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6)$$

gdzie: a – współczynnik dyfuzji ciepła, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
 c – ciepło właściwe wilgotnego ciała stałego, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
 r – ciepło parowania wody; $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,
 T – temperatura, K;
 t – czas, s,
 x, y, z – współrzędne kartezjańskie, m;
 ε – współczynnik przemiany fazowej,
 ∇^2 – laplasjan,

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

– dyfuzji masy (wody) w wilgotnym ciele stałym, przedstawiające zależność pomiędzy szybkością zmian masy (wody) w danym miejscu i czasie suszenia ciała $\partial u/\partial t$ a współczynnikiem dyfuzji wody, współczynnikiem termogradientnym i laplasjanami $\nabla^2 u$ zawartości wody i temperatury $\nabla^2 T$:

$$\frac{\partial u(x, y, z)}{\partial t} = D_{ef} (\nabla^2 u + h \nabla^2 T) \quad (8)$$

gdzie: D_{ef} – współczynnik dyfuzji masy, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;
 h – współczynnik termogradientny, K^{-1} ,

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (9)$$

Rozwiązanie równań z odpowiednio określonymi warunkami początkowymi (Romankow i in. 1980):

$$\text{dla } t=0: u=u(0,x)=u_0=\text{const.}; T=T(0,x)=T_0=\text{const.} \quad (10)$$

i brzegowymi umożliwia uzyskanie rozkładu zmian temperatury i wody wewnątrz materiału podczas suszenia. Warunki brzegowe mogą być:

- pierwszego rodzaju – określają wartość funkcji rozkładu zawartości wody lub/i temperatury na znanej powierzchni:

$$\text{dla } t>0 \text{ i } x=\pm s: u(t,x)=u_r=\text{const.}; T(t,x)=T_k=\text{const.} \quad (11)$$

- drugiego rodzaju – granicy strumienia przyjmuje się wartości pochodnej szukanej funkcji względem współrzędnych przestrzennych, równej wielkości strumienia pary wodnej lub/i ciepła do powierzchni granicznej:

$$\text{dla } t>0 \text{ i } x=\pm s: \dot{m}_m = -D_{ef} \frac{\partial u}{\partial n} \quad q = -a \frac{\partial T}{\partial n} \quad (12)$$

- trzeciego rodzaju – oznacza równość strumienia wody i ciepła dopływających do powierzchni materiału i przyjmowanych przez otoczenie:

$$D_{ef} \frac{\partial u}{\partial n} = k_m (u - u_r) \quad a \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_k) \quad (13)$$

czwartego rodzaju – występuje, gdy stykają się dwa obszary o różnej zawartości wody i różnej temperaturze, wtedy warunek ten sprowadza się do równości wartości rozkładów zawartości wody oraz temperatury, a także równości strumieni dyfuzyjnych na granicy obszarów:

$$\text{dla } t>0 \text{ i } x=\pm s \quad u_I = u_{II}; \quad T_I = T_{II}$$

$$D_{efI} \frac{\partial u_I}{\partial n} = D_{efII} \frac{\partial u_{II}}{\partial n} \quad a_I \frac{\partial T_I}{\partial n} = a_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial n} \quad (14)$$

gdzie: k_m – współczynnik przyjmowania masy; \dot{m}_m – strumień odprowadzanej pary wodnej z materiału, kg s^{-1} ; q – gęstość strumienia ciepła, W m^{-2} ; u_r – równowagowa zawartość wody, $\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg s.s.}^{-1}$; T_k – końcowa temperatura materiału, K.

Teoria ta stała się podstawą do opracowania ogólnej teorii konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych oraz teorii szczegółowych. Następstwem tej teorii były sformułowania przez Pabisa (1982): teoria konwekcyjnego suszenia pojedynczych ziarniaków i nasion, jak i cienkiej warstwy ułożonej z tych nasion oraz teoria konwekcyjnego suszenia warzyw (Pabis i in. 1999). Cienka warstwa zdefiniowana została jako warstwa ziarniaków i nasion o grubości lub większej od pojedynczego obiektu pod warunkiem, że temperatura i wilgotność względna czynnika suszącego przyjmują stałe wartości w każdym punkcie warstwy i w każdej chwili procesu. W procesach konwekcyjnego suszenia materiałów roślinnych równanie (7) przyjmuje prostszą postać ze względu na to, że wartości gradientów temperatur są bardzo małe. Taką postać tego równania wyraża drugie prawo Ficka, ze stałym efektywnym współczynnikiem dyfuzji masy.

W modelowaniu procesu suszenia materiałów roślinnych równanie (13) jest stosowane do opisu wewnętrznego transportu wody w drugim okresie suszenia (Pabis 1982):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 u \quad (15)$$

W celu otrzymania równania określającego zmiany zawartości wody w materiale w drugim okresie suszenia, należy rozwiązać analitycznie równanie dyfuzji masy, uwzględniając odpowiednie warunki początkowe i brzegowe. Otrzymane z rozwiązania równania są zależnościami opisującymi proces w sposób przybliżony. Dla przykładu zostanie przedstawione poniżej rozwiązanie dla ciała o kształcie kuli, które wykorzystał Pabis (1982) do opisu konwekcyjnego suszenia ziarna pszenicy. Przyjmuje się, że, ze względu na niską wilgotność ziarna zbóż (najczęściej poniżej 20%), ich suszenie przebiega w drugim okresie, kiedy dominuje wewnętrzny transport ciepła i masy.

Do rozwiązania równania (13) konieczne jest przyjęcie, uznanych za prawdziwe, następujących założeń: wymiary ciała nie ulegają zmianie w czasie procesu, zewnętrzne warunki suszenia są stałe podczas trwania procesu, ruch wody wewnątrz suszonego materiału jest wyłącznie ruchem dyfuzyjnym, współczynnik dyfuzji masy w suszonym cieple ma wartość stałą, opór zewnętrznej wymiany masy wody (w warstwie granicznej) jest pomijalny w porównaniu do oporu wewnątrz ciała, na początku procesu w obszarze całej objętości ciała rozkład zawartości wody jest równomierny, na powierzchni ciała, natychmiast po rozpoczęciu suszenia, zawartość wody staje się równa równowagowej zawartości wody w danych warunkach.

Dla kuli o promieniu wewnętrznym $0 \leq r \leq R$ równanie dyfuzji masy (13) przyjmuje postać:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (16)$$

Najprostsze rozwiązanie analityczne tego równania z warunkami brzegowymi pierwszego rodzaju pozwala uzyskać następującą zależność:

$$\frac{u(t,r) - u_r}{u_0 - u_r} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2R \sin \frac{2\pi r}{R}}{n\pi r} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{ef} t}{R^2}\right) \quad (17)$$

W przypadku suszenia materiałów roślinnych wysokowodnionych (np. warzyw, owoców) w modelowaniu kinetyki zmian zawartości wody należy uwzględnić pierwszy okres suszenia. Pabis (1999) sformułował model konwekcyjnego suszenia krajanki warzywnej w postaci dwóch równań. Uwzględnił w tym modelu zewnętrzną konwekcyjną wymianę masy (wody) skurcz suszarnicy oraz wewnętrzny dyfuzyjny transport masy w postaci rozwiązania równania wynikającego z drugiego prawa Ficka z odpowiednimi warunkami początkowo-brzegowymi. Strukturę modelu suszenia krajanki warzywnej tworzą równania:

dla pierwszego okresu suszenia:

$$u(t) = u_0 \left[\frac{1}{1-b} \left(1 - \frac{1-b}{Nu_0} kt \right)^N - \frac{b}{1-b} \right] \quad (18)$$

dla drugiego okresu suszenia (rozwiązanie równania (7) z odpowiednimi warunkami początkowo-brzegowymi):

$$u(t) = u_r - (u_{kr} - u_r) \exp(-Kt) \quad (19)$$

gdzie: b – empiryczny współczynnik:

$$b = \frac{\rho_0}{\rho_s(1+u_0)} \quad b = \frac{0,85}{1+u_0} \quad (20)$$

lub, gdy nieznane ρ_s, ρ_0 ,

k – szybkość suszenia w pierwszym okresie, s^{-1} ,

K – współczynnik szybkości suszenia w drugim okresie, s^{-1} :

$$K = \frac{k}{0,3u_0 - u_r} \left(1 - \frac{1-b}{Nu_0} kt \right)^{N-1} \quad (21)$$

N – parametr empiryczny (zależny od rodzaju i kształtu suszonego materiału); $1 \leq N \leq 3$; u_r – krytyczna zawartość wody (zawartość wody pomiędzy pierwszym i drugim okresem suszenia), $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ_0 , ρ_s – gęstość początkowa materiału– gęstość suchej substancji materiału, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Materiały roślinne (zboża, nasiona, rozdrobnione warzywa, owoce) najczęściej suszone są w warstwie nieruchomej lub przepływającej: we współprądzie, w przeciwprądzie, albo też w prądzie skrzyżowanym z czynnikiem suszącym. Do analizy takich procesów wykorzystuje się modele matematyczne, odwzorowujące przebieg rzeczywistego procesu. Modele matematyczne tworzą równania bilansowe, które odwzorowują rzeczywistość z różną szczegółowością. Modele te formułowane są z reguły w postaci równań różniczkowych.

W celu sformułowania modeli suszenia materiałów roślinnych przyjęto następujące założenia:

- objętość ziarna nie zmienia się podczas suszenia,
- wartości gradientów temperatur wewnątrz ziarna są nieistotne,
- kontaktowa wymiana ciepła między poszczególnymi ziarnami nie występuje,
- czynnik suszący przemieszcza się pomiędzy ziarnami, a ziarno w warstwie może przemieszczać się równomiernie lub porcjami,
- wartości pochodnych $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ i $\frac{\partial X}{\partial \tau}$ są nieistotne w porównaniu z wartościami $\frac{\partial T}{\partial z}$ i $\frac{\partial X}{\partial z}$,
- proces suszenia przebiega w warunkach adiabatycznych, a pojemność cieplna komory jest nieistotna,
- ciepła właściwe czynnika suszącego i suszonego ziarna są stałe podczas suszenia,
- znana jest kinety suszenia cienkiej warstwy suszonego materiału.

Prezentowane w literaturze model suszenia w nieruchomej warstwie został sformułowany na podstawie bilansów ciepła i masy w czasie przemieszczania się czynnika suszącego przez elementarną warstwę o grubości dz , wyodrębnioną z warstwy suszonego ziarna o wysokości H . Strukturę modelu stanowi układ równań (Brooker i in. 1974):

- bilansu entalpii czynnika suszącego,
- bilansu entalpii suszonego ziarna,
- bilansu wody w czynniku suszącym,

- równanie szybkości suszenia w cienkiej warstwie danego ziarna,
- warunki graniczne.

Model ma następującą postać:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{(a\alpha)}{Gc_p + GXc_v} (t - t_m) \quad (22)$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{(a\alpha)}{\rho_z c_z + \rho_z u_{sr} c_z} (t - t_m) + \frac{r + c_v (t - t_m)}{\rho_z c_z +} \quad (23)$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = -\frac{\rho_z}{G} \frac{\partial u_{sr}}{\partial \tau} \quad (24)$$

$\frac{\partial u_{sr}}{\partial \tau}$ = równanie suszenia w cienkiej warstwie np. (15) (20);

warunki graniczne:

$$\begin{aligned} t(0, \tau) &= t_1, \\ t_m(z, 0) &= t_m, \\ X(0, \tau) &= X_1, \\ u_{sr}(z, 0) &= u_{sr1} \end{aligned}$$

gdzie: $a\alpha$ – objętościowy współczynnik przejmowania ciepła, $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$; t , t_m – temperatury czynnika suszącego i suszonego materiału, $^{\circ}C$; c_p , c_v , c_z – ciepła właściwe czynnika suszącego, pary wodnej i suszonego materiału, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, G – natężenie przepływu czynnika suszącego, $kg \cdot s^{-1}$; r – ciepło parowania wody, $J \cdot kg H_2O^{-1}$; u_{sr} – średnia zawartość wody w materiale suszonym, $kg H_2O \cdot kg s.s.^{-1}$; X – stopień zawilżenia czynnika suszącego, $kg H_2O \cdot kg^{-1}$; z – współrzędna kartezjańska, m ; ρ – gęstość materiału suszonego, $kg \cdot m^{-3}$; τ – czas, s .

Modele procesu suszenia w suszarkach przepływowych (czynnik suszący i suszony materiał przemieszczają się wzdłuż suszarki) formułowane na podstawie bilansu wielkości ekstensywnych w obszarze wydzielonym z ośrodka ciągłego, w postaci modeli o parametrach rozłożonych (Malczewski i Piekarski 1992). Strukturę modelu tworzą równania transportu masy, pędu i energii wraz z warunkami początkowo-brzegowymi. Do rozwiązania tych modeli stosuje się metody numeryczne (np. metoda różnic skończonych, elementów skończonych) ze względu nieliniowość równań opisujących model (Parry 1985, Sabarez 2012). Do symulacji procesu suszenia z wykorzystaniem takich modeli stosuje się metodę CFD (*Computational fluid Dynamics*) (Kuriakose i Anandharamakrishnan 2010).

Bardzo przydatne do modelowania procesów suszenia okazały się metody oparte na sztucznej inteligencji (sieci neuronowych, algorytmów genetycznych), zwłaszcza do analizy wpływu właściwości materiałów, parametrów procesu suszenia, metod suszenia, gatunków suszonych materiałów roślinnych na kinetykę suszenia, jakość suszu, a także na zużycie energii oraz efektywność suszenia (Gorjan 2011, Aghbashlo 2012).

Modelowaniem procesów suszenia materiałów roślinnych zajmowało się wielu badaczy. Formułowano modele empiryczne i teoretyczne suszenia pojedynczych obiektów, ale też modele procesów stosując różne metody do ich symulacji. Modele te pozwalają na poznawanie i doskonalenie procesów suszenia różnej biomasy.

