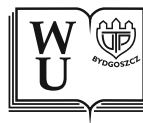


Lech Gałęzowski

**WILGOTNOŚĆ GLEBY
METODYCZNY ASPEKT
BADAŃ ROLNICZYCH**



Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy

Recenzent

dr hab. Artur Nosalewicz, prof. IA PAN

Redaktor działowy

dr hab. inż. Joanna Lemanowicz, prof. uczelni

Opracowanie redakcyjne i techniczne

mgr Aleksandra Górka, mgr inż. Daniel Morzyński

Projekt okładki

dr inż. Lech Gałęzewski

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2020

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych,
kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody
posiadacza praw autorskich.

ISBN 978-83-66530-09-6

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Redaktor Naczelny
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. Sucha 9B, 85-796 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.wu.utp.edu.pl>

Wyd. I. Ark. aut. 7,3. Ark. druk. 7,8.
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Sucha 9B

Spis treści

1. WSTĘP	5
2. METODY POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY W ŚWIETLE LITERATURY	7
2.1. WODA W GLEBIE	7
2.2. METODY OZNACZANIA ZAWARTOŚCI WODY W GLEBIE	9
2.2.1. Metody punktowe	12
2.2.1.1. Metoda grawimetryczna	12
2.2.1.2. Metody oparte na właściwościach dielektrycznych gleby	13
2.2.1.3. Metody z wykorzystaniem promieniowania jonizującego	15
2.2.1.4. Metody opornościowe	17
2.2.1.5. Metody termiczne	18
2.2.1.6. Potencjał matrycowy wody w glebie	19
2.2.2. Metody przestrzenne	21
2.2.2.1. Kontaktowe	21
2.2.2.1.1. Metoda <i>stop and go</i>	22
2.2.2.1.2. Metoda pomiarów mobilnych	22
2.2.2.2. Teledetekcyjne	23
2.2.2.2.1. Metody georadarowe – GPR	23
2.2.2.2.2. Metody mikrofalowe – MWR	25
2.2.2.2.3. Reflektometria GNSS (GSNN-R)	28
2.2.2.2.4. Detekcja neutronów kosmogenicznych – CRNP	29
2.2.2.2.5. Monitoring promieniowania gamma	31
2.2.3. Metoda organoleptyczna	31
2.3. SONDY I SYSTEMY POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY W PRAKTYCE ROLNICZEJ I W DOŚWIADCZALNICTWIE	32
2.3.1. Funkcjonalność sond	34
2.3.2. Sieciowe systemy monitoringu	37
2.3.3. Regulacja wilgotności podłoża w doświadczeniach wazonowych	38

3. PRACE EKSPERYMENTALNO-PROJEKTOWE	43
3.1. WODA ZAWARTA W KORZENIACH ROŚLIN A WILGOTNOŚĆ GLEBY.....	43
3.1.1. Metodyka pomiaru wilgotności gleby z uwzględnieniem wody zawartej w korzeniach roślin.....	44
3.1.2. Wilgotność gleby z korzeniami roślin vs wilgotność gleby bez korzeni roślin – omówienie i dyskusja wyników.....	47
3.1.3. Wilgotność gleby z korzeniami roślin vs wilgotność gleby bez korzeni roślin – wnioski.....	53
3.2. REGULACJA WILGOTNOŚCI PODŁOŻA W DOŚWIADCZENIACH WAZONOWYCH – ROZWIĄZANIA WŁASNE.....	54
3.2.1. Możliwość wykorzystania nawadniania kropłowego w doświadczalnictwie wazonowym.....	54
3.2.1.1. Dobór emiterów.....	54
3.2.1.2. Ocena zmienności wydatku wody przez emitery.....	57
3.2.1.2.1. Metodyka badań.....	57
3.2.1.2.2. Omówienie i dyskusja wyników.....	60
3.2.1.3. Podsumowanie.....	65
3.2.2. System sterowania.....	66
3.2.3. Studium wariantów.....	72
3.2.3.1. Założenia ogólne doświadczeń dla wariantów.....	72
3.2.3.2. Obiekty doświadczalne.....	74
3.2.3.3. Rozwiązania techniczne systemów nawadniających.....	76
3.2.3.4. Analiza zmienności aplikacji wody.....	84
3.2.3.5. Wnioski.....	91
4. PODSUMOWANIE	92
BIBLIOGRAFIA	93
Spis rysunków, tabel i fotografii	118
Streszczenie	122
Summary	124

1. WSTĘP

Rolnicza produkcja roślinna jest bezpośrednio i pośrednio silnie zależna od warunków wodnych w środowisku przyrodniczym. Zawartość wody w glebie decyduje praktycznie o wszystkich jej właściwościach fizycznych, biochemicznych i o mikrobiologicznej aktywności, ale przede wszystkim o dostępności wody dla roślin [Skoop i in. 1990, D'Odorico i in. 2003, Turcu i in. 2005]. Woda jako niezbędny składnik wszystkich organizmów żywych bezpośrednio determinuje fizjologię roślin, a więc i efektywność całego agroekosystemu. Czynniki wodny jest tak dalece zmienny w czasie i w przestrzeni produkcyjnej, a jednocześnie ma tak znaczący wpływ na produkcję żywności, że powinien być monitorowany w skali czasu i przestrzeni [Letey 1985]. Tylko pełna wiedza o dynamicznej i przestrzennej zmienności wilgotności i zasobności w składniki pokarmowe gleby pozwala na realną optymalizację produkcji roślinnej.

Od kilku dziesięcioleci notuje się dynamiczny rozwój technik pomiarowych, a uzyskiwane wyniki mogą być rejestrowane i dostępne dla użytkownika na bieżąco [Chandler i in. 2017]. Pomimo to obecnie monitoring warunków wodnych, w skali pola uprawnego lub gospodarstwa rolnego, jest kosztowny i trudny do zastosowania, więc nie ma praktycznego znaczenia. Monitoring taki oparty jest na licznych pomiarach punktowych albo na pomiarach teledetekcyjnych obejmujących duże jednostki przestrzenne [Western i in. 2002, Robinson i in. 2008]. Zrealizowanie pomiarów punktowych opracowanych dla zastosowań w rolnictwie w celu zrozumienia dynamiki wody w glebie w skali pola [Topp i Ferré 2002], wymaga rozbudowanej sieci sond odwzorowującej zmienność glebową. W przypadku satelitarnych pomiarów telemetrycznych dane w tym zakresie dla producentów rolnych cechują się wciąż zbyt małą rozdzielczością i zbyt długim okresem aktualizacji oraz brakiem możliwości odniesienia do pomiarów referencyjnych [Kerr i in. 2010, Peng i in. 2017]. Metody przestrzenne pomiaru wilgotności gleby dające wyniki o właściwej dla produkcji roślinnej rozdzielczości nie mogą być stosowane w trakcie wegetacji albo są zbyt pracochłonne, aby mogły mieć powszechne zastosowanie praktyczne.

W światowej literaturze znajdują się nieliczne artykuły naukowe zawierające przegląd technik pomiaru wilgotności gleby [Robinson i in. 2008, Bittelli 2010, Vereecken i in. 2014], a w literaturze krajowej brak jest szerszych opracowań w tym zakresie. Stanowiło to inspirację do usystematyzowania wiedzy dotyczącej zarówno metod pomiaru wilgotności gleby, jak i możliwości ich zastosowania w praktyce rolniczej i w doświadczałnictwie, co jest pierwszym celem niniejszego opracowania. Potrzebę powstania takiej publikacji uzasadnia także dynamiczny rozwój metod pomiarowych i ich znaczenie dla poznania wilgotności gleby jako ważnego elementu agroekosystemów. Ważna ponadto jest znajomość poszczególnych metod pomiarowych pod względem ich aplikacji do konkretnych potrzeb. Użytkownicy urządzeń lub systemów pomiarowych

powinni być zorientowani w kwestiach dokładności i selektywności wybranych przez nich metod, aby uniknąć późniejszych błędów interpretacji wyników.

W monografii wykazano także, jakie znaczenie mają części podziemne roślin dla wyników pomiaru wilgotności gleby (cel drugi). Sprawdzano hipotezę zakładającą, że woda zawarta w korzeniach żywych roślin może istotnie zmieniać wyniki pomiarów wilgotności gleby i w przypadku niektórych metod powodować nieporównywalność wyników. Gdy gleba jest pozbawiona organizmów żywych, jej wilgotność i poszczególne formy wody glebowej są precyzyjnie zdefiniowane. Gdy natomiast w glebie występują organizmy żywe, aktywnie utrzymujące właściwy dla siebie poziom uwodnienia, wynik pomiaru wilgotności takiej gleby wyraża łącznie zawartość wody glebowej i wody znajdującej się wewnątrz organizmów glebowych.

W agrofizjologicznych badaniach dotyczących gospodarki wodnej roślin uprawnych lub ich reakcji na różne czynniki środowiskowe często wykorzystuje się doświadczenia wazonowe w halach wegetacyjnych. Największe trudności w prowadzeniu takich doświadczeń to regulowanie i/lub utrzymanie zakładanej wilgotności podłoża. Uwzględniając obecny stan wiedzy i technik pomiaru wilgotności gleby oraz techniczne możliwości jej regulacji, podjęto zadanie zaprojektowania alternatywnych systemów automatycznego nawadniania wazonów cechującego się wystarczającą dla celów doświadczalnych precyzją i dokładnością. Opracowanie takich rozwiązań to trzeci cel monografii.

2. METODY POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY W ŚWIETLE LITERATURY

2.1. WODA W GLEBIE

Nienasycona wodą gleba jest układem trójfazowym, którego fazę ciekłą stanowi roztwór glebowy [Guo i in. 2019]. Podstawowym składnikiem przedmiotowego roztworu jest woda. W temperaturze powyżej 0°C i ciśnieniu normalnym woda w glebie występuje w postaci gazowej, tj. pary wodnej, oraz ciekłej jako woda związana (higroskopijna), kapilarna i woda wolna [Cybulak i in. 2016]. Woda kapilarna i wolna w glebie może występować również w fazie stałej, a punkt zamarzania w znacznej mierze zależy od stężenia roztworu glebowego i wielkości kapilar [Wu i in. 2019].

Woda w stanie gazowym stanowi składnik powietrza glebowego i pozostaje w równowadze dynamicznej z fazą ciekłą gleby (parowanie i kondensacja) i fazą stałą (adsorpcja). Jako składnik powietrza glebowego para wodna zajmuje wolne przestrzenie glebowe i ulega ciągłej wymianie z powietrzem atmosferycznym na zasadzie gradientu jej prężności. Ruch pary wodnej jest warunkowany różnicą jej prężności w stykających się przestrzeniach glebowych, ruch ten jest również konsekwencją gradientu termicznego. Związek między względną wilgotnością lub względnym ciśnieniem pary wodnej a zawartością wody w glebie jest opisywany przez izotermy adsorpcji [Amer 2009, 2015, Schneider i Goss 2012]. Izotermy adsorpcji pozwalają również na oszacowanie współczynnika higroskopijności gleby, a tym samym – zawartości wody higroskopijnej [Chen i in. 2013].

Woda higroskopijna stanowi cienką warstwę o grubości rzędu 28 nm otaczającą mineralne frakcje gleby. Siły van der Waalsa i hydratacja kationów wymiennych wiążą cząsteczki wody z taką siłą, że ta postać wody pozostaje niedostępna dla korzeni roślin. Woda ta cechuje się większą gęstością niż pozostałe formy wody, a punkt zamarzania jest tak niski, że w warunkach naturalnych nie przechodzi do stanu stałego. Woda higroskopijna ma jednak znaczenie w kształtowaniu spistości gleby odpowiedzialnej za jej strukturę. Wzrost zawartości jonów jednowartościowych zwiększa ilość wody higroskopijnej i zmniejsza spistość gleby. Jony dwuwartościowe wapnia i magnezu zmniejszają ilość wody higroskopijnej, a tym samym – zwiększając spistość gleby i wodoodporność agregatów glebowych, poprawiając jej strukturę [Shah i Singh 2006, Suwara 2010, Parakash i in. 2014].