PIŚMIENNICTWO

- Gorjian S., Tavakkoli Hashjin T., Khoshtaghaza M.H., 2011. Designing and optimizing a back propagation neural network to model a thin-layer drying process. *International Agrophysic*, 25(1), 13-19.
- Jayas D.S., Cenkowski S., Pabis S., Muir W.E., 1992. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9, 551-558.
- Kuriakose Rinil, Anandharamakrishnan C., 2010. Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in spray drying of food products. *Trends in Food Science & Technology* 21, 383-398.
- Łykw A.W., 1968. Teoria suszki. Energia. Moskwa.
- Malczewski J., Piekarski M., 1992. Modele procesów transportu masy, pędu i energii. PWN, Warszawa.
- Mortaza Aghbashlo, Hossien Mobli, Shahin Rafiee, Ashkan Madadlou, 2012. The use of artificial neural network to predict exergetic performance of spray drying process: A preliminary study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 88, 32-43.
- Pabis S., 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL, Warszawa.
- Pabis S., 1999. Konwekcyjne suszenie warzyw. Teoria i praktyka. PTIR, Kraków.
- Parry J.L., 1985. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(1), 1 -29.
- Romankov P.G., Raszkovska N.B., Frolov V.F., 1980. Procesy wymiany masy w technologii chemicznej. Układy z fazą stałą. WNT, Warszawa.
- Sabarez H.T., 2012. Computational model ling of the transport phenomena occuring Turing convective drying of prunes. *Journal of Food Engineering*, 111, 279-288.
- Strumiłło Cz., 1983. Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa.
- www.pomoc-dydaktyczna.tce.put.poznan.pl, 21.09.2014

4.9. Modelowanie geometrii 3D obiektów roślinnych

Leszek Mieszkalski

SGGW w Warszawie

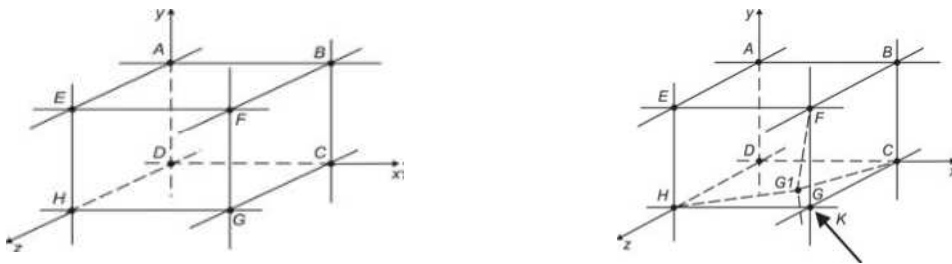
Rozwój programów komputerowych do wspomagania obliczeń numerycznych i wizualizacji ich wyników, np. Matlab, Mathcad, Maple, Mathematica, umożliwia matematyczne modelowanie powierzchni obiektów biologicznych, w tym roślinnych (Mieszkalski 2003b; Stępień 1999, 2000; Weres i in. 2014a). Grafika komputerowa znajduje coraz szersze zastosowanie w inżynierii rolniczej i inżynierii żywności. Za pomocą metod zaliczanych do grafiki komputerowej można wizualizować modele geometryczne, tworzyć wykresy 2D i 3D, stosować komputerowe wspomaganie projektowania oraz realizować symulacje i animacje procesów, w których zmienia się w czasie wiele zmiennych. Modele powierzchni zewnętrznych brył reprezentujących nasiona, owoce, warzywa itp. mają dużą wartość poznawczą są szczególnie przydatne do numerycznego badania wielu procesów roboczych, np. separacji, siewu, transportu, rozdrabniania, pakowania, przechowywania, itp. (Sol-tani i in. 2010; Wei-long i in. 2011; Cășăndroiu i Mieila 2010, Kęska i Feder 1997).

Cechami geometrycznymi surowców rolniczych interesują się m. in. konstruktorzy maszyn rolniczych i stosowanych w przemyśle spożywczym. Kształty obiektów roślinnych (nasiona, owoce, warzywa) są różnorodne i nie można ich reprezentować za pomocą regularnych form geometrycznych, jak: kula, elipsoida, cylinder, sześcian itp. (Boac i in. 2010). Przedstawienie brył w formie dyskretnej ma duże znaczenie przy projektowaniu procesów roboczych maszyn. Projektując proces roboczy, projektant tworzy matematyczne modele powierzchni, które odwzorowują kształty przetwarzanych obiektów. Różnorodność biologiczna, zmienne parametry klimatyczno-glebowe w czasie dojrzewania roślin, zabiegi agrofizyczne należą do czynników wpływających na zmienność cech geometrycznych obiektów roślinnych użytkowanych rolniczo (Hebda i Micek 2005). Podczas modelowania kształtu obiektów biologicznych często stosuje się skalowanie, przesuwanie i obracanie względem ustalonego układu współrzędnych X , Y , Z . W procesie modelowania powierzchnia rzeczywistego obiektu o nieskończonej liczbie punktów jest zamieniana na numeryczną powierzchnię dyskretną, składającą się ze skończonej liczby punktów. Połączone punkty powierzchni dyskretnej tworzą wielokątną siatkę będącą zbiorem połączonych trójkątów ukośnokątnych. Modele powierzchni reprezentują współrzędne punktów, odcinków i krzywych w układach 2D i 3D, za pomocą których definiuje się kształty przetwarzanych obiektów biologicznych z przypisanymi im atrybutami.

W literaturze spotyka się wiele prac opisujących metody modelowania kształtów brył surowców roślinnych (Forrest 1979, Mieszkalski 2002*b*, 2002*c*, 2003*a*, 2003*b*). Zastosowanie krzywych Béziera do modelowania nieregularnych kształtów brył aproksymujących surowce rolnicze przedstawiają prace Mieszkalskiego (2002*a*, 2002*b*).

Modele siatkowe powierzchni

Za pomocą zbioru płaszczyzn i powierzchni 3*D* opisujących zamknięte objętości są tworzone dyskretne modele powierzchni brył surowców pochodzenia roślinnego. W zapisie numerycznym bryły są reprezentowane jako zbiory odcinków, z których składają się dyskretne krzywe i powierzchnie. Modelowaną bryłę można wypełnić wielościanami (Rys. 4.9.1). Dyskretny model bryły stanowi podstawę przy opisie wywołanych naciskami odkształceń miejscowych oraz odkształceń powodujących zniszczenie obiektu biologicznego (Dobrzański 2007, Dobrzański i in. 2012).



Rys. 4.9.1. Model siatkowy sześciangu o współrzędnych wierzchołków $A(0, 1, 0)$, $B(1, 1, 0)$, $C(1, 0, 0)$, $D(0, 0, 0)$, $E(0, 1, 1)$, $F(1, 1, 1)$, $G(1, 0, 1)$, $H(0, 0, 1)$ i model siatkowy sześciangu odkształconego w wyniku działania zewnętrznego obciążenia K

Model siatkowy umożliwia względne wypełnienie objętości brył foremnych i nieforemnych pięścianami i czworościanami (Rys. 4.9.2).



Rys. 4.9.2. Pięścian $ABCDGF$ wydzielony z sześciangu $ABCDEFGH$, z podziałem na czworościany $ABDF$, $BCDF$, $CDGF$, oraz pięścian $AFEHGD$ wydzielony z sześciangu $ABCDEFGH$ z podziałem na czworościany $ADHF$, $AEHF$, $DGHF$

Graficzna reprezentacja dyskretnych powierzchni brył

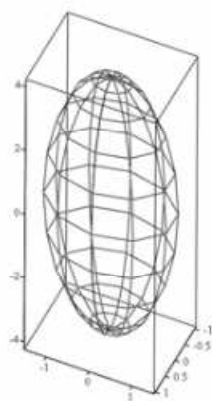
Charakterystycznymi cechami surowców roślinnych są nieregularny kształt uwarunkowany gatunkiem oraz duża zmienność wymiarów. Z tego powodu nie wystarcza charakterystyka wymiarowa pojedynczego obiektu surowca opisana za pomocą trzech podstawowych wymiarów (długość, szerokość, grubość). Nie jest również miarodajne określenie kształtu bryły w sposób umowny, np. kulisty, eliptyczny, owalny, spłaszczony, podłużny itp. Dynamiczny rozwój metod grafiki komputerowej daje projektantom wygodne narzędzia opisu kształtu brył nieregularnych (Foley i in. 2001). Opisane w literaturze modele pozwalają z wysokim stopniem dokładności tworzyć wirtualne rośliny. (Hagen 1986, Deussen i in. 1998). W grafice komputerowej jest znanych wiele metod służących do opisu kształtów obiektów biologicznych, należą do nich: *L*-systemy, metody fraktalne, superformuły, krzywe i powierzchnie, operacje boolowskie, reprezentacje brzegowe z podziałem przestrzennym itp. (Foley i in. 2001, Gielis 2003, Kiciak 2000, Mieszkalski 2003*a*, 2003*b*, 2007). Gielis i Gerats (2004) uważają, że proponowane modele opisujące kształty roślin uwzględniają głównie ich morfologię, natomiast w niewielkim stopniu aspekty molekularne, biofizyczne i genetyczne.

Opis bryły ziarna zbóż zawiera praca Mieszkalskiego (2001), w której modelowanie polega na matematycznym opisie kształtu poprzecznych przekrojów ziarna. Mieszkalski (2011*a*) do opisu kształtu ziarna pszenicy zastosował równania parametryczne opisujące powierzchnie i krzywe przestrzenne. Mabile i Abecassis (2003) kształt ziarna pszenicy również opisywali równaniami parametrycznymi. Wielu autorów (Boniecki i Olszewski 2008, Frączek i Ślipek 2006, Frączek i Wróbel 2009, Mieszkalski 2011*a*, Weres 2010, Weres i in. 2014*b*, Wróbel 2011) zajmuje się modelowaniem ziarna kukurydzy i pszenicy. Hebda i Micek (2005), za Grochowiczem (1994), podają, że kształt ziarna pszenicy, pszenżyta i żyta można w przybliżeniu opisać elipsoidą obrotową. Współcześnie stosowane metody modelowania pozwalają na dość dokładne odwzorowanie kształtu ziarna zbóż. Mieszkalski (2003*a*, 2003*b*) zaproponował równania parametryczne umożliwiające, za pomocą liczb sterujących generowanie dużego zbioru kształtów powierzchni brył reprezentujących wybrane nasiona, owoce i warzywa w wymiarowym przedziale ich cech geometrycznych. Matematycznymi modelami są opisywane zależności masy owocu od ich wielu charakterystycznych wymiarów. Cechy geometryczne owoców, jak: wysokość owocu, największa i najmniejsza średnica owocu, są brane pod uwagę podczas projektowania maszyn i urządzeń do sortowania. Obecnie poszukiwane są metody matematycznego modelowania kształtu powierzchni nasion, owoców i warzyw (Mańkowski 2004; Mieszkalski i Sołoducho 2004; Mieszkalski i in. 2008). Stępień (1999, 2000) proponuje algorytmy modelowania kształtu roślin z uwzględnieniem ich wzrostu w funkcji cza-

su. Frączek i Ślipek (2006) podkreślają, że w ostatnich latach metody modelowania wirtualnego obiektów ziarnistych rozwijają się intensywnie. Frączek i Wróbel (2003) tworzą model trójwymiarowej bryły ziarna, zestawiając kolejne obrazy uzyskane z przekrojów poprzecznie ciętych ziaren. Frączek i Wróbel (2006) kwalifikowali nasiona do jednej z pięciu grup podstawowych brył geometrycznych. Boniecki, Olszewski i Nowakowski (2008) identyfikowali kształty obiektów utworzonych za pomocą superformuły Gielisa (Gielis 2003). Superformuła Gielisa (Gielis i in. 2003) jest uniwersalna i umożliwia reprezentację dowolnego kształtu powierzchni różnych obiektów.

Geometryczne modele ziarna zbóż

Bryłę ziarna zboża można przybliżyć do elipsoidy trójosiowej – rysunek 4.9.3 (Dobrzański i in. 2012).



Rys. 4.9.3. Elipsoida trójosiowa reprezentująca bryłę ziarna żyta

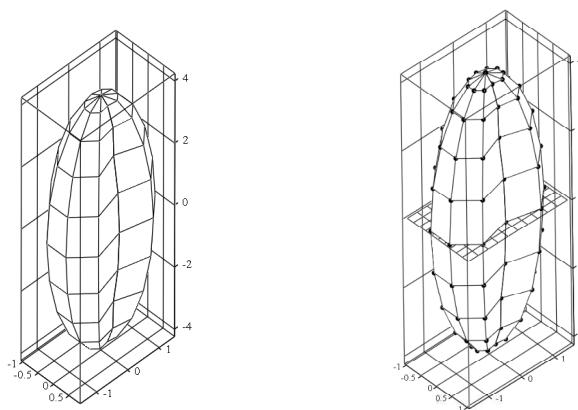
Macierzowe równania współrzędnych elipsoidy trójosiowej mają następującą postać:

$$X_{i,j} = a \cdot \sin(\varphi_i) \cdot \cos(\theta_j) \quad (1)$$

$$Y_{i,j} = b \cdot \sin(\varphi_i) \cdot \sin(\theta_j) \quad (2)$$

$$Z_{i,j} = c \cdot \cos(\varphi_i) \quad (3)$$

W bryle rzeczywistego ziarna żyta występuje bruzdka, którą można zamodelować, wprowadzając w macierzach zmiany wartości tych współrzędnych $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$, $Z_{i,j}$, które pozwolą zmienić kształt na zbliżony do bruzdki ziarna (Rys. 4.9.3). Po wprowadzeniu w macierzach nowych wartości współrzędnych punktów obrazujących bruzdkę ziarna żyta uzyskane macierze XE , YE , ZE reprezentują jego kształt (Rys. 4.9.4).



Rys. 4.9.4. Modele bryły ziarna żyta i bryły ziarna żyta przeciętego płaszczyzną z siatką

Model bryły ziarna żyta z płaszczyznami przekrojów przedstawiono na rysunku 4.9.5.

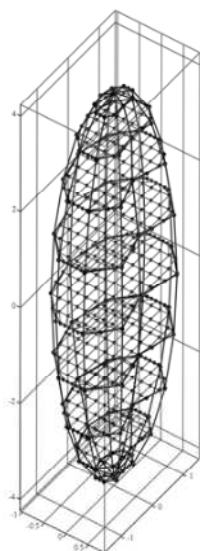
Do opisu kształtu obiektów roślinnych są tworzone równania parametryczne wyposażone we współczynniki, dzięki którym dokonuje się skalowania i zmiany kształtu. Kształt bryły ziarna pszenicy można modelować za pomocą parametrycznej krzywej przestrzennej i czterowęzłowej siatki. Do opisu konturu poprzecznego przekroju ziarna wykorzystano zmodyfikowaną konchoidę okręgu (Bronsztejn i in. 2009). Równania parametryczne krzywej przestrzennej opisują współrzędne punktów leżących na powierzchni ziarna (Mieszkalski 2011a) i mają one postać:

$$x_{i,j} = a \frac{\varphi_j}{n} \sin\left(\frac{\varphi_j}{n}\right) \left(\cos(\varphi_i)\right)^2 + b \frac{\varphi_j}{n} \sin\left(\frac{\varphi_j}{n}\right) \cos(\varphi_i) \quad (4)$$

$$y_{i,j} = c \frac{\varphi_j}{n} \sin\left(\frac{\varphi_j}{n}\right) \cos(\varphi_i) \sin(\varphi_i) + d \frac{\varphi_j}{n} \sin\left(\frac{\varphi_j}{n}\right) \sin(\varphi_i) \quad (5)$$

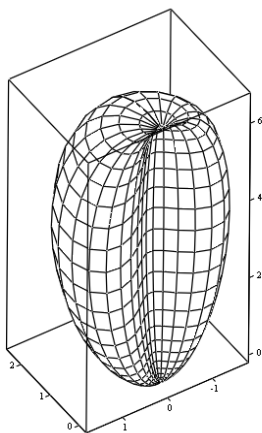
$$z_{i,j} = e \sin(\psi_j)^2 \sin(\psi_j)^2 \quad (6)$$

W równaniach tych występuje siedem współczynników skalujących służących do wymiarowania bryły.



Rys. 4.9.5. Model bryły ziarna żyta oraz siatki na jego przekrojach

Kształt ziarna pszenicy reprezentuje siatka leżąca na zewnętrznej powierzchni modelowanej bryły (Rys. 4.9.6).



(X, Y, Z)

Rys. 4.9.6. Siatka bryły ziarna pszenicy wygenerowana parametrycznymi równaniami powierzchni

Inna metoda matematycznego modelowania kształtu ziarna zbóż polega na zastosowaniu płatów Béziera (Kiciak 2000; Foley i in. 2001). Płat Béziera określa zbiór krzywych Béziera. Powierzchnie Béziera mogą być reprezentowane jako powierzchnie parametryczne. Parametryczny wielomianowy płat powierzchni określa współrzędne punktów (x, y, z) na powierzchni krzywoliniowej za pomocą trzech wielomianów. Najwygodniej jest stosować wielomian trzeciego stopnia, gdyż cztery punkty wystarczą do sterowania kształtem krzywej należącej do powierzchni. Brzegi płata stanowią parametryczne krzywe wielomianowe, umożliwiające gładkie połączenia sąsiednich płatów.

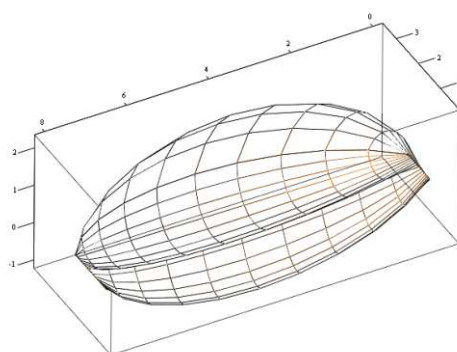
Równania parametryczne współrzędnych płata Béziera w zapisie macierzowym mają następującą postać (Kiciak 2000; Foley i in. 2001, Mieszkalski 2013a):

$$x(s, t) = T^T \cdot M \cdot G_x \cdot M \cdot S \quad (7)$$

$$y(s, t) = T^T \cdot M \cdot G_y \cdot M \cdot S \quad (8)$$

$$z(s, t) = T^T \cdot M \cdot G_z \cdot M \cdot S \quad (9)$$

Kształt i wymiary modelu 3D bryły ziarna pszenżyta (Rys. 4.9.7) można zmieniać przez zmianę wartości 48 współrzędnych punktów sterujących (kontrolnych), płatów Béziera wchodzących w skład modelu, po rozwinięciu trzech równań (7, 8, 9). Utrudnieniem przy stosowaniu płatów Béziera do modelowania kształtów obiektów roślinnych jest to, że nie jest możliwe, w sposób bezpośredni, przez zmianę wartości parametrów sterujących, osiągnięcie zamierzonych wymiarów modelowanej bryły. Pomimo tych mankamentów, proponowaną metodę można uznać za przydatną przy wizualizacji modelowanych obiektów roślinnych.



Rys. 4.9.7. Wykres modelu 3D bryły ziarna pszenżyta powstały z połączenia trzech płatów Béziera

Geometryczny model nasiona bobiku

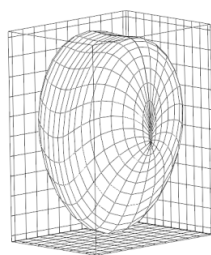
Do modelowania nasion bobiku wykorzystano równania parametryczne w postaci (Mieszkalski 2014):

$$X_{i,j} = a \cdot \sin(\phi_i) \cdot (d \cdot (\cos(\phi_i))^2 + e \cdot \cos(\theta_j)) \quad (10)$$

$$Y_{i,j} = a \cdot \sin(\phi_i) \cdot \sin(\theta_j) \cdot (f \cdot (\cos(\phi_i))^2 \cdot \sin(\phi_i) + g \cdot \sin(\phi_i)) \quad (11)$$

$$Z_{i,j} = c \cdot \cos(\phi_i) \quad (12)$$

Na rysunku 4.9.8 przedstawiono model nasiona bobiku określony na podstawie trzech równań (10, 11, 12).



Rys. 4.9.8. Model nasiona bobiku

Geometryczne modele wybranych owoców

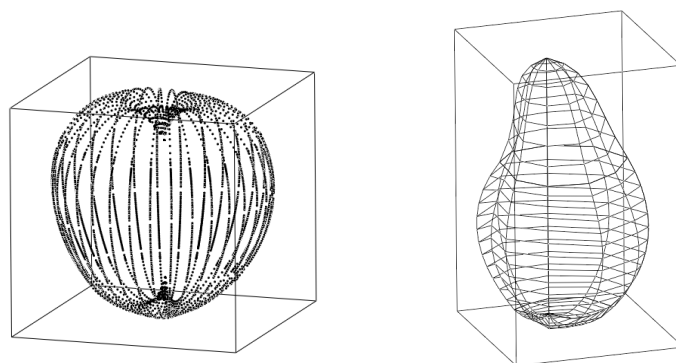
Kształt owoców charakteryzujących się powierzchniami wklęsło-wypukłymi, np. owoców jabłek i gruszek, modeluje się stosując krzywe Béziera. Krzywymi Béziera opisuje się kontur przekroju wzdłużnego modelowanego owocu. Każdy kontur, będący południkiem modelowanej bryły, opisany jest dwiema połączonymi krzywymi Béziera. Dokładność odwzorowania kształtu zależy od liczby przekrojów wzdłużnych bryły. Krzywe Béziera służące do opisu współrzędnych (x, y, z) południka mają następującą postać:

$$\begin{aligned}
 x_t = & xA \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^3 + xA1 \cdot \cos(\alpha) \cdot 3 \frac{t}{N} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^2 + \\
 & + xAA1 \cdot \cos(\alpha) \cdot 3 \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right] + xAB1 \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^3
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 y_t = & yA \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^3 + yA1 \cdot \sin(\alpha) \cdot 3 \frac{t}{N} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^2 + \\
 & + yAA1 \cdot \sin(\alpha) \cdot 3 \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right] + yAB1 \cdot \sin(\alpha) \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^3
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 z_t = & zA \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^3 + zA1 \cdot 3 \frac{t}{N} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^2 + \\
 & + zAA1 \cdot 3 \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right] + zAB1 \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^3
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Kształt modeli brył wybranych owoców jabłka i gruszki pokazano na rysunku 4.9.9.



Rys. 4.9.9. Modele owoców jabłka i gruszki

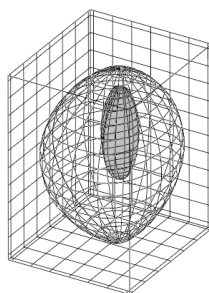
Do modelowania kształtu owoców, np. śliwki i jej pestki, stosuje się równania bazosferyczne (Mieszkalski 2003b):

$$X_{i,j} = a \cdot \sin(\varphi_i)^d \cdot \cos(\theta_j)^e
 \tag{16}$$

$$Y_{i,j} = b \cdot \sin(\varphi_i)^f \cdot \sin(\theta_j)^g \quad (17)$$

$$Z_{i,j} = c \cdot \sin(\varphi_i)^h \quad (18)$$

Kształt bryły aproksymującej owoc śliwki i jej pestkę uzyskuje się przez zmianę wartości współczynników kształtu (d, e, f, g), a wymiary zewnętrzne bryły (długość, szerokość, grubość) przez zmianę wartości zmiennych skalujących (a, b, c). Model bryły aproksymującej owoc śliwki i jej pestkę przedstawiono na rysunku 4.9.10.



Rys. 4.9.10. Model owocu śliwki z pestką

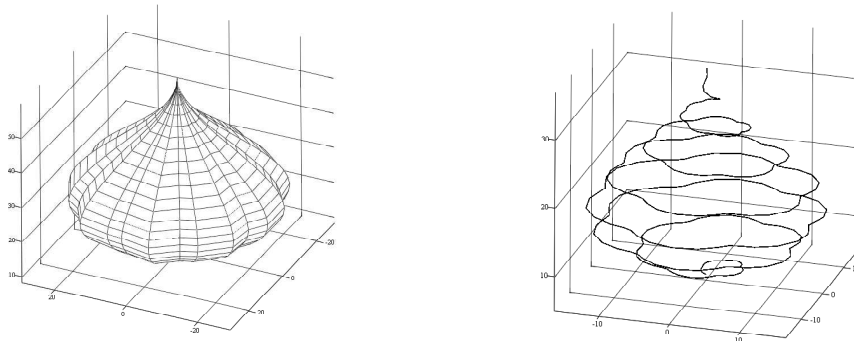
Geometryczne modele wybranych warzyw

Nieregularny kształt brył warzyw, np. główek czosnku, może być reprezentowany powierzchnią parametryczną i krzywą przestrzenną (Mieszkalski 2012*b*, 2012*c*). Modelowana powierzchnia parametryczna 3*D* otaczała objętość leżącą w bliskiej odległości od powierzchni zewnętrznej główki czosnku (Rys. 4.9.11). W równaniach wprowadzono 11 parametrów sterujących, za których pomocą ustalono podstawowe wymiary zewnętrzne modeli bryły główek czosnku, ich kształt i liczbę punktów węzłowych w siatkach modeli powierzchni dyskretnej. Macierzowe równania współrzędnych $X\xi$, $Y\xi$, $Z\xi$ punktów węzłowych siatki powierzchni reprezentującej kształt główki czosnku mają następującą postać:

$$\begin{aligned}
X\xi_{i,j} &= \frac{\phi_j}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_j}{n}\right) \cdot (R+r) \cos(\phi_i) - \\
&+ \frac{\phi_j}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_j}{n}\right) \cdot \lambda \cdot r \cdot \cos\left(\frac{R+r}{r} \cdot \phi_i\right)
\end{aligned}
\tag{19}$$

$$\begin{aligned}
Y\xi_{i,j} &= \frac{\phi_j}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_j}{n}\right) \cdot (R+r) \sin(\phi_i) - \\
&+ \frac{\phi_j}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_j}{n}\right) \cdot \lambda \cdot r \cdot \sin\left(\frac{R+r}{r} \cdot \phi_i\right)
\end{aligned}
\tag{20}$$

$$Z\xi_{i,j} = h \cdot \cos((\alpha \cdot \psi)_j + \beta) \cdot \sin\left(\frac{\psi_i}{n} + \chi\right)
\tag{21}$$

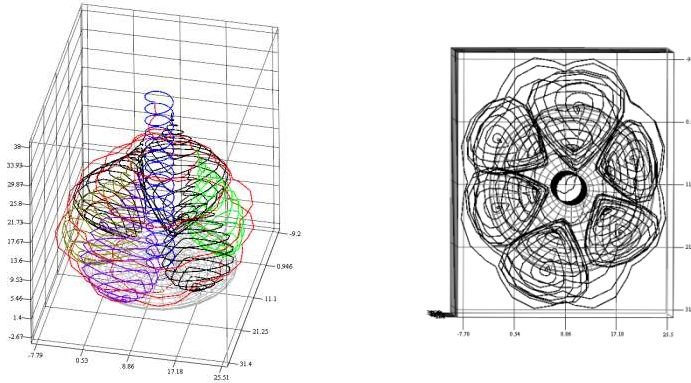


Rys. 4.9.11. Modele 3D główek czosnku reprezentowanych powierzchniami parametrycznymi i krzywą przestrzenną

Kształt części morfologicznych główki czosnku modeluje się za pomocą krzywych i powierzchni przestrzennych (Mieszkalski 2012a). Ząbki czosnku i obcięty pęd są aproksymowane krzywymi przestrzennymi leżącymi w bliskiej odległości od powierzchni zewnętrznych rzeczywistych części morfologicznych główki czosnku. Skróconą łodygę odwzorowano za pomocą siatki dyskretnej powierzchni. Krzywa przestrzenna jest modelem matematycznym kształtu łuski zewnętrznej okrywającej ząbki w główce czosnku (Rys. 4.9.11). Stosując przesunięcia i obroty względem osi X , Y , Z układu współrzędnych, złożono z modeli 3D części morfologicznych główki czosnku. Krzywe przestrzenne reprezentujące kształty ząbków czosnku roz-

mieszczonych wokół modelu rurowego pędu i przylegających do modelu skróconej łodygi oraz łuski zewnętrznej okrywającej ząbki w główce czosnku oraz rzuty na płaszczyznę XY krzywych reprezentujących kształty części morfologicznych modelowanego czosnku zamieszczono na rysunku 4.9.12.