Zawartość pozostałych form wody, tj. wody kapilarnej i wolnej, zależy w znacznym stopniu od struktury gleby, im jest ona bardziej porowata, tym gleba ma większe zdolności retencyjne. Porowatość gleby to stosunek objętości, jaką zajmują wolne przestrzenie, do całkowitej jej objętości. Wolne przestrzenie to trójwymiarowa sieć złożona z porów macierzystych (wewnątrzagregatowe

i międzyziarnowe) i strukturalnych (międzyagregatowe, mikrospeknięcia i szczeliny oraz kanaliki zoogeniczne) [Paluszek 2011]. Na granicy faz: stałej i ciekłej w przestrzeniach glebowych o średnicy równoważnej mniejszej niż 20 μm występują siły kapilarne. Wielkość tych sił określanych jako ciśnienie kapilarne zależy od średnicy kapilar i napięcia powierzchniowego roztworu glebowego; im kapilary są mniejsze, tym siły te – większe. W przypadku mikroporów o średnicy poniżej 0,2 μm siła wiążąca wodę ze ściankami kapilar jest większa od potencjału wody korzeni większości gatunków roślin. Woda mikrokapilarna jest zatem dla roślin na ogół niedostępna, zależy to jednak od gatunku rośliny i jej stanu rozwoju oraz od rodzaju gleby i warunków klimatycznych. Dopiero woda zawarta w przestrzeniach większych niż 0,2 μm jest dostępna dla roślin. W przestrzeniach glebowych większych niż 20 μm siły grawitacyjne są większe niż kapilarne i zawarta w nich woda (woda wolna) odcieka w głąb profilu glebowego [Paluszek 2011, Silva i in. 2014].

Określenie ilości wody dostępnej dla roślin w glebie jest szacunkowe i umowne. Praktycznie każda roślina w zależności od jej aktualnego stanu fizjologicznego i warunków pogodowych ma zróżnicowane zdolności pobierania wody z gleby. Również w zależności od wielu czynników ta sama gleba ma bardzo różne zdolności zatrzymywania, czyli retencji wody [Romano i Santini 2002]. Veihmeyer i Hendrickson [1927, 1931, 1949] zdefiniowali wodę dostępną dla roślin i opracowali metodykę jej oznaczania. Woda dostępna dla roślin (*plant-Available Water Capacity* – AWC) nazywana też retencją użyteczną jest to różnica między maksymalną a minimalną połową pojemnością wodną (*Field Capacity* – FC). Minimalna pojemność połowa to zawartość wody w glebie odpowiadająca punktowi trwałego wędnięcia (*Permanent Wilting Point* – PWP), przy której rośliny nie odzyskują turgoru nawet w warunkach dużej wilgotności powietrza. Maksymalna FC jest to retencja połowa, czyli całkowita ilość wody zatrzymanej w glebie po odpływie wody wolnej (grawitacyjnej). W zależności od metody przyjętej do oceny FC i PWP [Scanlon 2002] można otrzymać różne wyniki AWP dla tego samego przypadku. Trzeba jednak wziąć jeszcze pod uwagę, że rośliny mogą korzystać z wody wolnej (grawitacyjnej) utrzymującej się po opadach aż do momentu, gdy nie infiltrowała ona poza zasięg systemu korzeniowego, a czas ten wynika z przewodnictwa hydraulicznego gleby i dynamiki jej absorpcji przez korzenie oraz z parowania z powierzchni gleby. Niezależnie jednak od metodyki oznaczeń retencja wody dostępnej dla roślin i jej przewodnictwo to najważniejsze właściwości gleby określające jej właściwości wodne i przydatność do produkcji roślinnej [Kutilek 2004].

Zawartość wody w glebie można odnosić do masy gleby lub jej objętości, uzyskując w ten sposób parametr, jakim jest wilgotność. Wilgotność wagowa to stosunek masy wody zatrzymanej w glebie do masy fazy stałej gleby, wyrażany w procentach wagowych. Analogicznie stosunek objętości wody w glebie do objętości próbki gleby wyrażony w procentach jest określany jako wilgotność objętościowa [Scanlon 2002]. Ilość wody zawartej w próbce odnosi się do różnicy masy próbki wyjściowej i masy próbki po wysuszeniu w 105°C, a więc

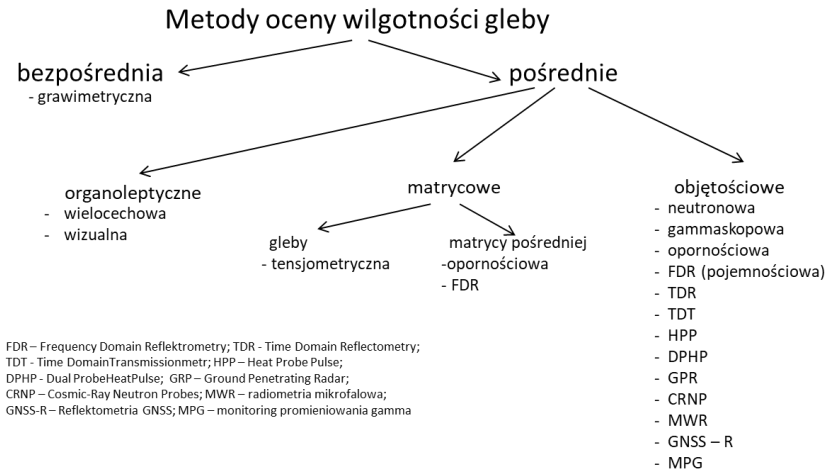
pozbawionej nawet wody higroskopijnej dlatego PWP dla każdego utworu glebowego jest osiągana przy innej wilgotności. Stąd wilgotność gleby mierzona w ten sposób nie odzwierciedla ilości wody dostępnej dla roślin. O ile pojęcia FC i PWP przy określonej metodyce oznaczeń można uznać za wartości stałe dla danej próbki gleby, to wilgotność aktualna, czyli ilość wody zawartej w glebie w danej chwili, jest wielkością zmienną. Zmiany te wynikają z szeregu czynników, między innymi z rozkładu opadów atmosferycznych, stosowanego nawadniania, transpiracji i wyparowywania wody z powierzchni gleby, zabiegów agrotechnicznych [Givi i in. 2004]. Wilgotność gleby jako parametr obrazujący ilość zawartej w niej wody jest łatwa w interpretacji – tak prezentowane są odczyty większości przyrządów pomiarowych. Problem jednak polega na tym, że poszczególne przyrządy pomiarowe są różnie skalibrowane i w tej samej próbce gleby mogą wskazywać różne wartości. Trudno również jest dokonywać porównań wyników uzyskanych z wykorzystaniem zróżnicowanych metod z różnych regionów świata. Mimo tych trudności obserwacje wilgotności gleby dzięki odpowiednim modelom są ujednoczniane i zbierane we wspólnej bazie danych (ISMN) [Seneviratne i in. 2010, Dorigo i in. 2011]. Nie zawsze jest jednak możliwe ujednocznienie wyników ze względu na różną selektywność poszczególnych przyrządów pomiarowych względem tekstury, konduktywności czy temperatury gleby.

Innym sposobem wyrażenia dostępności wody dla roślin jest określanie siły, z jaką woda wiązana jest przez glebę, którą definiuje się jako siłę ssącą lub potencjał wody glebowej. Przy pełnym nasyceniu gleby wodą siła ta ma wartość zerową, w miarę jej ubywania przyjmuje wartości ujemne wyrażane w jednostkach ciśnienia. Siła ssąca wyrażana jest jako pF, czyli logarytm dziesiętny wysokości (cm) słupa wody równoważącego ciśnienie, z jakim woda jest wiązana w glebie. Zależność pomiędzy wilgotnością gleby a wartością ciśnienia jest obrazowana przez krzywą sorpcji wody (krzywa pF). Przy maksymalnej FC potencjał wody glebowej przyjmuje wartość -15,5 kPa, co odpowiada wartości pF 2,2. Przy PWP wartość ta wynosi -1554 kPa, tj. pF 4,2 [Walczak i in. 2002].

2.2. METODY OZNACZANIA ZAWARTOŚCI WODY W GLEBIE

Oznaczanie zawartości wody w glebie może być wykonywane według różnej metodyki i z użyciem różnych technik pomiarowych, stosownie do tego, jakiemu celowi ma służyć. Wyróżnia się metody bezpośrednie – określające faktyczną ilość wody przez jej odparowanie z próbki lub pośrednie – polegające na pomiarze wybranych specyficznych właściwości wody w glebie (rys. 1). Zawartość wody w glebie prezentowana jest jako wilgotność objętościowa, wagowa lub jako potencjał matrycowy. Potencjał matrycowy wyrażany jest w jednostkach podciśnienia [Pa]. Większość przyrządów i metod pomiarowych jako wynik zawartości wody w glebie podaje wilgotność objętościową. Z tego powodu w pracy określono je terminem metod objętościowych. Wśród metod

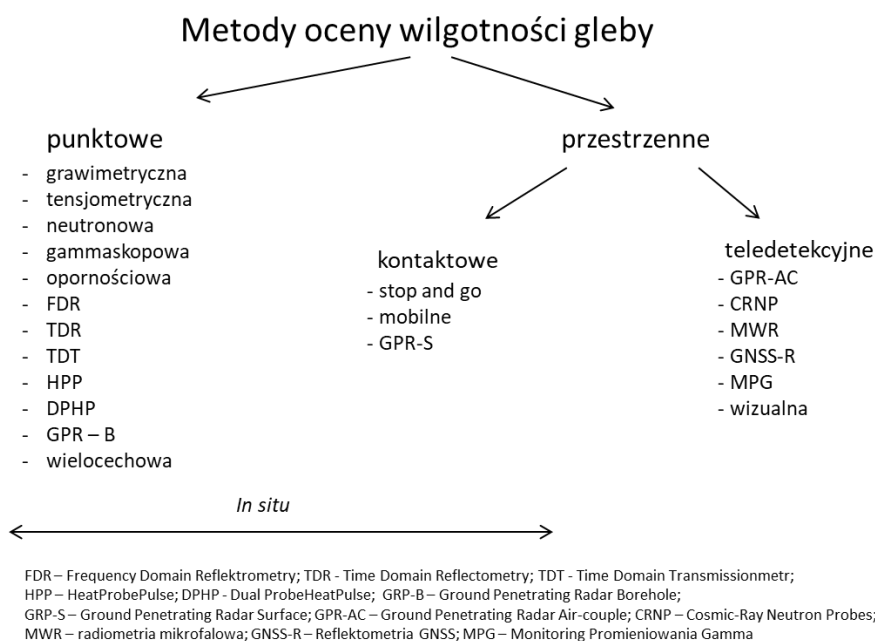
pośrednich matrycowych wyróżniono również metody matrycy pośredniej. Metody te wykorzystują dwa zjawiska fizyczne, tj. równowagę hydrauliczną gleby z matrycą pośrednią i metodę pomiaru wilgotności matrycy pośredniej (opornościową lub FDR). Nadrzędnym jednak zjawiskiem jest zachowanie równowagi hydraulicznej, stąd klasyfikacja tej metody do metod matrycowych, pomimo iż wynik pomiaru prezentowany jest w zależności od rozwiązania konkretnego urządzenia jako wartość podciśnienia lub wilgotność objętościowa. W opracowaniu opisano również metodę organoleptyczną. Nie jest to właściwie metoda pomiaru wilgotności gleby, a jedynie metoda jej szacowania, stąd opisano ją w oddzielnym rozdziale.



Rys. 1. Podział metod pomiaru wilgotności gleby ze względu na fizyczne właściwości metody (opracowanie własne)

Pierwotnie miarodajne metody oznaczania wilgotności ograniczały się do punktów pomiarowych obejmujących niewielką objętość gleby lub podłoża. Sklasyfikowano je jako metody punktowe (rys. 2). Obecnie techniki pomiarów punktowych stanowią grupę najliczniejszą. Stosunkowo niedawno pojawiły się możliwości mapowania zawartości wody w glebie dla większych arealów. Sklasyfikowano je jako metody przestrzenne obrazujące omawiany parametr w postaci dwu- i/lub trójwymiarowych map jego rozkładu. Wszystkie metody punktowe i przestrzenne kontaktowe wymagają pobierania próbek lub pomiarów w terenie *in situ*. Obecnie dostępne są techniki teledetekcyjne niewymagające bezpośredniego kontaktu elementów pomiarowych z glebą. Za pomocą tych technik dokonuje się pomiarów z wykorzystaniem detektorów instalowanych na masztach, pojazdach z wysięgnikami, bezzałogowych statkach powietrznych, samolotach, balonach czy satelitach. Trudna do jednoznacznego sklasyfikowania jest metoda wykorzystująca georadar GPR (Ground Penetrating Radar), gdyż jej przyporządkowanie zależy od techniki alokacji względem siebie nadaj-

nika i odbiornika. Przeszczanie radaru w odwiercie lub odwiertach (GPR – B) to w zasadzie metoda punktowa, ale – w przeciwieństwie do innych metod punktowych – obejmuje bardzo dużą objętość gleby między nadajnikiem a odbiornikiem. Inna technika GPC wymaga przesuwania anten po powierzchni gleby (GPR – S), co klasyfikuje ją do metod przestrzennych kontaktowych, a jeszcze inna – nie wymaga bezpośredniego kontaktu anten z glebą – teledetekcja (GPR – AC). Wszystkie metody GPC opisano jednak w rozdziale metod teledetekcyjnych, gdyż urządzenia emitują impulsy EM, przenikając dużą objętość gleby, a nie tylko niewielkie punkty wzdłuż elementów roboczych typowych sond punktowych.



Rys. 2. Podział metod pomiaru wilgotności gleby ze względu na przestrzenne właściwości metody (opracowanie własne)

W prezentowanym opracowaniu nie ujęto wszystkich metod pomiaru wilgotności gleby, np. grawitacyjnej [Naujoks i in. 2008, Pfeffer i in. 2013], metody wykorzystującej powierzchniowe fale o niskiej częstotliwości [Kiseleva i in. 2014, Yi i Astin 2015] czy innych ze względu na niewielką bazę literaturową w tym zakresie i ich koncepcyjny charakter. Pomiary takie praktycznie nie wyszły poza sferę badań nad samą koncepcją, ale przede wszystkim mają bardzo ograniczone możliwości praktycznego zastosowania tak w sferze produkcji rolniczej, jak i doświadczalnictwa rolniczego. Ze względu na jeszcze bardziej koncepcyjny niż praktyczny charakter pominięto również metody wykorzystu-

jące światłowody, tj. AHFO (*Active Heated Fiber Optics*) i DTS (*Distributed Temperature Sensing*). Oba sposoby pomiaru dają jednak możliwości mapowania wilgotności gleby w skali pola w satysfakcjonującej dla praktyki rolniczej rozdzielczości [Sayde i in. 2010, Ciocca i in. 2012, Gil-Rodrigues i in. 2013, Gamage i in. 2018]. Dzięki dynamicznemu rozwojowi wiedzy zwłaszcza na stykach różnych dyscyplin pojawiają się nowe sposoby pomiaru wilgotności gleby, które poszerzają metodologię badań tej cechy gleb.

2.2.1. Metody punktowe

2.2.1.1. Metoda grawimetryczna

Metoda grawimetryczna nazywana również suszarkowo-wagową jest najstarszą metodą oznaczania zawartości wody w glebie. Pobrane z pola w cylindrach i zabezpieczone przed parowaniem próbki gleby o nienaruszonej strukturze są ważone i suszone w temperaturze 105°C do ustabilizowania się masy. Gleby organiczne suszy się w temperaturze niższej, tj. 70°C, ze względu na zbyt intensywne utlenianie materii organicznej w wyższej temperaturze, co jest przyczyną niekontrolowanego ubytku masy. Jest to więc metoda punktowa, a oznaczeń nie można wykonać bezpośrednio w miejscu pobrania. Zawartość wody obliczana jest z różnicy masy początkowej i końcowej po odjęciu masy cylindra. Cylindry mają określoną objętość, dlatego wyniki można przeliczyć na wilgotność wagową lub objętościową [ASTM 1979, ISO 1993]. Podstawowe mankamenty tej metody to czasochłonność (czas suszenia próbki to 10–24 godziny) i pracochłonność związana z pobieraniem, transportem i przygotowaniem próbek. Czasami właściwości fizyczne gleby uniemożliwiają pobranie próbki. Czynniki te ograniczają jej użyteczność. Próby skrócenia czasu suszenia przez zmniejszenie próbek i wykorzystanie do suszenia techniki mikrofalowej [Gee i Dorson 1981] nie znalazły szerszego zastosowania w badaniach. Zaletą tej metody jest jej dokładność – największa ze wszystkich metod oznaczania zawartości wody w glebie, dlatego jest ona wykorzystywana do walidacji innych metod pomiarowych [Olszewska i Nowicka 2015, Sanabria i in. 2015, Łyczko i in. 2017]. Trzeba jednak zauważyć, że choć metoda ta służy do walidacji innych metod, to nie jest absolutnie dokładna. Do uwolnienia całkowitej ilości wody (poza wodą krystaliczną) potrzebna jest temperatura 160°C, jednak przy tej temperaturze następuje również utrata masy wynikająca z utleniania się organicznych cząstek gleby, stąd przyjęto jako standard kompromisową temperaturę 105°C [Earnest 1991a, b]. Do analizy grawimetrycznej pobierane są próbki gleby o nienaruszonej strukturze zazwyczaj za pomocą stalowych cylindrów o średnicy wewnętrznej 50 mm i objętości 100 cm³ lub o średnicy 84 mm i objętości 250 cm³. W krajowej nomenklaturze cylindry takie określa się jako pierścienie lub naczynka Kopeckiego.

Usunięcie wody za pomocą metod fizycznych w celu określenia różnicy mas nie musi sprowadzać się tylko do metody termicznej. Gleba może być również pozbawiana wody, a właściwie roztworu glebowego, przez przyłożenie do cylindra z próbką odpowiedniego ciśnienia lub podciśnienia. Pozwala to nie

tylko na określenie ilości wody zawartej w próbce gleby, lecz także na poddanie tak odseparowanego roztworu analizom chemicznym. Wymaga to jednak specjalistycznego sprzętu laboratoryjnego [Hong i in. 2016].

Jeśli jednostkami doświadczalnymi są wazony lub lizymetry, można określić przybliżoną pojemność wodną dla całej jednostki, postępując analogicznie jak dla standardowej metody grawimetrycznej dla próbek. Różnica polega na tym, że suszenie ma miejsce w temperaturze otoczenia do momentu uzyskania stabilnej masy gleby. Objętość lub masę wody potrzebnej do pełnego nasycenia podłoża określa się z wykorzystaniem metody podsiąkowej. W doświadczeniach polowym do czasu, gdy zaczęto rozpowszechniać pośrednie metody punktowe, co można datować na lata dziewięćdziesiąte ubiegłego wieku, metoda grawimetryczna była podstawowym sposobem oznaczania wilgotności gleby. Ze względu na pracochłonność tej metody liczba doświadczeń, w których parametr ten szacowano, była stosunkowo niewielka.

2.2.1.2. Metody oparte na właściwościach dielektrycznych gleby

Podstawy teoretyczne odnoszące się do zależności częstotliwości prądu elektrycznego od homogenicznego dielektryka opracował Debye w 1929 roku. Według tej metody wykorzystuje się różnice między stałymi dielektrycznymi (przenikalnością elektryczną) gleby, powietrza i wody. W temperaturze 20°C względna przenikalność elektryczna wody wynosi 80,36, powietrza – około 1, a fazy stałej – między 3 a 5 w zależności od gęstości i zawartości frakcji ilastej. Zmiana zawartości wody w materiale porowatym, w np. glebie, powoduje zmianę jego przenikalności elektrycznej. Jest to zatem metoda pośrednia polegająca na ustaleniu zależności między zawartością wody w glebie a jej przenikalnością elektryczną [Roth i in. 1990, Skierucha i Malicki 2000, Nobiro 2001, Thring i in. 2014]. Urządzenia pomiarowe wykorzystujące tę metodę pomiaru wymagają stosownej kalibracji. Dla większości gleb mineralnych kalibracja fabryczna pozwala uzyskać dokładność wystarczającą do celów komercyjnych; do celów naukowych wymagana jest zazwyczaj kalibracja dla określonego rodzaju podłoża [Topp i in. 2000, Skierucha 2002, Zhao i in. 2016]. Pomiar oparty na tej metodzie wykonany za pomocą sond wymagających bezpośredniego styku z glebą obejmuje na tyle niewielką objętość gleby, że w praktyce przyjmuje się, że jest to pomiar punktowy. Te same właściwości dielektryczne gleby wykorzystywane są jednak do oznaczania zawartości wody w glebie przez GPR i inne techniki teledetekcyjne dla nieporównywalnie większej skali objętościowej, co opisano w innych rozdziałach.

W punktowych sondach wilgotności gleby wykorzystuje się dwie techniki pomiaru właściwości dielektrycznych:

- pomiar częstotliwości rezonansowej oscylatora elektronicznego sprzężonego z kondensatorem, którego pole elektromagnetyczne przechodzi przez glebę – reflektrometria w domenie częstotliwości (*Frequency Domain Reflectometry* – FDR). Sondy wykorzystujące tę metodę nazywane są sondami FDR lub sondami pojemnościowymi [Jones i Or 2004, Bogena 2007, Estevez i Jones 2009].

- pomiar czasu propagacji impulsu elektrycznego wzdłuż falowodu umieszczonego w glebie. Wykorzystuje się dwa tryby oznaczeń: tryb odbiciowy (*Time Domain Reflectometry* – TDR) lub tryb transmisyjny (*Time Domain Transmissionmetry* – TDT). Falowodem są elektrody igłowe w różnej ich liczbie w zależności od rozwiązania. Sondy wykorzystujące te metody nazywane są odpowiednio sondami TDR lub TDT [Skierucha i Malicki 2000, Will i in. 2012, Poltoradnev i in. 2015].

Dziś ta technika pomiarowa rozwija się bardzo dynamicznie, ale podstawy teoretyczne opracowali Fellner-Feldegg [1968] czy Davis i Annan [1977]. Początkowo urządzenia pomiarowe, których działanie jest oparte na tej zasadzie, ze względu na trudności techniczne były duże i bardzo kosztowne. Mimo nadal wysokich cen obecnie technika ta staje się coraz bardziej przystępna do wykorzystania w celach komercyjnych, dzięki czemu możliwy jest rozwój systemów wielopunktowego monitoringu. Czynniki wpływające na zwiększenie tej przystępności to pojawienie się urządzeń z bezprzewodową transmisją danych oraz sam charakter pomiarów – zapotrzebowanie na energię elektryczną współczesnych sond jest bowiem bardzo małe i mogą one pracować bez przerwy przez cały sezon wegetacyjny bez wymiany baterii [Skierucha i in. 2012, Ojha i in. 2015, Kojima i in. 2016, Sulthoni i in. 2016]. Są takie rozwiązania bezprzewodowe, dla których producenci deklarują ciągłość pomiarów bez wymiany baterii przez nawet 20 lat¹.

Stosunkowo nowym rozwiązaniem jest wykorzystanie metod dielektrycznych do pomiaru potencjału matrycowego. Podstawą pomiarów potencjału wody w glebie jest równowaga hydrauliczna między wodą zawartą w glebie a urządzeniem pomiarowym; w przypadku przedmiotowej metody, między glebą a dyskami ceramicznymi. Pomiar FDR określa zatem zawartość wody w porach ceramicznego dysku, a ta jest zależna od potencjału matrycowego gleby. Przenikalność dielektryczna dysku (FDR) ceramicznego przeliczana jest na zawartość wody, a następnie – na potencjał wody w oparciu o krzywą retencji – stąd stosowne przypisanie pomiaru FDR również do pomiaru potencjału matrycowego (rys. 1) [Bittelli 2010, Bianchi i in. 2017, Walther i Schleppe 2018]. Przykładem sond działających na tej zasadzie są MPS-2 i MPS-6 (firmy Decagon)². Dostępne rozwiązania poza potencjałem matrycowym mierzą również temperaturę gleby. Zakres pomiarowy wynosi od -10 kPa do -500 kPa, jest zatem nieporównywalnie większy niż w przypadku standardowej, tj. tensjometrycznej, metody pomiaru potencjału matrycowego. Urządzenia te cechują się dokładnością rzędu -0,1 kPa do -12 kPa, co stanowi sporą rozbieżność w zależności od technicznego rozwiązania w danym typie sondy. Znacznie większym zakresem pomiarowym cechuje się sonda TEROS 21³, dla której producent podaje zakres pomiaru rzędu -9 do -100000 kPa, czyli od stanu niemal pełnego

¹ <http://soilscout.com>.

² [www.manuals.decagon.com/Retired and Discontinued/Manuals/13755_MPS-2and6_Web.pdf](http://www.manuals.decagon.com/Retired%20and%20Discontinued/Manuals/13755_MPS-2and6_Web.pdf).