Krzywa przestrzenna może być stosowana do matematycznego modelowania kształtu cebuli (Mieszkalski 2011b). Do opisu konturu poprzecznego przekroju cebuli wykorzystano zmodyfikowane równania parametryczne ślimaka Pascala (Bronszejn i in. 2009). Uzyskaną krzywą sprowadzono do postaci krzywej przestrzennej leżącej w bliskiej odległości od zewnętrznej powierzchni cebuli. Na krzywą przestrzenną reprezentującą cebulę naniesiono siatkę elipsoidy.



Rys. 4.9.12. Krzywe przestrzenne reprezentujące kształty ząbków czosnku i rzuty części morfologicznych na płaszczyznę XY

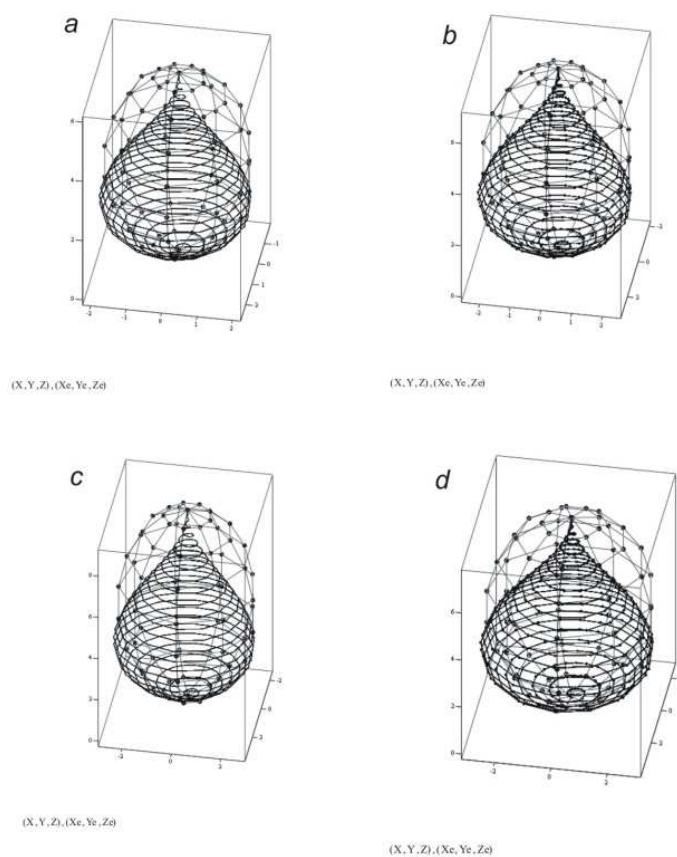
Macierzowe formy zapisu równań krzywych przestrzennych mają następującą postać:

$$X_{\xi}^{\zeta} \chi_{i,j} = a \cdot \frac{\phi_i}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_i}{n}\right) \cos(\phi_i)^2 + b \cdot \frac{\phi_i}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_i}{n}\right) \cos(\phi_i) \quad (22)$$

$$Y_{\xi}^{\zeta} \chi_{i,j} = c \cdot \frac{\phi_i}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_i}{n}\right) \cdot \cos(\phi_i) \cdot \sin(\phi_i) + d \cdot \frac{\phi_i}{n} \cdot \sin\left(\frac{\phi_i}{n}\right) \sin(\phi_i) \quad (23)$$

$$Z_{\xi}^{\zeta} \chi_{i,j} = \delta \chi \cdot \frac{\phi_i}{n} \quad (24)$$

Wyznaczone na podstawie równań 22, 23, 24 krzywe przestrzenne reprezentujące cebule z nałożonymi siatkami elipsoid przestawiono na rysunku 4.9.13.



Rys. 4.9.13. Krzywe przestrzenne reprezentujące cebule z nałożonymi siatkami elipsoid

W przypadku brył charakteryzujących się dużą nieregularnością, np. bulw ziemniaka, zastosowano macierzowe równanie współrzędnych Xz , Yz , Zz , w których zmiany kształtu dokonuje się za pomocą macierzy $A1(N)$. Macierzowe równania współrzędnych modelu bulwy ziemniaka mają postać:

$$Xz = \sin(\varphi_i) \cdot \cos(\theta_j) \cdot A1(N) \quad (25)$$

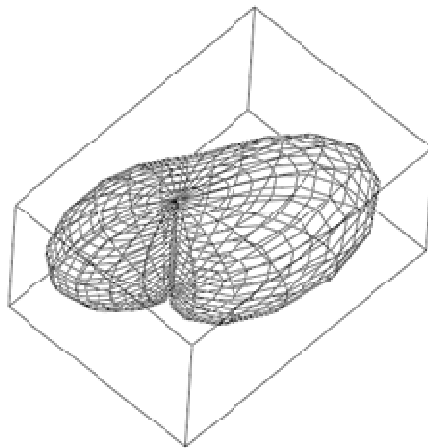
$$Yz = \sin(\varphi_i) \cdot \sin(\theta_j) \cdot A1(N) \quad (26)$$

$$Zz = \cos(\varphi_i) \cdot A1(N) \quad (27)$$

Macierz $A1(N)$ zapisana jest w formie numerycznej pętli:

$$A1(N) := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..N \\ \quad \text{for } j \in 0..N \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} B1_{i,j} \leftarrow \sin(\psi_j - 0.6)^2 + \sin(\xi_i)^2 \text{ if } i = j \\ B1_{i,j} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \quad \quad B1 \end{array} \right. \quad (28)$$

Wyznaczoną bryłę aproksymującą kształt wybranej bulwy ziemniaka zamieszczono na rysunku 4.9.14.



Rys. 4.9.14. Model bryły bulwy ziemniaka

Do modelowania korzeni warzyw zbliżonych kształtem do brył obrotowych, np. korzenia marchwi, można wykorzystać krzywe Béziera, które podlegają obrotowi (Mieszkalski 2013b). Krzywe Béziera aproksymują kształt konturu wzdłuż-

nego przekroju bryły. Macierzowe równania współrzędnych x_{A1} , z_{A1} punktów pierwszej krzywej Béziera korzenia marchwi mają postać:

$$\begin{aligned} x_{A1t_1} = & x_{A11} \cdot \left[1 - \frac{t_1}{N}\right]^3 + x_{A12} \cdot 3 \frac{t_1}{N} \cdot \left[1 - \frac{t_1}{N}\right]^2 + \\ & + x_{A13} \cdot 3 \cdot \left[\frac{t_1}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t_1}{N}\right] + x_{A14} \cdot \left[\frac{t_1}{N}\right]^3 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} z_{A1t_1} = & z_{A11} \cdot \left[1 - \frac{t_1}{N}\right]^3 + z_{A12} \cdot 3 \frac{t_1}{N} \cdot \left[1 - \frac{t_1}{N}\right]^2 + \\ & + z_{A13} \cdot 3 \cdot \left[\frac{t_1}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t_1}{N}\right] + z_{A14} \cdot \left[\frac{t_1}{N}\right]^3 \end{aligned} \quad (30)$$

Macierzowe równania współrzędnych x_{A2} , z_{A2} punktów drugiej krzywej Béziera korzenia marchwi są zapisane w następującej postaci:

$$\begin{aligned} x_{A2t} = & x_{A14} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^3 + x_{A22} \cdot 3 \frac{t}{N} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^2 + \\ & + x_{A23} \cdot 3 \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right] + x_{A24} \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^3 \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} z_{A2t} = & z_{A14} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^3 + z_{A22} \cdot 3 \frac{t}{N} \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right]^2 + \\ & + z_{A23} \cdot 3 \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^2 \cdot \left[1 - \frac{t}{N}\right] + z_{A24} \cdot \left[\frac{t}{N}\right]^3 \end{aligned} \quad (32)$$

W celu uzyskania bryły obrotowej reprezentującej korzeń marchwi dokonuje się obrotu krzywych Béziera:

$$X_{A1t_1, j} = x_{A1t_1} \cdot \sin(\phi_j) \quad (33)$$

$$YA_{1t1, j} = xA_{1t1} \cdot \cos(\phi_j) \quad (34)$$

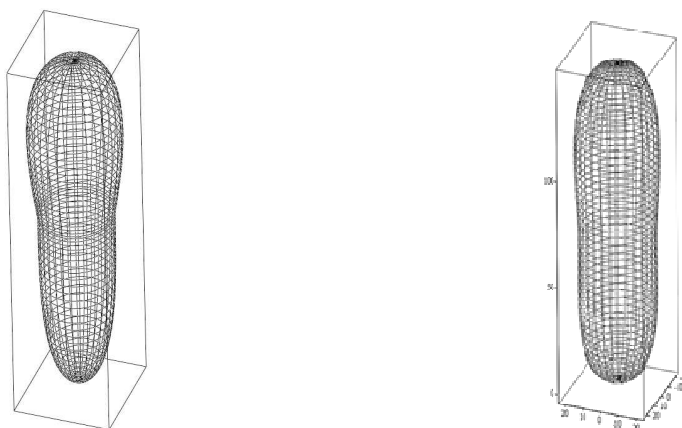
$$ZA_{1t1, j} = zA_{1t1} \quad (35)$$

$$XA_{2t, j} = xA_{2t} \cdot \sin(\phi_j) \quad (36)$$

$$YA_{2t, j} = xA_{2t} \cdot \cos(\phi_j) \quad (37)$$

$$ZA_{2t, j} = zA_{2t} \quad (38)$$

Modele brył korzeni marchwi przedstawiono na rysunku 4.9.15.



Rys. 4.9.15. Modele korzeni marchwi

Przegląd stosowanych wybranych metod modelowania geometrii 3D obiektów roślinnych użytkowanych rolniczo

Do modelowania kształtu obiektów roślinnych użytkowanych rolniczo stosuje się wiele metod. Mieszkalski (2011a) oraz Mabile i Abecassis (2003) do opisu kształtu ziarna pszenicy zastosowali równania parametryczne. Równania parametryczne wykorzystano również do modelowania brył nasion bobiku (Mieszkalski 2014). Kształt ziarna pszenżyta Mieszkalski (2013a) modelował za pomocą płatów Béziera. Weres (2010) zaproponował informatyczny system pozyskiwania danych o geometrii ziarna kukurydzy. Boniecki, Olszewski i Nowakowski (2008) opracowali metodę identyfikacji kształtów ziarna zbóż za

pomocą superformuły Gielisa (Gielis 2003). Do modelowania brył ziarna Frączek i Wróbel (2003) zastosowali metodę polegającą na zestawieniu kolejnych obrazów uzyskanych z przekrojów poprzecznie ciętych ziaren. Wróbel (2011) zaproponował modelowanie bryły ziarna za pomocą programu komputerowego Solid Edge, a Weres i in. (2014b) 3DS Max. Kęska i Feder (1997) model bryły ziarna pozyskali metodą komputerowej analizy obrazów. Mieszkalski (2003), Dobrzański i in. (2012) wykorzystali układ równań parametrycznych bazosferycznych do reprezentacji obiektów geometrycznych o różnorodnych kształtach, np. model kształtu ziarna zbóż uzyskuje się po wprowadzeniu w macierzach współrzędnych elipsoidy trójosiowej nowych wartości współrzędnych punktów obrazujących bruzdkę. Kształt bryły aproksymującej owoc śliwy i jej pestkę uzyskano przez zmianę wartości współczynników kształtu, a podstawowe wymiary zewnętrzne bryły – przez zmianę wartości zmiennych skalujących w parametrycznych równaniach bazosferycznych. Kształt owoców charakteryzujących się powierzchniami wklęsło-wypukłymi, np. owoców jabłek i gruszek, modeluje się, stosując krzywe Béziera. Do modelowania korzeni warzyw zbliżonych kształtem do brył obrotowych, np. korzenia marchwi, można stosować krzywe Béziera, które podlegają obrotowi (Mieszkalski 2013b). Nieregularny kształt brył warzyw, np. cebuli, główek czosnku, może być reprezentowany powierzchnią parametryczną i krzywą przestrzenną (Mieszkalski 2011b, 2012b, 2012c). W przypadku brył charakteryzujących się dużą nieregularnością, np. bulw ziemniaka, zastosowano układ macierzowych równań współrzędnych, w których skład wchodzi macierze kształtu. Opisane metody matematycznego modelowania kształtu obiektów roślinnych użytkowanych rolniczo są szczególnie przydatne przy projektowaniu maszyn roboczych.