³ www.metergroup.com/environment/products/teros-21/.

nasylenia gleby wodą do stanu gleby przesuszonej na powietrzu. Potencjał matrycowy gleby na podobnej zasadzie mierzy również sonda EQ3 Equiten-siometer⁴ z tą różnicą, że zamiast dysków ceramicznych zastosowano walec wykonany z mieszaniny kwarcowej o różnej granulacji, zestalonych żywicą epoksydową. Zakres pomiarowy tej sondy sięga -1000 kPa.

Czujniki TDR i TDT działają w częstotliwościach około 1 GHz, co wiąże się z większą dokładnością pomiaru, ale też droższą konstrukcją niż w przypadku, czujników FDR pracujących przy częstotliwościach rzędu 100–200 MHz. O mniejszej dokładności pomiarów FDR niż TDR i TDT decyduje większy wpływ zasolenia gleby na pomiar [Bogena i in. 2007, Robinson i in. 2008]. Należy zauważyć, że za pomocą oferowanych w sprzedaży urządzeń pomiarowych TDR, TDT i FDR wykonuje się jednocześnie pomiary zasolenia roztworu glebowego. Zasolenie wynika z rozpuszczonych w wodzie soli w postaci jonowej mających zdolność przenoszenia ładunków elektrycznych. Roztwór glebowy ma zdolność przewodzenia prądu elektrycznego proporcjonalnego do stężenia soli. Stąd zasolenie można mierzyć, oznaczając konduktywność elektryczną roztworu glebowego [Whalley 1993, Friedman 2005].

2.2.1.3. Metody z wykorzystaniem promieniowania jonizującego

Do pomiaru wilgotności gleby stosuje się także techniki z wykorzystaniem promieniowania jonizującego neutronowego i gamma [Christensen 1974, Tokumoto i in. 2012]. Bardziej rozpowszechniona jest technika, do realizacji której wykorzystuje się promieniowanie neutronowe.

Sposób działania sondy neutronowej opracowano jako jedną z pierwszych technik pośredniego pomiaru zawartości wody w glebie w połowie ubiegłego wieku [Belcher i in. 1950]. Metoda ta polega na emisji wysokoenergetycznych szybkich neutronów powstających wskutek rozpadu promieniotwórczego wybranego izotopu. Neutrony te zderzają się z protonami wodoru, przez co tracą całą energię kinetyczną i gwałtownie wyhamowują (termoliza neutronowa), tworząc wokół sondy sferyczny ośrodek spowolnionych neutronów zwany chmurą neutronów. Zderzenia neutronów z dużymi jądrami atomów innych pierwiastków tworzących badaną próbkę (np. krzemu, glinu, żelaza czy tlenu) są sprężyste i neutrony wytracają tylko niewielką część energii kinetycznej (odpowiednio 14, 13, 7 i 22%), stąd nie zwalniają tak silnie jak po zderzeniu z jądrami wodoru [Gardner i in. 2001]. Głównym źródłem wodoru w glebie jest woda, stąd gęstość spowolnionych neutronów jest niemal proporcjonalna do objętości wody w glebie. Objętość opomiarowanej gleby zależy od jej wilgotności. Sucha gleba ma większą przenikliwość dla promieniowania neutronowego, dlatego średnica chmury jest większa i większa objętość gleby objęta jest pomiarem; dla gleby pozbawionej wody średnica sfery wynosi około 80 cm. Im gleba jest bardziej wysycona wodą, tym średnica chmury i objętość opomiarowanej gleby są mniejsze, przy pełnym wysyceniu gleby wodą jest to sfera

⁴ www.delta-t.co.uk/product/eq3/.

o średnicy około 20 cm. Wśród wszystkich metod punktowego pomiaru metoda ta obejmuje próbkę gleby o największej objętości. Liczba wolnych neutronów jest stała w objętości chmury i proporcjonalna do wilgotności gleby. Detektor neutronów w sondzie mierzy szybkość zliczania neutronów, która jest liniowo skorelowana z zawartością wody w glebie [Chanasyk i Naeth 1996, Tukomoto i in. 2012, Channuie i in. 2017, Balaghi i in. 2018]. Sondy takie przy odpowiednim skalibrowaniu osiągają dokładność rzędu 0,2–4%, a pomiaru nie zakłócają ani zmiany temperatury, ani zmiany zasolenia, co jest problemem przy innych technikach pomiarów pośrednich. Problemem jest jednak kalibracja w glebach o dużej zawartości materii organicznej stanowiącej również źródło wodoru, co istotnie zawyża wynik wilgotności. Wadą sond neutronowych jest tzw. „ucieczka neutronów” ograniczająca możliwość pomiarów przy powierzchni gleby ze względu na zmienną średnicę chmury neutronów, która powinna cała znajdować się w glebie. Problemem może być również bardzo duża niejednorodność wilgotności mierzonej gleby. Taka niejednorodność może być efektem powstania szczeliny powietrznej przy rurze prowadzącej sondę, a także wynikać z obecności dużych szczelin niewypełnionych wodą w silnie popękanej glebie utrzymującej wodę w kapilarach [Haverkamp i in. 1984, Bagnall i in. 2018]. Z pewnością zaletą tych sond jest możliwość dokonywania pomiarów profilowych i to na dużą głębokość, ponieważ jedynym ograniczeniem jest możliwość umieszczenia odpowiednio długiej rury pilotującej i długość kabla. Pomimo wskazanych walorów tej metody trudno oczekiwać, aby znalazła ona powszechne zastosowanie w praktyce rolniczej czy ogrodniczej. Jak już wskazano, jest to pomiar punktowy, więc jego realizacja wymaga bezpośredniej obecności osoby wykonującej pomiar. Wiąże się to ponadto z koniecznością wcześniejszego umiejscowienia rur pilotujących sondę.

Pomiar gammaskopowy polega na tym, że przy przejściu wiązki promieniowania gamma emitowanego ze szczeliny kolimacyjnej przez badaną próbkę obniża się jego natężenie proporcjonalnie do jej gęstości. Gęstość próbki materiału porowatego, a więc i gleby zmienia się wraz ze zmianą zawartej w nim wody. Zatem zmiana wilgotności gleby powoduje zmianę natężenia wiązki promieniowania gamma. Miarą natężenia przechodzącego przez próbkę promieniowania jest ilość emitowanych fotonów w jednostce czasu na detektorze. Metoda ta nie może być wykorzystywana do oceny wilgotności materiałów pęczniejących, ponieważ zmiana gęstości takiej próbki nie wynika li tylko z wypełniania wolnych przestrzeni wodą. Sondy gammaskopowe mogą być wykorzystywane zarówno do pomiarów laboratoryjnych, jak i terenowych. Mankamenty pomiarów terenowych są podobne jak w przypadku sond neutronowych. Metoda ta wymaga ponadto stosownej kalibracji ze względu na zmienność gęstości poszczególnych próbek gleby. Podobnie jak metoda neutronowa ma jednak swoje walory, zwłaszcza przy ocenie skalistych gleb, na których trudno umieścić inne sondy np. TDR. Inne punktowe pomiary pośrednie obejmują tylko małą próbkę gleby i przy dużej jej niejednorodności, wynikają-

cej np. z dużej ilości kamieni, pomiary takie są nierzetelne [Šařec i in. 2008, Tukomoto i in. 2011].

Obie metody nie są rozpowszechnione na szerszą skalę i prawdopodobnie się nie upowszechnią ze względu na coraz większą dostępność innych, tańszych rozwiązań pomiaru wilgotności gleby. Podstawowe problemy to koszt samej sondy, który przekracza 10000 USD, oraz jej eksploatacja, tj. zakup i utylizacja źródła promieniowania. Do pomiarów wykorzystywane są najczęściej izotopy ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am , zatem zgodnie z procedurami bezpieczeństwa obchodzenia się z materiałami radioaktywnymi wymagane jest odpowiednie przeszkolenie obsługi.

2.2.1.4. Metody opornościowe

Z wykorzystaniem tej metody skonstruowano urządzenia, których elementy pomiarowe mają z glebą kontakt bezpośredni lub pośredni – przez specjalnie dobrany materiał porowaty o znanych parametrach.

Do pomiaru oporności można użyć omomierzy czy mostków oporowych. Konstrukcja mierników wilgotności opartych na przewodności elektrycznej jest więc bardzo prosta – została zaproponowana już w ostatnich latach XIX wieku [Whitney i in. 1897, Briggs 1899]. Związek między przewodnością elektryczną gleby a jej właściwościami fizycznymi określił w 1942 r. Archie [1942]. Przewodnictwo elektryczne fazy stałej gleby jest bardzo niewielkie, stąd glebę pozbawioną wilgoci można traktować jako materiał nieprzewodzący prądu elektrycznego. Wraz ze wzrostem wilgotności gleby zwiększa się jej przewodnictwo elektryczne. Wpływ na wynik ma temperatura, jednak w prosty sposób jest on matematycznie korygowany. Większym problemem jest to, że o przewodnictwie elektrycznym decydują również gęstość gleby, ilość rozpuszczonych w wodzie soli, a więc stężenie roztworu glebowego, i kontakt elementów pomiarowych sondy z glebą [Friedman 2005, Bertermann i Schwarz 2017, Zhang i in. 2018]. Czynniki te powodują, że dla każdego punktu pomiarowego trzeba dokonywać osobnej kalibracji. Kalibrację tę należy na bieżąco korygować, gdyż wprowadzenie do gleby nawozów i pobieranie ich przez rośliny ciągle zmienia stosunki jonowe gleby, a tym samym – jej przewodnictwo. Poza tym każda zmiana kontaktu elektrod z glebą przy poruszeniu sondą zmienia odczyty. Problemy z zastosowaniem pomiaru opornościowego gleby w odniesieniu do licznej literatury opisał w 1971 roku Baranowski, stwierdzając, że ze względu na jej mankamenty nie znalazła szerszego zastosowania [Baranowski 1971]. Obecnie jednak pojawiają się w sprzedaży mierniki opornościowe do umieszczania bezpośrednio w glebie, wskazujące wartość wilgotności objętościowej gleby. Są to mierniki o bardzo prostej konstrukcji, co sprawia, że ich koszt jest niewielki. Jednak ze względu na bardzo dużą niedokładność, wynikającą z praktycznego braku możliwości rzetelnej kalibracji, bezpośrednie odczyty nie powinny być wykorzystywane do zaleceń produkcyjnych.

Potencjalnym rozwiązaniem eliminującym większość wad tej metody jest trwale umieszczenie elementów pomiarowych sondy w materiale porowatym

o znanych stosunkach jonowych – w matrycy pośredniej. Taka matryca pośrednia pozostaje w równowadze hydrodynamicznej z glebą. Koncepcję taką zaproponowali Bouyoucos i Mick [1939, 1940, 1948]. Ze względu na stosunkowo łatwą konstrukcję i niski koszt sondy te należą do najczęściej wykorzystywanych w praktyce rolniczej [Thompson i in. 2006]. Elektrody zalewa się najczęściej gipsem lub innymi materiałami porowatymi. Gips po zastygnięciu stanowi jednolity blok i otacza się go perforowaną osłoną chroniącą go przed uszkodzeniami mechanicznymi [Hawkins 1993]. Zamiast jednolitego bloku materiału porowatego stosowane są też matryce w postaci granulatu (*granular matrix sensors*) [Bianchi i in. 2017]. Elementy pomiarowe zatem nie mają w zasadzie bezpośredniego kontaktu z glebą. Po umieszczeniu takiego czujnika w glebie musi wytworzyć się między jego powierzchnią a glebą stabilna struktura kapilarna. Na zasadzie potencjału matrycowego woda przechodzi między materiałem porowatym sondy a glebą. Sondy takie mierzą więc potencjał matrycowy i choć skalowane są w wartościach podciśnienia, to wyniki dla różnych gleb mogą być automatycznie przeliczane i prezentowane w wartościach wilgotności objętościowej. Zakres pomiarów mieści się w przedziale 0–200 kPa. Do właściwej interpretacji wyników potrzebne są tabele lub krzywe kalibracyjne uwzględniające skład granulometryczny gleby. Niezbędna jest kalibracja każdej sondy, którą trzeba wykonać przed umieszczeniem sond w glebie. Problemem jest też histereza wynikająca z tego, że krzywe kalibracji są różne dla osuszania i dla nawilżania materiału, z którego wykonano bloczki sondy. Pomimo że wyjściowe stosunki jonowe w materiale porowatym sondy są znane, mogą one ulegać zmianie w trakcie użytkowania, co istotnie ogranicza ich trwałość i nie eliminuje całkowicie wpływu zmiany zasolenia gleby na wynik. Ponadto czas reakcji na zmiany wilgotności gleby jest długi w porównaniu z innymi metodami pomiaru [Irmak i Haman 2001, Taber i in. 2002, Leib i in. 2003, Thompson i in. 2007, Chow i in. 2009, Cardenas-Lailhacar i Dukes 2010, Hoseini i Albaji 2016].

2.2.1.5. Metody termiczne

Literatura dotycząca ciepła jako wskaźnika wilgotności gleby jest stosunkowo niewielka. Właściwości termiczne gleby odnoszą się do jej przewodności cieplnej, objętościowej pojemności cieplnej i termicznej dyfuzyjności gleby. Każdy z tych parametrów determinowany jest między innymi przez zawartość wody w glebie. Uogólniając, zwiększenie wilgotności gleby powoduje, że wartości tych parametrów wzrastają. Zastosowanie odpowiednich modeli matematycznych wyznaczonych dla poszczególnych typów gleb pozwala na podstawie pomiaru wskazanych parametrów oszacować zawartość wody w glebie [Anderson 2005]. Ogólny związek między właściwościami termicznymi gleby a jej wilgotnością został opisany przez de Vriesa [1963]. Właściwości termiczne gleby są uzależnione nie tylko od jej wilgotności, ale są specyficzne dla każdego rodzaju gleby i zależą również od: tworzących ją minerałów i geometrycznego rozmieszczenia faz. Aby odpowiednio ocenić te właściwości, konieczne jest przeprowadzenie stosownych kalibracji urządzeń pomiarowych, a także

wykorzystanie modeli matematycznych. Pozwala to prawidłowo zinterpretować uzyskane wyniki. Modele matematyczne stosowane do szacowania wilgotności gleby powinny uwzględniać szereg zmiennych będących źródłem błędów tej metody [Kluitenberg i in. 1993, 1995, Kluitenberg 2002].

Istota działania sond wilgotności jest prosta: emiter wydziela ciepło rozchodzące się w glebie, a czujnik umieszczony w niewielkiej odległości mierzy wzrost temperatury [Valente i in. 2018]. Miernikiem działającym w ten sposób jest dwuigłowa sonda emisji i pomiaru impulsu cieplnego (*Heat Probe Pulse HPP* i *Dual Probe Heat Pulse DPHP*). Igły są równoległymi, oddalonymi od siebie o 6 mm emitorami i czujnikami ciepła. Objętość badanej próbki jest zatem bardzo mała. Po emisji krótkotrwałego impulsu cieplnego reakcje temperaturowe rejestrowane są przez igłę termistorową [Campbell i in. 1991]. Emisja impulsu cieplnego powoduje, że rejestrowana na igle pomiarowej temperatura wzrasta o wielkość rzędu 1°C , co w celu zachowania dokładności szacowanego pomiaru wilgotności gleby na poziomie 5% wymaga pomiarów temperatury z dokładnością $0,05^{\circ}\text{C}$. Duży wpływ na błędy pomiaru ma rozginanie się igieł przy wprowadzaniu do gleby, co zmienia odstęp między nimi. Igły powinny więc być sztywne, a to implikuje problemy techniczne wykonania takich sond [Bristow i in. 1993, Kluitenberg i in. 1993]. Bristow i in. [2001] przedstawili wieloigłową wersję sondy HPP. Metodę DHPP wykorzystano w sondzie multisensorycznej, tj. termo-TDR, mierzącej właściwości termiczne gleby i jej wilgotność oraz zasolenie za pomocą obu metod pomiarowych [Ren i in. 1999]. Właściwości termiczne gleby mogą być mierzone również z wykorzystaniem metody gorącej płyty [Bristow 2002]. Opracowano także sondę w kształcie guzika. Rozwiązanie takie wskazuje na możliwość znacznego zmniejszenia ilości energii zużywanej do pomiarów w stosunku do sond igłowych [Kamai i in. 2009, Valente i in. 2010], choć nie znalazło ono szerszego oddźwięku w literaturze. Obecnie metody wytwarzania sond igłowych są pracochłonne i trudne, co ogranicza przemysłową produkcję. Problemem jest ponadto duże zużycie energii, co uniemożliwia zastosowanie tych rozwiązań do długoterminowych, bezobsługowych pomiarów stacjonarnych w polu. Powoduje to, że metody termiczne pomiaru wilgotności gleby wykorzystywane są tylko w niewielkim stopniu, ale potencjał tych metod jest duży [Anderson 2005]. Prowadzone są prace nad uprzemysłowieniem produkcji przez stosowanie płytek drukowanych (Printed Circuit Board – PCB) i nad obniżeniem ilości zużywanej do pomiarów energii [Valente i in. 2018, de Morais-França i in. 2019]. Dokładność pomiaru może być duża i w zależności od rozwiązania sięgać nawet 0,01% [Jorapur i in. 2015]. Odnosząc się do przytoczonej tak dużej dokładności tych sond, trzeba zwrócić uwagę, że objętość kilku cm^3 gleby objętej pomiarem nie daje wiarygodnego wyniku w warunkach polowych.

2.2.1.6. Potencjał matrycowy wody w glebie

Za pomocą tej metody nie mierzy się bezpośrednio zawartości wody w glebie, lecz potencjał matrycowy wody glebowej wyrażony w jednostkach ciśnienia.

Obrazuje to, jaką pracę musi wykonać system korzeniowy rośliny, aby pobrać wodę z gleby. Należy jednak podkreślić, że zawartość wody w glebie nie odpowiada ilości wody, którą mogą pobrać rośliny, ponieważ w glebach ciężkich jest ona znacznie silniej wiązana niż w glebach lekkich. Dlatego właśnie, posługując się tą metodą, można uzyskać bardziej przydatną informację dla praktyki rolniczej w porównaniu z innymi metodami. Choć zasadę pomiaru potencjału matrycowego wykorzystują obecnie trzy metody pomiaru, tj. opisane wyżej metody opornościowa i FDR pośredniego kontaktu oraz tensjometryczna, to tylko ta ostatnia daje wyniki skalowane bezpośrednio w jednostkach podciśnienia.

W najprostszym ujęciu tensjometr to szczelnie zamykana rurka z wakuometrem wypełniona wodą, zakończona ceramicznym sączkiem. Sączek w odniesieniu do innych sond jest odpowiednikiem czujnika. Aby po umieszczeniu czujnika w glebie tensjometr działał prawidłowo, musi się wytworzyć struktura kapilarna czujnik – gleba, wówczas układ jest w stanie równowagi ciśnień. Wymaga to czasu, więc przy zastowaniu klasycznych tensjometrów metoda ta zdecydowanie nie nadaje się do pomiarów jednorazowych, wykorzystuje się ją zatem do pomiarów stacjonarnych. Opracowano jednak tensjometry przenośne do wykonywania szybkich, chwilowych pomiarów siły ssącej gleby (np. Quick-Draw-Soilmoisture 2900F)⁵. Tensjometr taki wskazuje pomiar siły ssącej już w ciągu minuty od jego umieszczenia w glebie, a nawet szybciej [Lapton i in. 2001, Dawidowski i Błażejczak 2011]. Gdy gleba wysycha, woda wysysana jest przez ceramiczny sączek, w rurce powstaje podciśnienie mierzone wakuometrem [Strebel i in. 1973, Cassel i Klute 1986, Smajstrla i Locascio 1996]. W nowoczesnych rozwiązaniach wakuometry połączone są z przetwornikiem cyfrowym albo prostym układem zamykającym lub otwierającym obwód elektryczny przy deklarowanej nastawie podciśnienia. Zwiększenie zawartości wody w glebie, a tym samym spadek potencjału wody skutkują jej zasysaniem przez sączek do rurki i obniżeniem wartości podciśnienia. Niestety krzywe nawilżania i wysychania się nie pokrywają (histereza). W tensjometrach montowane są najczęściej wakuometry o zakresie od 0 do -100 kPa, choć w praktyce maksymalny zakres to -75 kPa. Zwykle gdy wartość podciśnienia w rurce z wodą osiągnie powyżej -80 kPa, woda zaczyna wrzeć. Uwalniana para wodna tworzy pęcherzyki gazu, które rozszerzają się i kurczą wraz ze zmianą ciśnienia, przez co właściwy pomiar siły ssącej nie jest możliwy i tensjometr przestaje działać. Aby przywrócić działanie tensjometru, trzeba napełnić go ponownie wodą. Wadą tej metody jest również spora inercja, tj. od zmiany wilgotności gleby do zmiany wskazań wakuometru upływa na tyle długi czas, że wyeliminowanie przesterowań w automatycznych systemach nawadniania jest utrudnione. Pojawiają się jednak nowe rozwiązania, przykładem może być tensjometr T5 (firmy Meter)⁶, którego maksymalny zakres mierzonego podciśnienia

⁵ www.soilmoisture.com/pdfs/Resource_Instructions_0898-2900F1_Quick_Draw_Probe_Instructions_May_2012.pdf.

⁶ www.metergroup.com/environment/t5-tensiometer-water-potential/.

wynosi -300 kPa, a czas reakcji na zmiany podciśnienia jest krótki ze względu na bardzo małe rozmiary. Tensjometry nie wymagają kalibracji przez użytkownika, na odczyt nie mają wpływu temperatura gleby, zasolenie ani inne parametry gleby. Okres użytkowania tensjometrów wynosi około 5 lat, wymagają jednak demontowania na zimę oraz osłony przy nadmiernej temperaturze powietrza i insolacji [Hubbel i Sisson 2003, Shock i Wang 2011].

2.2.2. Metody przestrzenne

Pomiary punktowe nie są reprezentatywne dla sąsiadujących obszarów ze względu na dużą przestrzenną niejednorodność wilgotności gleby w różnych skalach powierzchniowych. Ta przestrzenna niejednorodność wilgotności może być zobrazowana za pomocą map rozkładu wilgotności. Do takiego mapowania potrzebne są jednak metody pomiarowe odnoszące się nie tylko do punktu pomiarowego, ale do większej powierzchni. Ekstrapolacja punktowych systemów pomiarowych na dużą skalę przestrzenną jest bardzo kosztowna, a przy tym złożona i czasochłonna, zwłaszcza w warunkach dużej przestrzennej niejednorodności gleby [Greifeneder i in. 2016]. Stąd opracowano wiele, bardzo różniących się od siebie metod przestrzennego pomiaru wilgotności gleby w różnych skalach powierzchniowych, tj. od wielkości pola rzędu kilku metrów kwadratowych do skali globalnej [Crow i Wood 1999, Loew 2008, Crow i in. 2012, Vereecken i in. 2014, Peng i in. 2017].

2.2.2.1. Kontaktowe

W doświadczeniach polowych już stosunkowo dawno określano rozkład wilgotności gleby na powierzchni poletek doświadczalnych, stosując do tego przenośne mierniki wilgotności TDR [van Wesenbeeck i Kachanoski 1988]. Pomimo że pierwsze mierniki TDR były dosyć duże i ciężkie, te pracochłonne badania wykonywano także na znacznie większych arealach [Urie 1994]. Opmiarowanie wilgotności gleby na powierzchni kilkudziesięciu metrów kwadratowych jest obecnie zdecydowanie łatwiejsze. Dostępnych jest wiele rozwiązań, polegających na zainstalowaniu w polu sond połączonych przewodami z wielokanałowymi multiplekserami. Nastręcza to jednak wielu trudności, a kable narażone są na uszkodzenia, co znacznie ogranicza użyteczność takich sieci pomiarowych [Wraith i in. 2005, Vereecken i in. 2014]. Obecny rozwój techniki bezprzewodowej dostarcza rozwiązań w tym zakresie. Niestety odpowiednio gęsta sieć sond – przewodowych lub bezprzewodowych – jest kosztowna. Można jednak prowadzić ciągły monitoring wilgotności gleby, co znalazło zastosowanie w doświadczalnictwie rolniczym. Mapowanie większego obszaru we wskazywany sposób, w stosunkowo dużej rozdzielczości, jest obecnie poza zasięgiem ekonomicznej opłacalności dla polowej produkcji roślinnej przy aktualnych cenach większości stosowanych rozwiązań. Wskazywano jednak wcześniej, że istnieją tanie sondy opornościowe pozwalające przy relatywnie niskim koszcie zbudować wystarczająco gęstą sieć do przestrzennego mapowa-

nia wilgotności gleby – *Electrical Resistivity Tomography* (ERT). Rozwiązania takie pozwalają na monitorowanie ruchu wody w glebie, wymagają jednak pracochłonnej kalibracji dla każdego punktu pomiarowego [Michot i in. 2003, Almary i in. 2017]. Przedmiotowego mapowania można natomiast dokonać za pomocą mobilnych mierników wilgotności, wykonując pomiary wg ustalonej siatki punktów w terenie (*stop and go*) lub mierników przemieszczanych w glebie. Metody te są różnie nazywane, na przykład: *on the move* [Inoue i in. 2001], *on-the-go* [Sun i in. 2006], *mobail TDR* [Robinson i in. 2008], *on-the-fly monitoring* [Wraith i in 2005].