PIŚMIENNICTWO

- Boac J. M., Casada M.E., Maghirang R.G., Harner III J.P., 2010. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1201-1216.
- Cășandroi T., Micila C., 2010. Theoretical development of a mathematical model to evaluate gravimetric flow rate of seeds through orifices. *U.P.B. Sci. Bull., Serials D*, 72(4), 269-280.
- Forrest A.R., 1979. On the rendering of surfaces. *SIGGRAPH*, 79, 253-259.
- Boniecki P., Olszewski T., 2008. Neuronal modeling of selected agricultural objects with usage of John Gielis's supershape. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 53(1).
- Boniecki P., Nowakowski K., 2008. The classification of maizes kernels with supporting neuronal identification of shape. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 53(3).
- Bronsztejn I.N., Siemiendajew K.A., Musiol G., Mühlig H., 2009. *Nowoczesne kompendium matematyki*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Deussen O., Hanrahan P., Lintermann B., Měch R., Pharr M., Prusinkiewicz P., 1998. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems. *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, SIGGRAPH 98*, Orlando, Florida, 275-286.
- Dobrzański B.jr., 2007. Właściwości geometryczne i mechaniczne nasion podczas deformacji i powstawania uszkodzeń. Właściwości geometryczne mechaniczne i strukturalne surowców i produktów spożywczych. Rozdział 2. Monografia pod redakcją B. Dobrzańskiego jr. i L. Mieszkalskiego. Komitet Agrofizyki PAN. Wydawnictwo Naukowe FRNA, 13-40.
- Dobrzański B.jr., Mieszkalski L., Sobczuk H., Anders A., Stępniewski A., 2012. Modelowanie geometryczne roślinnych obiektów sferycznych.. Monografia. Komitet Agrofizyki PAN. Wydawnictwo Naukowe FRNA, 11-35.
- Foley J.D., van Dam A., Fisher S.K., Hughes J.F., Phillips R.L., 2001. Wprowadzenie do grafiki komputerowej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Frączek J., Wróbel M., 2003. Analiza możliwości wykorzystania istniejących modeli ośrodków granulanych do opisu biologicznych materiałów ziarnistych. *Acta Agrophysica*, 92.
- Frączek J., Ślipek Z., 2006. Modele roślinnych struktur ziarnistych. *Inżynieria Rolnicza*, 12.
- Frączek J., Wróbel M., 2006. Metodyczne aspekty oceny kształtu nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 12.
- Frączek J., Wróbel M., 2009. Zastosowanie grafiki komputerowej w rekonstrukcji 3D nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 6(115), 87-94.
- Gielis J., 2003. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes. *American Journal of Botany*, 90(3). Invited Special Paper, 333-338.
- Gielis J., Beirinckx B., Bastiaens E., 2003. Superquadrics with rational and irrational symmetry. *Symposium on Solid Modeling and Applications*.
- Gielis J., Gerats T., 2004. A botanical perspective on modeling plants and plant shapes in computer graphics. *International Conference on Computer, Communication and Control Technologies*. Austin, Texas.
- Grochowicz J., 1994. *Maszyny do czyszczenia i sortowania nasion*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Lublin.
- Hagen M., 1986. *Varieties of realism*. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Hebda T., Micek P., 2005. Zależność pomiędzy właściwościami geometrycznymi ziarna zbóż. *Inżynieria Rolnicza*, 6.
- Kęska W., Feder S., 1997. Rekonstrukcja kształtu nasion na podstawie komputerowej analizy obrazu. VII Sympozjum im. Czesława Kanafojskiego, Płock, 254-258.
- Kiciak P., 2000. *Podstawy modelowania krzywych i powierzchni. Zastosowania w grafice komputerowej*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Mabille F., Abecassis J., 2003. Parametric modeling of wheat grain morphology: a new perspective. *Journal of Cereal Science*, 37.
- Mańkowski S., 2004. Model bryły nasiona łubinu białego. *Technical Science. Supplement 1*. UWM, Olsztyn, 67-75.
- Mieszkalski L., 2001. Metoda tworzenia modelu bryły ziarna zbóż. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 1(31), 29-36.
- Mieszkalski L., 2002a. Analiza krzywych Béziera stosowanych do modelowania nieregularnych kształtów obiektów biologicznych. *Acta Agrophysica*, 78, 159-170.
- Mieszkalski L., 2002b. Metodą modelowania nieregularnych kształtach za pomocą funkcji wielomianowych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, tom 11/20, 13-16.
- Mieszkalski L., 2002c. Zastosowanie siatki powierzchni kulistej do modelowania brył aproksymujących surowce roślinne. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, tom 12/21, 11-14.

- Mieszkalski L., 2003a. Modelowanie krzywych i siatek powierzchni brył geometrycznych imitujących surowce roślinne. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, tom 13/23, 37-39.
- Mieszkalski L., 2003b. Method for generating three – dimensional solid models of seeds applied in the food industry. *Technical Sciences*, 6. UWM, Olsztyn, 49-55.
- Mieszkalski L., Sołoducha H.K., 2004. Model matematyczny kształtu nasion fasoli. *Technical Science. Supplement 1*. UWM, Olsztyn, 59-66.
- Mieszkalski L., 2007. Modelowanie matematyczne krzywych stosowanych do opisu kształtu nasion, owoców i warzyw. Właściwości geometryczne mechaniczne i strukturalne surowców i produktów spożywczych. (Red. B. Dobrzańskiego i L. Mieszkalskiego). Komitet Agrofizyki. PAN. Wydawnictwo Naukowe FRNA, 13-40.
- Mieszkalski L., Anders A., Sołoducha H.K., 2008. Modelowanie brył owoców na przykładzie owoców mandarynki. *Postępy Przetwórstwa Spożywczego*, 2, tom 18/33.
- Mieszkalski L., 2011a. Metoda matematycznego modelowania kształtu bryły ziarna pszenicy za pomocą parametrycznej krzywej przestrzennej i czterowzłowej siatki. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 41-45.
- Mieszkalski L., 2011b. Komputerowe wspomaganie matematycznego modelowania kształtu cebuli za pomocą krzywej przestrzennej. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 52-57.
- Mieszkalski L., 2012a. Metoda matematycznego modelowania kształtu główki czosnku (*Allium sativum* L.) za pomocą krzywych przestrzennych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 60-65.
- Mieszkalski L., 2012b. A mathematical model for the garlic (*Allium sativum*) bulb solid shape represented by parametric surface. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture*, 59, 71-76.
- Mieszkalski L., 2012c. A mathematical model for the garlic (*Allium sativum*) bulb solid shape expressed with space curve. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture*, 59, 77-82.
- Mieszkalski L., 2013a. Metoda matematycznego modelowania płatami Béziera kształtu ziarna pszenicy. *Inżynieria Rolnicza*, 2(143), T. 1, 225-232.
- Mieszkalski L., 2013b. Computer-aiding of mathematical modeling of the carrot (*Daucus carota* L.) root shape. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture*, 61, 17- 23.
- Mieszkalski L., 2014. Matematyczny model kształtu nasion bobiku i jego podstawowych części morfologicznych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 34-40.
- Soltani M., Alimardani R., Omid M., 2010. A New mathematical modeling of banana fruit and comparison with actual values of dimensional properties. *Modern Applied Science*, 4(8), 104-113.
- Stępień C., 1999. Geometryczny model procesu wzrostu roślin dla grafiki komputerowej. II Krajowa Konferencja „Metody i systemy komputerowe w badaniach naukowych i projektowaniu inżynierskim” Kraków.
- Stępień C., 2000. Self-congruency of geometric model soft plants. National Conference on Application of Mathematics In Biology and Medicine. Zawoja.
- Wei-long D., Yu-ping Z., Qian-yuan Z., De-feng Z., Qi C., 2011. Realistic simulation of rice plant. *Rice Science*, 18(3), 224-230.
- Weres J., 2010. Informatyczny system pozyskiwania danych o geometrii produktów rolniczych na przykładzie ziarniaka kukurydzy. *Inżynieria Rolnicza*, 7(125), 229-235.
- Weres J., Olek W., Kujawa S., Siatkowski M., 2014a. Integration of software components for determination and analysis of properties of agri–food and forest products. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 59(1), 159-163.

- Weres J., Kiecana M., Balcerzak K., 2014*b*. Two approaches to representing agri-food product geometry – an original software for constructing finite element models and the 3DS Max approach. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 59(1), 155-158.
- Wróbel M., 2011. Metoda rekonstrukcji 3D nasion w aplikacji typu CAD. *Inżynieria Rolnicza*, 6(131), 281-288.

4.10. Modelowanie właściwości mechanicznych tkanek roślinnych

Artur Zdunek, Piotr M. Pieczywek

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

Właściwości mechaniczne tkanek roślinnych są wypadkową wielu procesów i czynników, jak choćby mikrostruktury tkanki, ciśnienia wewnątrzkomórkowego oraz właściwości mechanicznych ścian komórkowych związanych z budową i stopniem degradacji pektyn w ścianach komórkowych oraz blaszce środkowej. Określenie wpływu każdego z wymienionych czynników na bazie wyników testów mechanicznych jest niezwykle trudne ze względu na trudności techniczne z pomiarami mechanicznymi tkanek roślinnych w skali mikro i nano. Drogą do wyjaśnienia, jakie zjawiska i cechy budowy leżą u podstaw właściwości mechanicznych tkanek roślinnych, są badania modelowe polegające na opracowaniu matematycznych modeli opisujących ich deformację.

Modele reologiczne

Pierwsze modele właściwości mechanicznych materiałów biologicznych oparte były na zasadach mechaniki ośrodka ciągłego lub były modelami czysto empirycznymi. Cechy reologiczne tkanek roślinnych związane z właściwościami sprężysto-plastycznymi oraz lepko-sprężystymi odwzorowywane są za pomocą wieloparametrowych modeli takich jak: model Maxwella, Kelvina-Voigta lub Burgers'a. Parametry tych modeli wyznaczone są metodą doświadczalną, na podstawie wyników testów mechanicznych, np. poprzez dopasowanie modelu do charakterystyk mechanicznych metodą najmniejszych kwadratów. Główne ograniczenia wynikające z zastosowania tego typu modeli związane są z interpretacją fizyczną otrzymanych wyników i odniesieniem ich do rzeczywistych procesów zachodzących podczas deformacji tkanki. Wynika to z faktu, że zbiór fizyko-chemicznych czynników, złożonych relacji oraz zjawisk wpływających na właściwości mechaniczne tkanki upraszczany jest do opisu przy pomocy jednego lub kilku parametrów modelu. W rezultacie niemożliwe jest bezpośrednie zidentyfikowanie procesu odpowiedzialnego za zmianę wartości danego parametru. Pomimo ograniczeń modele reologiczne znalazły zastosowanie do wyznaczenia parametrów mechanicznych tkanek roślinnych (modułu Young'a, współczynnika Poisson'a) oraz w badaniach zjawisk lepko-sprężystych oraz relaksacji naprężenia.

Modele analityczne

Oddzielną grupę tworzą modele analityczne, które częściowo zniosły ograniczenia modeli reologicznych. Podobnie jak modele reologiczne, opierają się na założeniach o homogenicznym rozkładzie naprężenia w tkankach, izotropii właściwości fizycznych, jednakowym kształcie wszystkich komórek oraz symetryczności struktur. Istotną różnicą między oboma typami modeli jest uwzględnienie mikrostrukturalnych cech budowy tkanki w modelach analitycznych. Budowa takiego modelu rozpoczyna się od stworzenia koncepcyjnego modelu tkanki składającego się z jednakowych komórek o wyidealizowanych kształtach – sfer, cylindrów lub wielościanów foremnych. Następnie na podstawie mechaniki cienkich powłok lub zbiorników cienkościennych wyprowadza się konstytutywne relacje pomiędzy przyłożonym obciążeniem a naprężeniem oraz deformacją tkanki. W powstałym w ten sposób opisie funkcyjnym parametrami wejściowymi są łatwe do zinterpretowania wielkości fizyczne, takie jak promień komórki, grubość ściany komórkowej, ciśnienie turgorowe, moduł Young'a ściany komórkowej, współczynnik Poisson'a itd.

Główną wadą modeli koncepcyjnych/analitycznych jest to, że nie reprezentują one rzeczywistego obrazu tkanki roślinnej. Metoda modelowania polegająca na powielaniu jednakowych komórek i budowaniu z nich regularnych struktur nie nadaje się do odwzorowania heterogenicznych struktur. Parametry geometryczne komórek takie jak objętość, pole powierzchni przekroju, orientacja w przestrzeni czy współczynnik kształtu wykazują znaczną zmienność nawet w obrębie tego samego owocu. Zaniedbanie tych czynników w modelu uniemożliwi określenie ich wpływu na właściwości fizyczne tkanki i skutkować może błędnymi wynikami. Z drugiej strony, w konsekwencji budowy opartej na powielaniu jednakowych elementów, wszystkie komórki modelowej tkanki poddawane są jednakowemu obciążeniu. Jednolity rozkład naprężeń w przypadku jednoosiowego rozciągania lub ściskania oznacza, że każda komórka przenosi obciążenia o takiej samej wartości i ulega takiemu samemu odkształceniu jak pozostałe. W rezultacie możliwe jest znaczne uproszczenie przeprowadzanych obliczeń, poprzez analizę zachowania całej struktury w odniesieniu do jej podstawowego elementu. Mimo uwzględniania pewnych aspektów budowy tkanek roślinnych, ich modele analityczne wciąż uznawać należy za modele ośrodka ciągłego.

Metoda elementów skończonych

Ze względu na złożoność obliczeniową konstrukcja analitycznych modeli, których parametry geometryczne odzwierciedlałyby rzeczywistą mikrostrukturę tkanki była przez długi czas zbyt trudna, a konieczne obliczenia czasochłonne.

Możliwość taka pojawiła się wraz z rozwinięciem nowoczesnych, numerycznych technik obliczeniowych – metody elementów skończonych (MES), metody różnic skończonych (MRS) oraz metody elementu brzegowego, znanych i sprawdzonych z inżynierii materiałowej, inżynierii konstrukcji budowlanych, budowie maszyn.