2.2.2.1.1. Metoda *stop and go*

Faktycznie nie jest to metoda pomiaru wilgotności gleby, lecz sposób wykorzystania i adaptacji punktowych sond przenośnych do oceny wilgotności gleby na określonym areale. Na podstawie zmienności glebowej i reliefu oraz szaty roślinnej lub układu doświadczalnego sporządzana jest siatka punktów potrzebnych do przygotowania mapy przestrzennej zmienności wilgotności gleby danego areалу. Następnie wykonuje się punktowe pomiary wilgotności gleby przenośnymi miernikami wilgotności. Współczesne mierniki dają możliwość pozycjonowania pomiarów GPS, dzięki czemu przypisywanie uzyskanych wartości do miejsca mapowanego obszaru jest łatwiejsze. Przy bardzo dużej liczbie pomiarów wilgotności gleby, zwłaszcza jej wierzchniej warstwy, pomiary we wszystkich punktach powinny być wykonane w możliwie krótkim czasie i przy możliwie najmniejszej insolacji, aby uniknąć różnic pomiędzy punktami, wynikających z czasu ewaporacji. Pomiar w każdym punkcie powinien być więc jak najszybszy. Do takich pomiarów nadają się sondy TDR, TDT, FDR, HPP, DPHP, których prawidłowe działanie nie jest warunkowane przez ustalenie się struktury kapilarnej czujnik – gleba i nie jest wymagana instalacja rur pilotujących w punktach pomiarowych, a dane zapisywane są w pamięci urządzenia lub/i przesyłane drogą bezprzewodową na serwer. Ważny jest krótki czas między pomiarami w poszczególnych punktach, dlatego konieczna jest duża mobilność aparatury pomiarowej. Opracowano więc prototypowe rozwiązania z umieszczaniem platform z aparaturą pomiarową na pojazdach terenowych [Western i in. 1998]. Thomsen i in. [2003] zaproponowali platformę montowaną na TUZ ciągnika z hydraulicznym wprowadzaniem prętów TDR w glebę. Podczas wciskania pręty wprowadzane są w wibrację, ma to ułatwić wgłębianie się w twardą glebę i zapobiec ewentualnemu przepychaniu kamieni w głąb (zostałby utworzony kanał i pręt sondy nie miałby styku z glebą), a spowodować ich posuwanie na bok. Wymagało to zastosowania długich i grubych prętów pomiarowych w dostosowanej do tego rozwiązania sondzie TDR.

2.2.2.1.2. Metoda pomiarów mobilnych

Podobnie jak w przypadku *stop and go* nie jest to metoda pomiaru wilgotności gleby, lecz sposób wykorzystania istniejących metod pomiarowych do oznaczania wilgotności przez przemieszczającą się w glebie sondę. Nastręcza to

wielu problemów natury technicznej, ponieważ elementy sond muszą być na tyle mocne, aby wytrzymać opór, jaki stawia gleba przy przemieszczaniu się przez nią. Rozwiązania, do realizacji których wykorzystuje się technikę TDR, zaproponowali Inoue i in. [2001], Long i in. [2002], Jones i in. [2006], Sun i in. [2006]. Inny sposób – z wykorzystaniem konduktometrii – przedstawili Rutkowski i in. [2007]. Jednakże większy niż techniczny problem to wiarygodność uzyskanych wyników. Przemieszczanie w glebie elementów pomiarowych powoduje tarcie i zmianę temperatury, a temperatura ma istotny wpływ na wyniki pomiarów. Przemieszczające się elementy powodują ponadto zagęszczenie gleby, co również może być przyczyną błędu pomiaru. Mankamentem jest też to, że pomiary takie nie mogą być przeprowadzane w trakcie wegetacji roślin ze względu na destrukcyjny charakter ich realizowania. Wobec rozwoju technik bezprzewodowych i technik telemetrycznych problemy te są najprawdopodobniej przyczyną zmniejszenia zainteresowania badaczy takimi rozwiązaniami w ostatnim czasie. Umieszczanie jednak sond pomiaru wilgotności z funkcją lokalizacji GPS w narzędziach uprawowych pomogłoby w zdobywaniu przez rolników informacji, dla jakiej wartości wilgotności gleby w poszczególnych miejscach pola grunt traci nośność dla zestawu uprawowego.

2.2.2.2. Teledetekcyjne

2.2.2.2.1. Metody georadarowe – GPR

Penetracja radarowa gleby GPR (*Ground-Penetrating Radar*) to bezinwazyjna (z wyjątkiem metody odwiertów) technika geofizyczna, wykorzystująca fale elektromagnetyczne (10–1200 MHz). Impulsy EM emitowane są z nadajnika w głąb gleby, a odbiornik rejestruje ich echo w domenie czasu, dostarczając informacji o ich propagacji, a szczególnie o czasie, amplitudzie i kształcie fali. Parametry te determinowane są właściwościami dielektrycznymi gleby, związanymi z jej wilgotnością [Liu i in. 2017], co opisano wcześniej (patrz podrozdział 2.2.2). Aby zastosować te metody, wymagana jest kalibracja, której można dokonać w miejscu pomiaru za pomocą metod punktowych, np. TDR. Stosownych przeliczeń uzyskanych wyników na wilgotność gleby można dokonać na podstawie równań Toppa i in. [1980] i Rotha i in. [1992]. Metody te cechują się stosunkowo dużą dokładnością [Lu i in. 2017]. Metody GPR wypełniają lukę w przestrzennej skali pomiarów między metodami punktowymi a teledetekcyjnymi satelitarnymi [Ardekani 2013] pozwalają opomiarować z dużą rozdzielczością nawet 25 ha dziennie [Huisman i in. 2001].

W zależności od alokacji względem siebie emitera impulsów EM (EI) i rejestratora ich echa (RE) można wyróżnić trzy kategorie metod: RPG-S, RPG-B i RPG-AC. Podziału metod dokonano wg koncepcji Liu i in. [2017].

Georadar powierzchniowy – RPG-S (*Surface RPG*). Zgodnie z tą metodą – oba elementy georadaru, tj. EI i RE, mają bezpośredni kontakt z powierzchnią gleby. Mobilność tego rodzaju pomiarów jest ograniczona ze względu na konieczność przestawiania EI i RE. Ograniczeniem są ponadto rośliny

rosnące na powierzchni gleby. W przypadku badań rolniczych można przesuwac EI i RE wzdłuż nieporośniętych ścieżek rozdzielających poletka i uzyskać mapę różnicującą wilgotność gleby między jednostkami doświadczalnymi. W przypadku pól produkcyjnych w trakcie wegetacji pomiarów można dokonywać tylko w uprawach szerokokorządowych (np. kukurydza) lub na ścieżkach technologicznych. Metoda ta polega na tym, że EI wysyła w głąb gleby impulsy EM, które przenikają ją na głębokość rzędu 30 cm, czyli obejmują pomiarem warstwę o największej aktywności biologicznej [Galagedara i in. 2005, Vereecken i in. 2014, Forte i Pipan 2017]. EI i RE mogą być przemieszczane względem siebie na trzy sposoby:

- FO (*Fix-Offset*) – EI i RE zamontowane są w stałej odległości od siebie i równocześnie przemieszczane wzdłuż linii pomiarowej [Grote i in. 2003, 2010];
- CMP (*Common-Mid Point*) – EI i RE jednocześnie odsuwane są od siebie wzdłuż linii pomiarowej, a odległość między nimi się zwiększa, utrzymując wspólny punkt środkowy;
- WARR (*Wide-Angle Reflection and Refraction*) – EI nie zmienia pozycji, a RE odsuwany jest od niego wzdłuż linii pomiarowej [Wijewardana i Galagedara 2010, Steelman i Endres 2011].

Ze względu na możliwość skanowania większych powierzchni niż w przypadku metod punktowych i z uwagi na wymagany kontakt EI RE z glebą metodę tę sklasyfikowano jako przestrzenną kontaktową (rys. 2).

Georadar odwiertowy – RPG-B (*borehole* RPG) – ten sposób pomiaru wiąże się z koniecznością wykonania odwiertu o odpowiedniej średnicy, tak aby można swobodnie przesuwac w głąb EI i RE. W zasadzie są to więc pomiary punktowe (rys. 2). Można je wykonywać również w trakcie wegetacji. W przypadku doświadczeń rolniczych można wykonać stosowne odwierty na wyznaczonych jednostkach doświadczalnych. Za pomocą tej metody można dokonywać oznaczeń wilgotności gleby na dowolną głębokość ograniczoną tylko głębokością odwiertu [Slob i in. 2010, Tosti i Slob 2015]. Wyróżnia się trzy warianty wykonywania pomiarów:

- ZOP (*Zero-Offset Profile*) – wymagane są dwa odwierty, w których EI i ER przemieszczają się równocześnie (równolegle do siebie) w głąb odwiertu [Rucker i Ferré 2003, 2004, 2005];
- MOP (*Multi-Offset Profile*) – wymagane są również dwa odwierty. EI umieszczony jest na pewnej głębokości, a ER przemieszczany jest w głąb drugiego otworu [Peterson 2001, Galagedara i in. 2003];
- VRP (*Vertical Radar Profile*) – wymagany jest tylko jeden odwiert. EI umieszczony jest na powierzchni, a RE opuszczany jest w głąb odwiertu [Buursink i in. 2002].

Georadar nadpowierzchniowy – RPG-AC (*Air-Coupled* GPR) – w pełni mobilny sposób mapowania wilgotności gleby. W tym przypadku zarówno EI,

jak i RE znajdują się w ustalonej od siebie odległości na platformie zamontowanej na pojeździe, rozwiązania w tym zakresie są różne. Platforma przesuwana jest nad powierzchnią gleby w odległości kilkudziesięciu cm, a pomiary są sprzężone z lokalizacją GPS. Pozwala to na stosunkowo szybkie mapowanie terenu, ale na niewielką – tj. kilkucentymetrową – głębokość [Serbin i Or 2003, Leng i Al-Qadi 2014].

Obecnie stosowane techniki pomiarowe GPR praktycznie nie są zautomatyzowane – przy wykonywaniu pomiarów wymagana jest obecność wykwalifikowanej obsługi. Ich zastosowanie do długoterminowego monitorowania wilgotności gleby jest zatem ograniczone. Obecnie metody te nie wykroczyły praktycznie poza zakres badań doświadczalnych. Wiąże się jednak z nimi duże nadzieje, przede wszystkim ze względu na możliwość mapowania większych powierzchni, z dużą rozdzielczością i w obrazowaniu trójwymiarowym. Daje to potencjalne możliwości wykorzystania takich map uwilgotnienia gleby w rolnictwie precyzyjnym.

2.2.2.2.2. Metody mikrofalowe – MWR

Teledetekcyjna ocena wilgotności gleby w przypadku, gdy fale są emitowane przez aparaturę pomiarową mającą kontakt z gruntem lub zawieszoną nad nim w niewielkiej odległości, nie jest zniekształcana przez warunki atmosferyczne, ale nie ma zastosowania dla dynamicznych pomiarów wilgotności w większej skali przestrzennej. Z kolei teledetekcyjne pomiary wilgotności, w których aparatura pomiarowa znajduje się w dużej odległości od powierzchni gleby, mogą podlegać takim wpływom. Dlatego stosuje się metody minimalizujące wpływ czynników atmosferycznych, takich jak opady czy pokrywa chmur.

Na orbicie Ziemi – ze względu na bardzo duże znaczenie wilgotności gleby dla różnych zastosowań w skali globalnej – znajdują się obecnie dwa specjalnie dedykowane satelity mikrofalowe do jej badania. Pierwszy satelita *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) został wystrzelony przez Europejską Agencję Kosmiczną w listopadzie 2009 r. [Kerr i in. 2010], drugi – *Soil Moisture Active and Passive* (SMAP) zainicjowany przez Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) w styczniu 2015 r. [Srivastava 2017]. Użytecznych danych wykorzystywanych do określania wilgotności gleby dostarczają również EOS (AMSR-E) [Njoku i in. 2003], METOP-A (ASCAT) [Bartalis i in. 2007] i Sentinel-1 SAR Europejskiej Agencji Kosmicznej [Wagner i in. 2009].