Podstawą metody elementów skończonych (MES) i metod pokrewnych jest dyskretyzacja. Proces ten umożliwia przekształcenie opisu pola wyrażonego za pomocą nieskończonej liczby parametrów w opis wyrażony przez skończoną liczbę wartości zlokalizowanych, w skończonej liczbie punktów (węzłów). Zmienność pola między węzłami określana jest za pomocą tak zwanych funkcji interpolacyjnych. Podejście takie pozwala na uzyskanie przybliżonych rozwiązań w sytuacji, gdy badamy obiekt o skomplikowanej kształci oraz niejednorodnym rozkładzie właściwości fizycznych. W przypadku MES model dyskretny otrzymywany jest przez fizyczny podział badanego ośrodka ciągłego na skończoną liczbę elementów o podobnym kształcie, a następnie określeniu sposobu interakcji między nimi, poprzez zdefiniowanie połączeń w węzłach oraz dobór funkcji interpolacyjnych. Element skończony jest prostą figurą geometryczną (płaską lub przestrzenną), zdefiniowaną za pomocą zbioru punktów zwanych węzłami, oraz pewnych funkcji interpolacyjnych (węzłowych, kształtu) służących do opisu rozkładu analizowanej wielkości we wnętrzu i wzdłuż krawędzi elementu dyskretnego. Węzły znajdują się w wierzchołkach elementu skończonego, ale mogą być również umieszczone na jego bokach i w jego wnętrzu. Jeżeli węzły znajdują się tylko w wierzchołkach, to element skończony jest nazywany elementem liniowym (ponieważ funkcje interpolacyjne są wtedy liniowe). W pozostałych przypadkach mamy do czynienia z elementami wyższych rzędów. Dobór elementu uzależniony jest ściśle od geometrii obiektu będącego przedmiotem analizy, jak również od stanu obciążenia jakiemu jest on poddawany. Wyniki obliczeń są zależne zarówno od kształtu jak i liczby elementów w modelu

Stosując MES rozwiązanie ogólne dla rozpatrywanego układu uzyskuje się poprzez zsumowanie rozwiązań cząstkowych dla wszystkich elementów dyskretnych. Dla każdego z elementów dyskretnych budowany jest układ równań algebraicznych na podstawie współrzędnych oraz wartości parametrów fizycznych w punktach węzłowych. Następnie wykorzystując warunki równowagi i warunki przemieszczeń węzłów elementy dyskretnie łączone są w całość. W rezultacie uzyskuje się tzw. globalną macierz sztywności dla badanego obiektu, którą podstawia się do ogólnego równania macierzowego MES. Do równania wprowadza się również macierz geometrycznych parametrów węzłowych (przemieszczeń) oraz macierz statycznych parametrów węzłowych (obciążeń). Po wprowadzeniu warunków brzegowych jest ono rozwiązywane i w rezultacie otrzymuje się wartości poszukiwanych wielkości fizycznych w węzłach.

Jedną z pierwszych aplikacji MES w modelowaniu mikro-mechaniki tkanek roślinnych była analiza procesu jednoosiowego ściskania pojedynczej komórki tkanki miękkiszowej. Testowane były dwa typy modeli: w jednym komórka miała postać sferyczną, w drugim natomiast komórka miała kształt cylindra. W obu przypadkach komórka posiadała cienką, liniowo-sprężystą i nieprzepuszczalną ścianę komórkową. Wnętrza wirtualnych komórek wypełnione były przez nieściśliwe ciało stałe o bardzo niskim współczynniku sprężystości postaciowej. Ciśnienie turgorowe reprezentowane było przez siły działające na wewnętrzną powierzchnię ściany komórkowej. Pomimo przyjęcia liniowo-sprężystego materiału ściany komórkowej, charakterystyki naprężenie-odkształcenie wyznaczone dla obu typów modeli miały nieliniowo narastający przebieg. Wynika z tego, że w przypadku tkanek, nieliniowa odpowiedź na przyłożone obciążenie jest kombinacją efektów wywołanych przez geometrię ściany komórkowej oraz nieściśliwość płynu komórkowego. Efekt ten wyraźnie uwidocznił się w symulacjach przy zerowym ciśnieniu turgorowym. Sferyczne komórki ze względu na swoją geometrię zachowywały pierwotny kształt i wykazywały pewną wytrzymałością na ściskanie, podczas gdy poprzecznie obciążone cylindryczne komórki nie wykazywały prawie żadnej wytrzymałości na ściskanie i odkształcały się swobodnie. Mimo zastosowania numerycznych metod obliczeniowych model wciąż w dużym stopniu przypominał modele analityczne (np. ze względu na przyjęcie wyidealizowanego kształtu komórki).

Podejście bliższe rzeczywistości prezentuje w pełni trójwymiarowy model pojedynczej komórki zbudowany na bazie obrazów mikroskopowych typowej komórki z tkanki miękkiszowej jabłka. Ściany komórkowe w tym modelu traktowane były jako cienkie elementy powłokowe. Migracja płynu komórkowego symulowana była przez liniowe równanie opisujące przyrost ciśnienia w funkcji zmiany objętości komórki. Symulacja podzielona była na dwa etapy – najpierw komórka odkształcała się swobodnie pod wpływem ciśnienia turgorowego, a następnie po osiągnięciu stanu równowagi, ściskana była pomiędzy dwiema płytami.

W dalszych pracach nad numerycznymi modelami MES procesu ściskania pojedynczej komórki stosowane były nieliniowe modele materiałowe, różne typy elementów dyskretnych oraz modeli kontaktu, a także większe zakresy deformacji. Metoda MES umożliwia również wprowadzenie, jako dane wejściowe, rzeczywistej struktury komórkowej 2D lub 3D. Zabieg ten znacznie urealnia model oraz powoduje poprawę zgodności przewidywanych właściwości mechanicznych z charakterystykami mechanicznymi.

Uzyskanie poprawnych wyników z modeli MES wymaga wprowadzenia do nich danych wejściowych opartych na dokładnych pomiarach laboratoryjnych (promień początkowy komórki, grubość ściany komórkowej itd.). Stosowanie metody polegającej na przyjmowaniu z góry wartości parametrów, których po-

miary są bardzo trudne, doprowadzić może do uzyskania niejednoznacznego rozwiązania, tzn. takiego, którego zgodność z wynikami testów mechanicznych uzyskać można dla kilku kombinacji wartości parametrów wejściowych. Innym problemem związanym z symulacją deformacji całej tkanki jest występowanie kolizji pomiędzy sąsiadującymi, ale nie stykającymi się ścianami komórkowymi np. ścianami ograniczającymi przestrzeń międzykomórkowe. Ponadto dyskretyzacja obszaru wewnątrz komórki, przy założeniu podobnej gęstości siatki MES jak w przypadku ścian komórkowych, skutkuje wygenerowaniem ogromnej liczby elementów dyskretnych, które znacząco spowalniają obliczenia. Ogranicza to możliwość zastosowania MES do modeli tkanek o relatywnie niskiej ilości przestrzeni międzykomórkowych, lub do symulacji jedynie niewielkich odkształceń. Dodatkowo utworzenie w pełni trójwymiarowego modelu tkanki wymaga zastosowania specjalistycznych technik obrazowania lub numerycznych metod generowania wirtualnych struktur w oparciu o rozkłady statystyczne parametrów geometrycznych rzeczywistych tkanek.

PIŚMIENNICTWO

- Bruce D.M., 2003. Mathematical modelling of the cellular mechanics of plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1437), 1437-44.
- Dintwa E., Jancsó P., Mebatsion H.K., Verlinden B., Verboven P., Wang C.X., Thomas C.R., Tijskens E., Ramon H., Nicolaï B., 2011. A finite element model for mechanical deformation of single tomato suspension cells. *Journal of Food Engineering*, 103, 265-272.
- Ho Q.T., Verboven P., Verlinden B.E., Herremans E., Wevers M., Carmeliet J., Nicolaï B.M., 2011. A Three-Dimensional Multiscale Model for Gas Exchange in Fruit. *Plant Physiology* 155, 1158-1168.
- Lin J., Naceur H., Coutellier D., Laksimi A., 2014. Efficient meshless SPH method for the numerical modeling of thick shell structures undergoing large deformations. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 65, 1-13.
- Mebatsion H.K., Verboven P., Ho Q.T., Verlinden B.E., Nicolaï B.M., 2008. Modelling fruit (micro)structures why and how? *Trends in Food Science & Technology*, 19, 59-66.
- Pieczywek P.M., Zdunek A., 2014. Finite element modelling of the mechanical behaviour of onion epidermis with incorporation of nonlinear properties of cell walls and real tissue geometry. *Journal of Food Engineering*, 123, 50-59.
- Tijskens E., Ramon H., De Baerdemaeker J., 2003. Discrete element modelling for process simulation in agriculture. *Journal of Sound and Vibration*, 266, 493-514.

4.11. Metody badań i skutki uszkodzeń ziarna roślin uprawnych

Stanisław Grundas

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

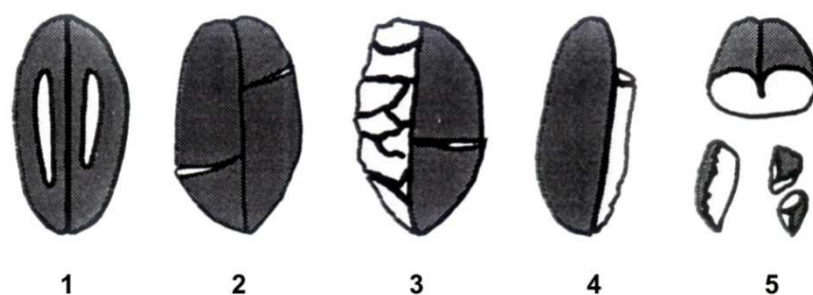
Ziarno roślin uprawnych jest surowcem o znaczeniu podstawowym dla życia człowieka. 150 gatunków roślin jest w uprawie, a tylko cztery z nich (pszenica, ryż, kukurydza i soja) dostarczają 60% światowej produkcji artykułów spożywczych. Ziarno roślin jednoliściennych (zboża) zaspokaja podstawowe potrzeby żywieniowe w zakresie węglowodanów na poziomie 70%, a ziarno roślin dwuliściennych (białkowych i oleistych) odpowiednio na poziomie 50% i 15%. Nie można tego faktu ignorować, jeśli uwzględni się 7 mld. poziom globalnej populacji, przy czym około 1/7 ludności cierpi ciągle na dotkliwy brak żywności, a zbliżona liczba paradoksalnie cierpi z powodu otyłości. Roczna, globalna produkcja ziarna zbóż osiąga poziom 700 g na osobę dziennie, jednakże światowy niedostatek żywności nie został rozwiązany z powodu trudności dystrybucyjnych, przemysłowego wykorzystania ziarna (włączając bioetanol), strat spowodowanych uszkodzeniami biotycznymi i abiotycznymi oraz wzrastającego zapotrzebowania ziarna do produkcji mięsa i ryb.

W globalnej produkcji zbóż, szacowanej na około 2,0 mld ton, pszenica stanowi około 32%, a ryż 21%, co daje łączną produkcję około 53% produkcji zbóż na świecie. Przy takim poziomie produkcji istotnego znaczenia nabiera zagadnienie uszkodzeń ziarna, które powstają na drodze od zbioru do jego przetwarzania. W zależności od stosowanych procesów technologicznych zbioru, transportu i przechowywania wielkość uszkodzeń ziarna zbóż szacuje się na poziomie od 5 do 30%. Taki poziom uszkodzeń ziarna stanowi w ogólnym bilansie surowcowym ewidentne straty, a jego użyteczność, szczególnie w przypadku uszkodzeń biotycznych (pleśnie i porażenia szkodnikami żerującymi wewnątrz ziarna) może mieć jedynie wartość opałową.

Nauka o ziarnie roślin uprawnych obejmuje zagadnienia nie tylko jego stanu fizycznego, ale i struktury na poziomie mikro i makroskopowym, a także zagadnienia fizyko-chemii związane z zachowaniem bezpiecznych dla zdrowia człowieka warunków jego pozyskiwania, składowania i przetwarzania w gotowe produkty spożywcze.

Metody rozpoznawania uszkodzeń mechanicznych

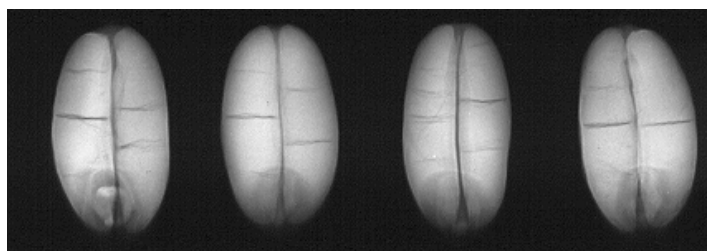
Uszkodzenia mechaniczne ziarna można najogólniej podzielić na: makrouszkodzenia i mikrouszkodzenia, zewnętrzne i wewnętrzne, a metody rozpoznawania uszkodzeń na bezpośrednie i pośrednie. Jeżeli uszkodzenia ziarniaków polegają na widocznej utracie jakichkolwiek ich części, to zalicza się je do makrouszkodzeń, jeśli natomiast naruszona zostanie naturalna ciągłość tkanek bez oddzielania ich od ziarniaka – to do mikrouszkodzeń. Uszkodzenia zewnętrzne związane są z naruszeniem ciągłości tkanek okrywowych ziarna, to znaczy – okrywy owocowo-nasiennej w grupie roślin jednoliściennych (zboża), lub okrywy nasiennej w grupie roślin dwuliściennych (białkowe i oleiste). Uszkodzenia wewnętrzne w ziarniakach zbóż obejmują naruszenie ciągłości tkanki endospermu (bielma) lub tkanek zarodka, natomiast u roślin dwuliściennych – tego rodzaju uszkodzenia dotyczą liścieni i zarodka. Przykład najczęściej spotykanych typów uszkodzeń mechanicznych spowodowanych działaniem elementów roboczych maszyn zbierających i transportujących ziarno pszenicy przedstawia rysunek 4.11.1.



Rys. 4.11.1. Niektóre typy mechanicznych uszkodzeń zewnętrznych ziarna pszenicy (obszary ciemniejsze obrazują okrywę owocowo-nasiennej ziarniaka, a jaśniejsze – odkrytą powierzchnię bielma. 1 – otarcia okrywy owocowo-nasiennej, 2 – pęknięcia sięgające w głąb bielma, 3 – zagniecenia bielma z obłuszczonej okrywą, 4 – rozłamania i ubytki, 5 – połówkowanie i rozkruszenia (Grundas i Miś 1997)

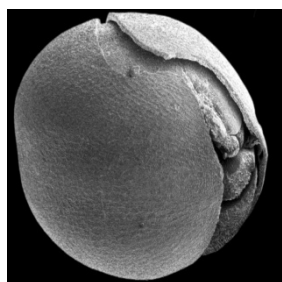
O ile makrouszkodzenia są łatwe do identyfikacji na drodze wizualnej oceny, to rozpoznawanie mikrouszkodzeń zewnętrznych może nastęrczać wiele wątpliwości, a w przypadku uszkodzeń wewnętrznych, ukrytych pod nieuszkodzoną okrywą owocowo-nasiennej ziarna roślin jednoliściennych, na przykład w ziarnie pszenicy, jest możliwe do identyfikacji na drodze detekcji rentgenowskiej. Na rysunku 4.11.2 przedstawiono obrazy ziarniaków pszenicy z charakterystycznymi pęknięciami poprzecznymi bielma, które można zidentyfikować tylko na drodze detekcji rentgenowskiej.