Teledetekcja z pułapu satelitarnego jest jedyną techniką, za pomocą której można dokonywać regularnych pomiarów wilgotności gleby na dużą skalę, w tym pomiarów globalnych. Jednak ich rozdzielczość jest stosunkowo mała, zachodzi więc konieczność dużego uśrednienia przestrzennego [Kerr i in., 2001, Sabaghy i in. 2018]. Wprawdzie kilka algorytmów służących poprawie rozdzielczości przestrzennej (dla SMOS) zostało zaproponowanych i zatwierdzonych w różnych częściach świata, to jednak nie mają one zastosowania w skali globalnej, choć prace nad nimi trwają [Portal i in. 2018]. Dane pochodzące z satelitów są zatem wykorzystywane w badaniach zmian klimatycznych, nie

mają jednak bezpośredniego zastosowania dla indywidualnych producentów rolnych [Peng i in. 2017]. Ma na to również wpływ częstość odświeżania danych. W newralgicznych okresach wegetacji i niesprzyjających dla produkcji roślinnej warunkach pogodowych dane powinny być aktualizowane na bieżąco, w odstępie minut lub godzin. Wprawdzie dane SMUDP2 z misji ESA SMOS (European Space Agency, Soil Moisture and Ocean Salinity) zawierają fizyczne informacje o wilgotności 5 cm warstwy gleby z uwzględnieniem szaty roślinnej (z szacowaną dokładnością rzędu $0,04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), ale w cyklu 3-dniowym. Raz na trzy dni o wschodzie słońca (ASC) i o zachodzie słońca (DSC) satelita rejestruje dane w pasie szerokości tysiąca km [Collow i in. 2012, Usowicz i in. 2012].

Zastosowanie mają dwie techniki pomiarowe z użyciem pasma mikrofalowego – MWR (*Microwave Radiometry*), tj. radary pasywne i aktywne. Za pomocą pasywnych radiometrów mikrofalowych można prowadzić stosunkowo częste obserwacje, ale o małej rozdzielczości przestrzennej. Z wykorzystaniem aktywnych radarów mikrofalowych pozyskiwane są dane o znacznie wyższej rozdzielczości niż w przypadku radarów pasywnych, ale szacowanie wilgotności gleby jest trudniejsze ze względu na większy łączny wpływ chropowatości powierzchni i struktury szaty roślinnej [Wagner i in. 2008, Petropoulos i in. 2015]. Można również dokonać innego podziału technik mikrofalowych: ze względu na lokalizację aparatury pomiarowej, tj. zamontowanej na platformach latających (satelity, samoloty, drony czy balony) oraz zamontowanej na masztach.

Pasywna teledetekcja mikrofalowa

Każdy rodzaj materii charakteryzujący się temperaturą wyższą niżeli 0 K ma termicznie wzbudzone, przypadkowo poruszające się elektrony i protony, co jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego EM w całym zakresie częstotliwości – szum EM. Powierzchnia gleby również emituje takie promieniowanie. Szum ten można mierzyć za pomocą radiometru – nazywa się to radiometrią lub pasywną teledetekcją [Njoku i Entekhabi 1996, Jackson i in. 1997].

W przypadku radiometrów podczerwieni nie można prowadzić detekcji przez pokrywą chmur, co stanowi trudny do wyeliminowania problem, natomiast w zakresie mikrofalowym wpływ atmosfery można uznać za nieistotny. Teledetekcja mikrofalowa odnosi się do zakresu spektralnego 500 MHz–100 GHz. Radiometr podczerwieni jest ponadto wrażliwy na temperaturę bardzo cienkiej – rzędu milimetra – warstwy gleby – jest to tzw. temperatura skóry. Znacznie grubsza warstwa gleby determinuje emisję mikrofalową. Głębokość tej warstwy, zwana głębokością emisji, zależy od długości fali: im dłuższa fala, tym większa głębokość penetracji. Przy częstotliwości 1,4 GHz (długość fali 21 cm) emitowane promieniowanie jest zazwyczaj wrażliwe na górne 3 do 5 cm, natomiast przy 19 GHz (długość fali 1,6 cm) emisja jest określona tylko przez kilka górnych milimetrów [Laymon i in. 2001, Escorihuela i in. 2010]. Zgodnie z technologią teledetekcji, która jest obecnie dostępna, pasmo L-Band (częstotliwości od 1 do 2 GHz) określono jako optymalne dla teledetekcji wilgotności gleby [Entekhabi i in. 2004].

Intensywność emisji promieniowania termicznego z powierzchni Ziemi, określanego za pomocą terminu temperatura jasnościowa (T_B), wzrasta wraz z temperaturą. Temperatura jasnościowa gleby w zakresie częstotliwości 1–4 GHz jest silnie skorelowana z zawartością wody w glebie, a wynika to ze zmiany właściwości dielektrycznych (patrz podrozdział 2.2.2). W przypadku gleby nieporośniętej roślinnością przy częstotliwości 1,4 GHz emisyjność suchej gleby ($H_2O < 0,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) wynosi ok. 0,95, a wilgotnej ($H_2O \approx 0,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 0,6. Detekcja promieniowania mikrofalowego w tym zakresie jest więc sposobem umożliwiającym ocenę wilgotności gleby [Hallikainen i in. 1985, Njoku i Entekhabi 1996].

W przypadku detekcji z dużych wysokości, np. satelitarnych, pojawia się problem wpływu szaty roślinnej i wskaźnika nierówności (szorstkości, chropowatości) gruntu na uzyskany wynik. W przypadku odkrytego gruntu o średniokwadratowych nierównościach rzędu 4 cm współczynnik emisyjności wynosi ok. 0,55, a ten sam grunt z nierównościami na poziomie 0,8 cm ma emisyjność 0,8 [Rataj 1993, Schneeberger i in. 2004]. Roślinność w pewnym stopniu tłumi naturalną radiację gleby. Na emisję promieniowania z powierzchni porośniętej składają się emisja gruntu pod roślinnością, emisja warstwy roślin, emisja roślin odbita przez glebę i emisja gleby osłabiona przez rośliny [Jackson i Schmutge 1991]. Pomiar temperatury jasnościowej w paśmie mikrofalowym 1,4 GHz jest stosunkowo mało wrażliwy na warstwę roślin, opracowano więc wiarygodne modele dla niezalesionych, równinnych obszarów. Dla gęstej pokrywy roślinnej, zwłaszcza terenów leśnych, potrzebne jest inne modelowanie [Hornbuckle i England 2004, Wigneron i in. 2007, Kurum i in. 2011]. Mimo że pasmo mikrofalowe wykorzystywane przez satelity do przedmiotowych pomiarów jest zastrzeżone, pojawiają się zakłócenia RFI (*Radio Frequency Interference*) pochodzące ze źródeł nielegalnych, co stanowi poważny problem. Są one wprawdzie filtrowane przez stosowne algorytmy, ale powodują istotną utratę danych [Oliva i in. 2012].

Aktywna teledetekcja mikrofalowa

W zasadzie sposoby przeprowadzania pomiarów aktywnych i pasywnych są podobne, różnica polega tym, że zgodnie z metodą pasywną mierzy się naturalną emisję powierzchni, a w przypadku metody aktywnej wysyła się ku powierzchni wiązkę promieniowania i określa jej rozproszenie – współczynnik rozproszenia wstecznego. Do tego celu wykorzystuje się radar, będący zarówno emiterem, jak i detektorem fal elektromagnetycznych w zakresie mikrofalowym. Radary biostatyczne z oddzielną anteną nadawczą i odbiorczą w tym przypadku nie mają praktycznego zastosowania. Antena emituje w kierunku badanej powierzchni wiązkę mikrofalową. Wiązka ta jest rozpraszana na powierzchni, a elementy detekcyjne anteny rejestrują ilość powracającej fali. Zastosowanie mają dwa systemy, tj. nieobrazujące (skatometry i altimetry) oraz obrazujące (głównie typu SAR – *Synthetic Aperture Radar*) [Petropoulos i in. 2015]. Intensywność sygnału odbitego docierającego z powrotem do detektora radaru zależy od współczynnika rozproszenia wstecznego, który podobnie jak

w przypadku metody pasywnej determinowany jest właściwościami geometrycznymi powierzchni, kątem padania fali, jej częstotliwością i polaryzacją oraz stałą dielektryczną badanej powierzchni. Padająca na powierzchnię wiązka fal jest rozpraszana zarówno na powierzchni, jak i na całej objętości warstwy gruntu, przez którą przeniknie. W analizie sygnału powrotnego przy pomiarach wilgotności pomija się straty związane z rozpraszaniem objętościowym, a bierze pod uwagę straty absorpcyjne determinowane głównie długością fali i zawartością wody. Im dłuższa fala, tym większa jest jej przenikliwość; im większa jest wilgotność, tym większa absorpcja i mniejsza głębokość penetracji. Główne czynniki zakłócające dokładność pomiaru to szorstkość powierzchni i okrywa roślinna [Rataj 1993, Moran i in. 2004]. W przypadku aktywnej teledetekcji geometryczne właściwości gleby i roślinności mają większy wpływ na pomiary [Jackson 2002].

Teledetekcja mikrofalowa z lokalizacją naziemną

Omówiona powyżej idea pomiarów mikrofalowych może być wykorzystana w pomiarach z anten lokalizowanych na ziemi MWR-GB (*Microwave Radiometry Groun-Based*). Poziomy ślad radiometru naziemnego w paśmie mikrofalowym (L-Band) determinowany jest głównie wysokością posadowienia anteny i jej charakterystyką oraz kątem obserwacji. Radary naziemne są zwykle umieszczane na wysokości od kilku metrów do ponad 20 m nad powierzchnią gruntu, co powoduje, że ślad radiometryczny jest rzędu dziesiątek metrów kwadratowych, np. radiometr w paśmie L (1,4 GHz) z anteną tubową zamontowaną na maszcie na wysokości 18 m nad ziemią, z kątem obserwacji 40° i charakteryzującą się szerokością wiązki -3 dB 12°; ślad -3 dB będzie wynosił około 25 m² (eliptyczny ślad z półosi około 3,2 i 2,5 m) [Bogena i in. 2015]. Ze względu na mniejszą liczbę zmiennych niż w pomiarach mobilnych z dużej wysokości kalibracja radarów naziemnych jest łatwiejsza, a modele dokładniej oddają faktyczną wilgotność gleby. Z pewnością jednak eliptyczny ślad radaru nie jest najlepszym rozwiązaniem. Można zamontować radar wykonujący pełne obroty na maszcie, lecz w celu pełnego mapowania wilgotności większego areału niezbędna jest cała sieć radarów zamontowanych na masztach, co wiąże się z kosztami i czasem potrzebnym na obsługę i interpretację danych. Przeprowadzono jednak szereg doświadczeń na terenach rolniczych weryfikujących przydatność tej metody [Pardé i in. 2003, Joseph i in. 2010, Jonard i in. 2011, Jagdhuber i in. 2018, Kim i in. 2018].