Konsekwencją tego typu uszkodzeń wewnętrznych może być gwałtowny wzrost liczby rozdrobionych ziarniaków w trakcie kombajnowego zbioru. Zjawisko tak zwanego „połówkowania” ziarna ma swoje głównie przyczyny w naruszeniu ciągłości struktury bielma, spowodowanej naturalnym procesem intensywnego wzrostu wilgotności ziarna dojrzałego i suchego w okresie przedzbiorowym, co często występuje w warunkach klimatycznych naszego kraju.

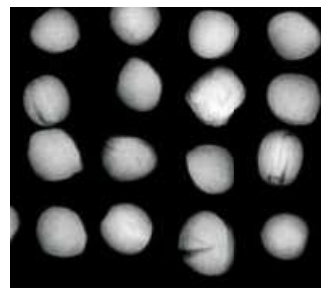


Rys. 4.11.2. Obrazy rentgenowskie ziarniaków pszenicy z charakterystycznymi pęknięciami poprzecznymi bielma (materiał własny autora)

Na rysunku 4.11.3 przedstawiono obraz z mikroskopu skaningowego ziarna rzepaku z najczęściej występującym uszkodzeniem okrywy nasiennej i liścieni, a na rysunku 4.11.4 obrazy rentgenowskie tego typu uszkodzenia.



Rys. 4.11.3. Obraz mikroskopowy pojedynczego ziarna rzepaku (Kovalyshyn i in. 2013)



Rys. 4.11.4. Obrazy rentgenowskie uszkodzonych ziaren rzepaku (Kovalyshyn i in. 2013)

Metody bezpośrednie

Metody bezpośrednie związane są z oceną wizualną stanu powierzchni badanego obiektu lub jego obrazu i zawierają w sobie znaczną dozę subiektywizmu. Przy ocenie wizualnej małych ziaren traw nasiennych stosuje się najczęściej lupę preparacyjną o powiększeniu 10-krotnym. Wyniki analizy zależą w znacznym stopniu od doświadczenia eksperymentatora, ostrości jego wzroku, stopnia zmęczenia i szeregu innych czynników. W celu uzyskania większej dokładności ana-

lize stosuje się określone modyfikacje w postaci barwienia badanego obiektu lub znaczniejszych powiększeń jego obrazu. Stosując płyn Lugola, stwierdzono zróżnicowaną dostępność barwnika do skrobi w zależności od typu struktury endospermu. W ziarniakach o strukturze typu szklatego pomimo ewidentnych pęknięć okrywy owocowo-nasiennej, barwnik ma utrudniony dostęp do skrobi, którą selektywnie zabarwia.

Dla poprawy efektywności oceny uszkodzeń mechanicznych ziarna pszenicy przy zastosowaniu barwnika Fast Green opracowano metodę kolorymetrycznej oceny uszkodzeń (Grundas 1987, Grundas i Miś 1997).

Do grupy metod bezpośrednich zalicza się również metodę detekcji rentgenowskiej ziarna. Istotą tej metody jest zróżnicowane pochłanianie miękkiego promieniowania X przez ośrodek o zróżnicowanej gęstości. Obecnie ocena wizualna obrazu rentgenowskiego tego surowca jest bardziej precyzyjna od oceny wzrokowej dzięki postępowi w zakresie metod cyfrowej analizy obrazów (Grundas i in. 1999, Grundas i Velikanov 2001). Metoda rentgenowska polega na określeniu liczby uszkodzonych ziaren oraz ich jednorodności pod względem morfotypu (typu kształtu) lub deformacji wynikających z przyczyn niedorozwoju ziarna względnie jego porażenia przez grzyby pleśniowe (Demyanchuk i in. 2013).

O ile uszkodzenia zewnętrzne, łatwe do identyfikacji na zasadzie oceny wizualnej nie nastroczają większych problemów, to uszkodzenia wewnętrzne ulokowane np. w obrębie bielma ziarniaka stanowią dość złożony problem do ich identyfikacji. Zagadnienie uszkodzeń wewnętrznych ziarna jest związane najczęściej z dwiema kategoriami czynników, które ich wywołują:

- oddziaływanie elementów roboczych maszyn i urządzeń związanych ze zbiorem surowca;
- oddziaływanie gradientu wilgotności w procesie intensywnego nawilżania suchego względnie intensywnego suszenia wilgotnego ziarna.

Te dwa czynniki oddziaływań destrukcyjnych (obciążenia mechaniczne i gradient wilgotności) prowadzą bezpośrednio do naruszenia naturalnej ciągłości struktury tkanek ziarniaków.

Druga kategoria czynników destrukcyjnych ziarna jest związana z funkcjami życiowymi ukrytego żerowania szkodników owadzych wewnątrz ziarna, np. wołka zbożowego – *Sitophilus granarius* L. (Nawrocka i in. 2010).

Początkowo wizualna analiza obrazu rentgenowskiego ziarniaka z tak zwanymi pęknięciami wewnętrznymi bielma polegała na zliczaniu tych pęknięć. Tej bezpośredniej metodzie wzrokowej analizy obrazów, a następnie nieco zautomatyzowanej na drodze opracowania komputerowego sposobu zliczania pęknięć poświęcono szereg prac (Demyanchuk i in. 2011, Grundas i in. 2002, Grundas i in. 2005, Grundas i in. 2011).

Metody pośrednie

Metody pośrednie rozpoznawania uszkodzeń ziarna roślin uprawnych można podzielić na 3 grupy:

Metody oparte na badaniu zdolności kiełkowania nasion. Stopień uszkodzenia nasion jest odnoszony do żywotności zarodka. Metoda ta, ma praktyczne znaczenie przy ocenie materiału reprodukcyjnego (nasion). Ocena wstępnej zdolności kiełkowania (w literaturze przedmiotu można spotkać określenie – energia kiełkowania) lub końcowej zdolności kiełkowania (zwane też często – siłą kiełkowania) służy jako wskaźnik jakościowy nasion, przy czym uszkodzenia mechaniczne stanowią jeden z wielu czynników wpływających na wynik końcowy oceny. Modyfikacją tej metody jest kiełkowanie nasion zbóż na podłożu zwilżonym roztworem kwasu siarkowego o bardzo niskim stężeniu 0,005-0,07%. Takie stężenie kwasu siarkowego nieco utrudnia proces kiełkowania nasion uszkodzonych, stwarzając zbliżone warunki do kiełkowania w polu. Zasadniczą wadą tych metod jest przede wszystkim duża czasochłonność wykonywanych analiz.

Metody absorpcji wody lub roztworów barwiących z wykorzystaniem ich właściwości optycznych lub fluoroscencyjnych. Poziom uszkodzeń może być określony poprzez pomiar kinetyki absorpcji wody poprzez pory. Proces absorpcji wody jest znacznie przyspieszony w przypadku pęknięć okrywy owoconasiennej ziarniaków względnie pęknięć poprzecznych bielma. Jednakże metoda ta w odniesieniu do ziarna uszkodzonego jest mało precyzyjna. Kinetyka absorpcji wody zależy nie tylko od poziomu uszkodzenia mechanicznego, lecz i od wilgotności początkowej, temperatury i przebiegu procesu rozwoju ziarna. Chowdhury i Buchele (1976), opublikowali pierwszą pracę na temat zastosowania metody kolorymetrycznej do określania uszkodzeń ziarna kukurydzy, wykorzystując w tym celu barwnik Fast Green. Istota tej metody polega na określeniu poziomu absorpcji barwnika na uszkodzonych powierzchniach ziarniaków. Szczegółowe badania w tym zakresie spowodowały, że metoda ta znalazła szerokie zastosowanie w ocenie uszkodzeń mechanicznych ziarna kukurydzy w USA. Sposób przeprowadzania pomiarów jest prosty i szybki. Czas trwania analizy pojedynczej próbki nie przekracza 5 minut.

Metoda kolorymetryczna została opatentowana w USA w roku 1976 (Patent USA 1976) i jak wynika z jej opisu, jest przeznaczona do określania uszkodzeń mechanicznych ziarna kukurydzy i pszenicy. Dotychczas brak było jednak badań w zakresie wpływu zawartości białka na cechy związane z odpornością ziarna pszenicy poddawanego obciążeniom mechanicznym, stosując tę metodę. Jest faktem, że poszczególne odmiany zbóż charakteryzują się różną przyswajalnością związków mineralnych, w tym azotowych, zawartych w glebie, co w konsekwencji odpowiedniego nawożenia prowadzi do zróżnicowania zawartości białka w ziarnie.

W pracach związanych z oceną odporności ziarna pszenicy na mechaniczne obciążenia podkreśla się znaczenie zawartości białka ogólnego w ziarnie w kształtowaniu jego odporności mechanicznej (Woźniak i in. 1991).

Przeprowadzone w Instytucie Agrofizyki PAN badania w latach 80. zeszłego wieku wykazały, że wartość współczynnika sprężystości (moduł Younga) – jako cechy odpornościowej ziarna – wzrasta wraz z zawartością białka. Porównując wyniki badań kolorymetrycznych z wynikami badań odporności mechanicznej stwierdzono, że na zróżnicowanie struktury bielma, a zatem na odporność mechaniczną ziarna pszenicy jarej, zawartość białka ma istotny wpływ. Badania kolorymetryczne przeprowadzone na ziarnie kilku odmian pszenicy jarej, o zróżnicowanej zawartości białka i strukturze szklistej bielma, przy jednakowym poziomie uszkodzeń sztucznych ziarniaków (przecinano je poprzecznie względem długości), wykazały istotny wzrost przepuszczalności testowanych roztworów. Dowodzi to, że poziom absorpcji barwnika, a tym samym i wielkości powierzchni uszkodzonych (odkrytych), ze wzrostem zawartości białka maleje. Porównawcze zastosowanie metody kolorymetrycznej i dyfuzyjnej do pomiarów uszkodzeń mechanicznych ziarna pozwoliło na odkrycie zależności pomiędzy zawartością białka ogólnego w ziarnie a poziomem absorpcji barwnika i dyfuzji gazu. Ze wzrostem zawartości białka w ziarnie pszenicy jarej prędkość dyfuzji gazu i poziom absorpcji barwnika maleje.

Christenbury i Buchele (1977) zaproponowali nową metodę pomiaru uszkodzeń mechanicznych ziarna kukurydzy wykorzystując fluorescencyjny barwnik białka. Istota tej metody polega na tym, że ziarniaki o różnym typie uszkodzeń (patrz Rys. 4.11.1 dot. typów uszkodzeń) – po zanurzeniu w cieczy zawierającej czynnik fluoryzujący – rozdrabnia się w celu uzyskania względnie jednorodnej substancji, a następnie przy użyciu systemu fotoelektrycznego określa natężenia światła fluorescencyjnego. Zastosowany barwnik fluoryzuje wówczas, gdy wiąże się chemicznie z białkiem dostępnym na odkrytych powierzchniach uszkodzonych ziaren. Tą metodą stwierdzono liniową zależność pomiędzy wzrostem fluorescencyjnego natężenia światła i poziomem uszkodzeń mechanicznych ziarna kukurydzy określonych na drodze oceny wizualnej. Jednakże, przyjmując nawet subiektywność wizualnej oceny uszkodzeń mechanicznych ziarna za dopuszczalną, na niedokładność oceny wpływać może zawartość białka w ziarnie, z którym ciecz fluoryzująca wiąże się selektywnie.

Do tej grupy metod zalicza się również metodę konduktometryczną (Grundas i in. 1987), która polega na pomiarze przewodności jonowej testowanego roztworu, zawierającego sole soku komórkowego rozpuszczone w określonej objętości dejonizowanej wody. Im wyższy jest poziom uszkodzeń mechanicznych w ziarnie, tym stężenie soli w roztworze i jego przewodność będzie wyższa. Zasadniczą wadą tej metody jest jednodobowy okres przygotowania roztworu testowego.

Metody o niewielkim znaczeniu praktycznym, lecz istotnym z poznawczego punktu widzenia. Należą tu metody reologiczne (Grundas i Horabik 1980, Hnilica i Grundas 1983) sprowadzające się w swojej istocie do pomiaru zależności pomiędzy siłą i odkształceniem badanego obiektu z uwzględnieniem czasu trwania danego procesu. Metody te nie pozwalają jednakże na wyodrębnienie różnic w poziomie uszkodzeń technologicznych z jakimi mamy do czynienia w trakcie mechanicznego zbioru i obróbki pozbiorowej materiału. Wynika to przede wszystkim z małej reprezentatywności pojedynczych ziaren pobieranych do badań odpornościowych w stosunku do poziomu uszkodzeń masy ziarna w badanej próbce.

Z kolei metody badań elastooptycznych mają istotne znaczenie jedynie teoretyczne, gdyż pozwalają na formułowanie matematycznego opisu mechanizmu powstawania uszkodzeń w obiektach roślinnych o tak wysoce złożonym kształcie jakim jest ziarniak pszenicy. Ziarniak pszenicy pod względem geometrycznym stanowi skomplikowany obiekt w kształcie zbliżonym do elipsoidy, której przekrój poprzeczny jest kardiodą. Poza tym budowa ziarniaka jest warstwowa i stopień złożoności modelu matematycznego jest coraz wyższy. W budowie anatomicznej ziarniaka pszenicy, podobnie jak i innych zbóż z rodziny traw, wyróżnia się cztery zasadnicze części: okrywę owocowo-nasienną, warstwę aleuronową, endosperm (bielmo) i zarodek.

Wymienione grupy metod badania uszkodzeń mechanicznych ziarna mają zarówno swoje wady, jak i zalety. Wybór danej metody zależy przede wszystkim od wymagań stawianych przez eksperymentatora. Dla celów praktycznej oceny wartości użytkowej materiału ziarnowego najbardziej przydatne są metody szybkie i proste, w których wpływ czynników subiektywnych na wynik końcowy oceny jest maksymalnie ograniczony. Warunek znacznego ograniczenia wpływu czynników subiektywnych na ocenę spełniają metody pośrednie, w których wynik pomiaru rejestrowany jest przez miernik przyrządu.

Przyczyny i skutki uszkodzeń ziarna

Procesowi zbioru, transportu i dalszej obróbki ziarna towarzyszy jedno z najbardziej nieuchwytnych zjawisk jakim są uszkodzenia mechaniczne. Straty ilościowe i jakościowe ziarna wynikają głównie z destrukcyjnego oddziaływania sił zewnętrznych, pochodzących od elementów roboczych maszyn biorących udział w określonym procesie technologicznym zbioru i transportu. Uszkodzenia mechaniczne – jako skutek działania czynników fizycznych o charakterze destrukcyjnym – objawiają się w postaci naruszenia naturalnej ciągłości tkanek ziarniaka. Z rolniczego punktu widzenia, jak potwierdzają liczne w tym zakresie badania, znacznie obniżają one jego wartość użytkową i konsumpcyjną. Warunkiem postępu technologicznego w produkcji ziarna roślin skrobiowych, białkowych czy

oleistych dla celów konsumpcyjnych, przemysłowych jak i reprodukcyjnych nasion jest ich wysoka jednorodność, czyli zbiór wartości takich cech fizycznych, chemicznych lub biologicznych, które są pożądane z punktu widzenia ich wartości użytkowej.

Czynnikiem destrukcyjnym może być działanie sił zewnętrznych, zarówno tych o charakterze dynamicznym (obciążenia udarowe) pochodzących od elementów roboczych maszyn w określonym procesie technologicznym zbioru i transportu jak i obciążeń quasi-statycznych w warunkach przechowywania ziarna w silosach. Obciążenia destrukcyjne mogą mieć również charakter wewnętrzny, a ich przyczyną są naprężenia wewnętrzne w ziarnie powstające w trakcie intensywnej zmiany temperatury i wilgotności. Z takimi przypadkami mamy do czynienia w okresie opóźnionego zbioru ziarna zbóż, gdy w pełni dojrzałe ziarno osiąga optymalną wilgotność 12-13%, ale względy organizacyjne lub warunki pogodowe opóźniają zbiór kombajnowy. Wówczas ziarno po osiągnięciu „optymalnej wilgotności” ponownie intensywnie się nawilża wskutek opadów przy pogodzie niżowej, względnie podczas rosy powstającej przy pogodzie wyżowej. Ten proces prowadzi najczęściej do pojawiania się pęknięć poprzecznych bielma. Krytyczny wzrost naprężeń wewnętrznych w obrębie bielma, powodujących jego uszkodzenia wewnętrzne, powstaje również podczas intensywnego procesu suszenia wilgotnego ziarna w warunkach pozbiorowych. Skutkiem tego zjawiska jest większa podatność na rozkruszanie ziarna, co prowadzi do ewidentnych strat ilościowych. Destrukcja, jako efekt niepożądanego działania wymienionych czynników uzewnętrznia się w postaci naruszenia naturalnej ciągłości określonych tkanek ziarniaka. W praktyce, działania profilaktyczne mające na celu zapobieganie powstawaniu uszkodzeń mechanicznych – sprowadzają się do ustalenia granicznej wartości tego czynnika, który determinuje określone skutki fizyczne i biologiczne, stosownie do przyjętej technologii uprawy (siew), zbioru, transportu i przechowywania ziarna. Mówiąc o destrukcji w wyniku niepożądanego oddziaływania obciążeń mechanicznych, należy podkreślić, że materiały pochodzenia roślinnego poddawane są też pożądanemu działaniu czynników destrukcyjnych. Tak się dzieje w procesach przetwarzania surowców roślinnych (ziarna), który ma na celu pozyskanie określonego produktu, np. mąki z ziarna pszenicy. Z tego względu tylko na drodze świadomego stosowania czynników destrukcyjnych uzyskujemy produkt o pożądanym stopniu rozdrobnienia dla celów zarówno żywieniowych jak i przemysłowych. Procesy destrukcji struktury obiektów pochodzenia roślinnego mają pożądane skutki praktyczne w porównaniu do destrukcji materiałów jednorodnych (konstrukcyjnych), dla których powstała cała teoria wytrzymałości pozwalająca na predykcje doraźnych obciążeń konstrukcji, celem zapobieżenia ich destrukcji. Na marginesie, warto odnotować, że należy z dużą ostrożnością odnosić się do adaptacji teorii wytrzymałościowych materiałów kon-

strukcyjnych, których celem jest przenoszenie obciążeń, gdzie w materiałach biologicznych destrukcja jest celem samym w sobie, ponieważ prowadzi do pozyskania pożądanego stopnia rozdrobnienia surowca.

Wśród szeregu metod badania uszkodzeń ziarna i nasion roślin uprawnych na czoło wysuwa się metoda rentgenograficzna. Rentgenograficzna ocena stanu fizycznego ziarniaka pozwala na ujawnienie wewnętrznych uszkodzeń objawiających się w postaci charakterystycznych pęknięć poprzecznych bielma. Tego typu uszkodzenia powstają w wyniku intensywnego nawilżania suchego ziarna o wilgotności w przedziale 12-13%, bezpośrednio po osiągnięciu tak zwanej dojrzałości technologicznej w warunkach polowych. Należy zaznaczyć, że w warunkach przedzbiorowych zbóż istnieją możliwości ponownego nawilżenia suchego ziarna wskutek albo opadów atmosferycznych albo zjawiska rosy. Kilkogodzinne nawilżanie suchego ziarna w warunkach rosy jest wystarczającym okresem, aby doszło do wzrostu gradientu wilgotności, a w ślad za nim powstania krytycznych naprężeń wewnętrznych tkanki bielma, które tworzą charakterystyczne pęknięcia poprzeczne w tej tkance. Podobny efekt można uzyskać podczas nawilżania suchego ziarna o podobnej wilgotności w warunkach laboratoryjnych. Ziarniaki, które uległy takiemu stresowi w warunkach polowych wykazują mniejszą odporność mechaniczną podczas zbioru kombajnowego, co objawia się zwykle tak zwanym pogłówkowaniem ziarna i stratami ilościowymi surowca.

Podczas sympozjum Amerykańskiego Stowarzyszenia Nauki o Zbożu i Technologii (AACC), które odbyło się w 2001 roku w USA, stwierdzono, że szybkie i niedestrukcyjne metody oceny wartości użytkowej ziarna, jako surowca zapewniającego zachowanie walorów zdrowotnych i funkcjonalnych artykułów spożywczych, będą eliminować dotychczasowe potrzeby identyfikacji odmian i ich klasyfikacji. W świetle przewidywanego rozwoju w badaniach genetycznych ta prognoza wydaje się być wysoce prawdopodobna i można przyjąć, że dalszy postęp technologiczny i biologiczny będzie ściśle związany z tymi badaniami. W świetle najnowszych badań rentgenograficznych (Demyanchuk i in. 2013) metoda ta stwarza szanse na wprowadzenie istotnego postępu technologicznego i biologicznego w światowej produkcji ziarna zbóż.

PIŚMIENNICTWO

- Chowdhury M.H., Buchele W.F., 1976. Colorimetric determination of grain damage. *Trans. of the ASAE*, 19(5), 807-808 and 811.
- Christenbury G.D., Buchela W.F., 1977. Photoelectric system for measuring mechanical damage of corn. *Trans. of the ASAE*, 20(5), 972-975.
- Demyanchuk A.M., Velikanov L., Arhipov M., Grundas S., 2011. X-ray method to evaluate grain quality. *Encyclopedia of Agrophysics*. Published by Springer (Ed. J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec), 1005-1009.

- Demyanchuk A.M., Grundas S., Velikanov L.P., 2013. Identification of wheat morphotype and variety based on X-ray images of kernels. *Advances in Agrophysical Research*. 398 pages. DOI: 10.5772/3341. Publisher: Intech (Ed. S. Grundas, and A. Stępniewski). ISBN 978-953-51-1184-9
- Grundas S., 1987. Niektóre aspekty podatności ziarna pszenicy (*Triticum aestivum* L.) na uszkodzenia mechaniczne. *Ossolineum. Problemy Agrofizyki*, 54. ISBN 83-04-02865-4.
- Grundas S., Grodek J., Pecen J., 2005. X-ray method for prediction of wheat grain compliance to endosperm damage. Review of current problems in agrophysics. Ed. by G. Józefaciuk, C. Sławiński and R.T. Walczak. Institute of Agrophysics PAS, 161-164.
- Grundas S., Geodecki M., Velikanov L., 2002. Zastosowanie metody rentgenograficznej w badaniach materiałów roślinnych. *Acta Agrophysica*, 63, 39-47.
- Grundas S., Horabik J., 1980. Wpływ wilgotności na lepko-sprężyste właściwości zboża. *Biofizyka (prace doświadczalne)*. Wyd. WSR-P Siedlce, 299-316.
- Grundas S., Miś A., 1997. O możliwości wykorzystania testera uszkodzeń mechanicznych ziarna w ocenie jakościowej pszenicy. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 4, 3-7.
- Grundas S., Nawrocka A., Pecen J., 2011. Grain physics. *Encyclopedia of Agrophysics*, Ed. by Gliński J., Horabik J., Lipiec J. Publisher by Springer. 323-327. ISBN 978-90-481-3584-4.
- Grundas S., Styk B., Kustermann M., Dürrel-Ibrahim D., 1987. A comparative study of mechanical damage to winter wheat grain using colorimetric and conductometric methods. 4. *Tagung Agrophysik*. Rostock, DDR. 30.03-03.04, 146-153.
- Grundas S., Velikanov L., 2001. Identyfikacja uszkodzeń mechanicznych ziarna zbóż metodą rentgenowską. *Inżynieria Rolnicza*, 2(22), 77-83.
- Grundas S., Velikanov L., Archipov M., 1999. Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-ray method. *International Agrophysics*, 13, 355-361.
- Hnilica P., Grundas S., 1983. Mereni dynamickeho Youngova modulu endospermu obilin pulsni ultrazvukovou metodu. *Zemedelska Technika*, 29, 65-80.
- Kovalyshyn S.J., Shvets O.P., Grundas S., and Tys J., 2013. Use of the electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds. *Int. Agrophysics*, 27, 419-424.
- Nawrocka A., Grundas S., Grodek J., 2010. Losses caused by granary weevil larva in wheat grain using digital analysis of X-ray image. *Int. Agrophysics*, 24(1), 63-68.
- United States Patent, 1976. Method of measuring mechanical damage to grain. Nr. 4.020.682.
- Woźniak W., Grundas S., Niewczas J., 1991. Zastosowanie metody kolorymetrycznej i rentgenograficznej w badaniach uszkodzeń mechanicznych ziarna pszenicy. Wyd.: *ANNALES UMCS*, 1991/1992, vol. XLVI/XLVII, 47, sectio AAA (Fizyka), 469-475.

5. Summary

AGROPHYSICS – PROCESSES, PROPERTIES, METHODS

Agriculture is a domain of human being activity (tillage) to give him food which comes from field production of biomass.

At the beginning, with the small human population, agriculture based on the use of natural conditions (soils, climate) to receive vital agricultural products. With the increase population appeared a need to use achievements of exact sciences such as chemistry and biology to increase agricultural production. New disciplines: agrochemistry and agrobiolgy came into being.

Full use of mentioned sciences became limited by requirements of environment protection hazarded by excessive soil chemization, erosion and compaction. It was necessary also to improve and decrease losses of plant products, to develop production and processing of biological raw materials for consumption, promote progress of agricultural mechanization and modern technologies based om monitoring physical processes.

So, pay attention was focused to other exact science – physics. This caused creation of a new discipline – agrophysics, which is situated on the boundary of physics and biology and fundamental (theoretical) and applied sciences.

As an institution, agrophysics appeared in time when the Institute of Agrophysics in St. Petersburg was created in 1933. Its dynamic development was since 1968 when the Institute of Agrophysics of the Polish Academy of Sciences in Lublin has been established. On the basis of this Institute new specialist journals were created: *Problemy Agrofizyki* and *Acta Agrophysica* edited in Polish, *International Agrophysics* (in English) and a great *Encyclopedia of Agrophysics* (more than 1 000 pages) published by Springer. The review article *Agrophysics – physics in agriculture and environment* by J. Gliński, J. Horabik and J. Lipiec was published in *Soil Science Annual*, 2013, 64, 2, 67-80.

Subject “agrophysics” or “Physics with the elements of agrophysics” is lectured in universities and it is supported by other books connected with agrophysics by Prof. Stanisław Przestalski, which contains wide material on basis physics.

However, it of physical laws and modern measuring methods in agriculture and natural environment. This gap try fulfill presented book elaborated by 36 authors including 17 from the Institute of Agrophysics in Lublin and 19 lecturers of agrophysics from universities in Kraków, Poznan, Szczecin, Wrocław and Warszawa.

The authors present chosen topics on:

- Definitions and scope of agrophysical research concerning various agricultural objects, methods their investigation and evaluation;
- Physical processes in soil environment and plant materials which affect their quality;
- Modelling agrophysical processes and properties.

This book is devoted to lecturers and students of high schools who realize program of agrophysics which will be enriched with practical elements resulted from the knowledge of agrophysics, and to practitioners of agriculture and natural environment protection.

Keywords: agrophysics, application, agriculture, natural environment

ISBN 978-83-89969-34-7