2.2.2.2.3. Reflektometria GNSS (GNSS-R)

Pierwotne i podstawowe zastosowanie Globalnych Systemów Nawigacji Satelitarnej GNSS (*Global Navigation Satellite System*) to pozycjonowanie i nawigacja użytkownika. W skład tego systemu wchodzi GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (ros. *Globalnaia Navigacionnaia Sputnikova Sistema*), europejski system Galileo, chiński BeiDou i japoński QZSS (*Quasi Zenit Satellite System*) [<http://www.igik.edu.pl/pl/geodezja-i-geodynamika->

sieci-permanentne-gnss]. GNSS pracują w paśmie mikrofalowym L 1,57542 i 1,22760 GHz (długości fal 19,05 i 24,45 cm), a więc podobnie jak SMOS i SMAP, stąd odbiorniki GPS są potencjalnie źródłem danych do szacowania fluktuacji wilgotności gleby *in situ* w jej wierzchniej warstwie rzędu 0–7 cm [Larson i in. 2010]. Pomiar taki jest realizowany poprzez porównanie poziomu sygnału pochodzącego bezpośrednio z satelity z drugim – odbitym od powierzchni ziemi. Do przeprowadzenia tego pomiaru wymagane jest zastosowanie anten kierunkowych. Charakterystyka odbitego sygnału zmienia się, gdy zmienia się stała dielektryczna gleby, wynikająca z jej wilgotności [Larson i in. 2008a i b]. Na dokładność szacunków wpływają również nierównomierność powierzchni gleby (szorstkość) i szata roślinna [Al-Khadali i in. 2018]. Bezpośredni sygnał z satelity GNSS i sygnał odbity od gruntu są jednocześnie odbierane przez antenę i sumują się z obserwowaną mocą sygnału. W typowych zastosowaniach GPS sygnały odbite – sygnały wielościeżkowe (ścieżka bezpośrednia i ścieżka odbita od ziemi) są źródłem błędów [Larson i in. 2007]. Jednak ten wielościeżkowy sygnał może mieć zastosowanie do badań wilgotności gleby. Rejestrowane odbicia sygnału od gleby rozpoczynają się w odległości ok. 70 m od anteny naziemnej i wraz ze zmianą lokalizacji satelity zbliżają się do anteny na odległość ok. 2 m. Rejestrowana ścieżka ma zatem długość ok. 70 m i szerokość ok. 4 m, co daje możliwość opomiarowania powierzchni rzędu 300 m². Zależy to jednak od wysokości zamontowania anteny na maszcie [Masters i in. 2000, Larson i in. 2010]. Do zamontowania anteny można wykorzystać system antenowy przeznaczony do pomiarów sygnału odbitego [Katzberg i in. 2006]. Można też posłużyć się istniejącym używanym do innych celów oprzyrządowaniem GPS, zaprojektowanym do tłumienia wielościeżkowego [Larson i in. 2008a]. Ma to istotne znaczenie, zważywszy na fakt, iż obecnie na świecie do celów lokalizacyjnych eksploatuje się ponad 5000 odbiorników GPS, a te zlokalizowane poza obszarem gęstej zabudowy i nieodcięte od sygnału odbitego przez drzewa, budynki i góry mogą monitorować wilgotność gleby, uzupełniając globalne bazy danych [Bogena i in. 2015, Xu i in. 2018]. Trzeba zaznaczyć, że w badaniach nad przedmiotową metodą można wykorzystać nie tylko anteny GPS, lecz także anteny sieci BeiDou-R w Chinach [Li i in. 2018]. Na chwilę obecną możliwości zastosowania tych metod w praktyce rolniczej są bardzo ograniczone. Trwają jednak prace nad mobilnymi systemami GNSS-R przeznaczonymi do pomiaru wilgotności gleby z wykorzystaniem między innymi dronów z deklarowaną rozdzielczością mapowania rzędu 50 × 50 m [<https://cordis.europa.eu/project/rcn/193835/reporting/en>].

2.2.2.2.4. Detekcja neutronów kosmogenicznych – CRNP

W zasadzie idea pomiaru wilgotności gleby bazującego na detekcji neutronów kosmogenicznych jest podobna jak w przypadku sond neutronowych, tj. polega na ustaleniu liczby termolizowanych neutronów z tą różnicą, że źródło pochodzenia neutronów szybkich jest naturalne, a więc o nieporównywalnie większym rozproszeniu.

Do Ziemi dociera pierwotne promieniowanie kosmiczne o korpuskularnej naturze w postaci protonów (ok. 87%), jąder helu – promieniowanie α (ok. 11%), jąder innych pierwiastków (ok. 1%). Znikomą część strumienia promieni kosmicznych stanowią elektrony, a także kwanty gamma. Są to cząstki o bardzo dużych energiach, przemieszczające się z bardzo dużą prędkością. Natężenie promieniowania kosmicznego wzrasta wraz z odległością od powierzchni ziemi [Hess 1912] do wysokości 16 km powyżej ulega wahaniom, a stabilizuje się na pułapie 50 km. Wynika to z tego, że promieniowanie kosmiczne jest silnie pochłaniane przez atmosferę za przyczyną kolizji jego korpuskuł z atomami gazów atmosferycznych, głównie azotu i tlenu. W wyniku tych zderzeń powstają między innymi wysokoenergetyczne neutrony stanowiące promieniowanie wtórne. Zatem nie jest to już bezpośrednio promieniowanie kosmiczne, a promieniowanie kosmogeniczne. Część szybkich neutronów ulega spowolnieniu i neutralizacji, ale część dociera do powierzchni ziemi, a nawet w nią wnika [Głas 2015, Zreda i in. 2015]. Można zatem określić ilościowo zjawisko przenikania szybkich neutronów przez glebę, umieszczając w niej stosowny detektor na pewnej głębokości. Ilość przenikających glebę neutronów zależy od zawartości w niej wody: im jest jej więcej, tym więcej neutronów szybkich jest spowalnianych przez jądra wodoru (patrz podrozdział 2.2.3) Stało się to podstawą dla punktowych pomiarów wilgotności gleby za pomocą detektora promieniowania kosmogenicznego [Kodama i in. 1985].

Hendick i Edge [1966] wykazali, że liczba szybkich neutronów nad powierzchnią gleby jest ujemnie skorelowana z jej wilgotnością. Neutrony szybkie przenikają powierzchnię gleby, ale w wyniku zderzeń sprężystych (patrz podrozdział 2.2.3) z atomami innymi niż atomy wodoru część z nich wydostaje się z powrotem nad jej powierzchnię. Jak już wyjaśniano wcześniej, zderzenia z jądrami wodoru całkowicie wyhamowują szybkie neutrony dezaktywując je, a te nie wydostają się na powierzchnię [Zreda i in. 2012]. Dlatego wraz ze wzrostem wilgotności gleby maleje ilość oznaczonych neutronów szybkich nad powierzchnią gleby. Stąd umieszczenie detektorów ponad powierzchnią pozwoliło na uśrednione pomiary wilgotności gleby z większej powierzchni, tj. w promieniu ok. 300 m od sondy. Promień ten praktycznie nie jest zależny od wilgotności gleby, ale jest liniowo proporcjonalny do wysokości czujnika nad ziemią dla wysokości do 125 m. Stwierdzono również, że średnica maleje o 40 m na każde zwiększenie się wilgotności powietrza o $0,01 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Zreda i in. 2008, 2012, Desilets i Zreda. 2013]. Sondy takie w literaturze określa się skrótem CRNP (*Cosmic-Ray Neutron Probes*). Znamienne jest to, że za pomocą metod punktowych (poza neutronową) woda w stałym stanie skupienia nie jest oznaczana prawidłowo, natomiast w przypadku metody przedmiotowej oznaczana może być nie tylko woda zamrożona w glebie, lecz także woda zawarta w zalegającej na powierzchni warstwy śniegu [Desilets i in. 2010]. Niestety sondy CRNP wskazują uśrednioną wartość dla opomiarowanego obszaru – uśrednioną też dla warstwy gleby, której miąższość jest zmienna. W warunkach wilgotnych wynik uśredniany jest dla warstwy gleby rzędu 12 cm, a w warunkach

bardzo suchych – ok. 70 cm [Zreda i in. 2015]. Pomiary promieniowania kosmicznego mogą również być wykorzystywane do monitorowania wilgotności gleby w większej skali, tj. rzędu 12×12 km [Franz i in. 2015].

Sondy CRNP są wyposażone w dwa liczniki neutronów. Jeden to ekranowana polietylenem rurka wypełniona ^3He (pomiaru szybkich neutronów) – do pomiaru wilgotności gleby. Drugi nieosłonięty licznik do pomiaru neutronów spowolnionych – do pomiaru wody powierzchniowej (np. w śniegu, w roślinach) [Zreda i in. 2015]. Wymagana jest stosowna kalibracja sond CRNP – specyficzna dla opomiarowanego przez pomiary punktowe miejsca [Desilets i in. 2010]. Można jednak zastosować uniwersalną funkcję kalibracyjną [Franz i Zreda. 2013] przydatną zwłaszcza do pomiarów mobilnych COSMOS Rover [Chrisman i in. 2013]. Opracowano również korektę na roślinność, która również jest źródłem wodoru termolizującym neutrony [Baatz i in. 2015].

2.2.2.2.5. Monitoring promieniowania gamma

Gleba emituje naturalne promieniowanie gamma w sposób ciągły ze względu na radioaktywny rozpad zawartych w niej śladowych ilości radioaktywnych izotopów ^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th . Intensywność tego promieniowania (tłumienie) zmienia się w czasie na skutek zmian gęstości materiału, przez który przechodzi. Zmiany gęstości gleby wynikają w znacznej mierze ze zmiany jej wilgotności (patrz punkt 2.2.1.3) [Minty 1997]. Trzeba jednak liczyć się z tym, że teledetekcja wilgotności gleby opierająca się na detekcji promieniowania gamma będzie musiała uwzględniać jego tłumienie przez pokrywą roślinną, co wymaga stosownych korekt [Dierke i Werban 2013, Baldoncini i in. 2019], choć zdaniem Loijensa [1980] do kalibracji wystarczy jeden pomiar referencyjny dla znanej wilgotności. Każda uprawa ma inne zwarcie ładu, co znacznie utrudnia wykorzystanie tej metody do mobilnej teledetekcji wilgotności gleby. Kolejną przeszkodą jest zmienność przestrzennego rozkładu ilościowego izotopów promieniotwórczych. Zatem bardziej uzasadnione są stacjonarne pomiary wilgotności gleby opierające się na przedmiotowej metodzie. Do ich przeprowadzenia wymagane jest zainstalowanie na polu stosownej stacji pomiarowej [Yoshioka 1989]. Grubość warstwy gleby, z której uśredniany jest pomiar wilgotności, zależy od jej wilgotności. Przy małej wilgotności miąższość opomiarowanej warstwy jest rzędu 15–24 cm (zależnie od jej gęstości), w warunkach dużego uwilgotnienia wynosi ok. 12–14 cm [Loijens 1980].

Metoda oceny wilgotności gleby przez oznaczanie tłumienia naturalnego promieniowania gamma litosfery jest ciekawą koncepcją ze względu na możliwość wykorzystania stosunkowo tanich liczników Geigera-Müllera. Niewiele jest jednak doniesień literaturowych w tym zakresie.

2.2.3. Metoda organoleptyczna

Każdy rolnik potrafi intuicyjnie na podstawie oglądu pola (gleby i roślin) szacować wilgotność gleby. Odczucia sensoryczne trudno uznać za pomiar,

jednak umożliwiając one wstępną ocenę wilgotności gleby. Uzyskane dane nie mają wartości liczbowych i wyrażone są w czterostopniowej (lub innej) skali porządkowej. Zalety tej metody to beznakładowość i szybkość wykonania oraz – dla znanej zmienności glebowej – możliwość odniesienia do większej powierzchni. Za pomocą metody organoleptycznej można uzyskać informacje orientacyjne. Jest to najczęstszy sposób oceny wilgotności i w praktyce informacje te wykorzystuje się do podejmowania decyzji produkcyjnych. Podstawową wadą jest subiektywność oceny, co wiąże się z dużym marginesem błędu trudnego do oszacowania i dużym ryzykiem podejmowania niewłaściwych decyzji. Jednak wieloletnie doświadczenie rolników pozwala im zwykle dobrze szacować wilgotność gleby na swoich polach. Ocena organoleptyczna dotyczy zazwyczaj wierzchniej warstwy gleby, szacunki dla większych głębokości wiążą się z koniecznością wykonania czasochłonnej odkrywki glebowej. W zasadzie są to wielocechowe oceny punktowe, ale jeśli dotyczą tylko wizualnej oceny na podstawie zmiany zabarwienia pola lub/i roślin, można je uznać za przestrzenne i telemetryczne, gdyż nie ma bezpośredniego kontaktu receptora z badaną powierzchnią – dlatego na rysunku 2 tak ją sklasyfikowano. Przykładowe kryteria oceny wilgotności gleby przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Kryteria wielocechowej organoleptycznej oceny stanu uwilgotnienia gleby

Cecha	Gleba			
	sucha	lekko wilgotna	wilgotna	mokra
Odcień jasny	tak	nie	nie	nie
Ciemnieje przy nawilżaniu	tak	nie	nie	nie
Ciepła w dotyku	tak	nie	nie	nie
Chłodna w dotyku	nie	tak	tak	tak
Przy rozcieraniu pyli	tak	nie	nie	nie
Powoduje nawilżanie bibuły	nie	nie	tak	tak
Możliwość formowania	nie	nie	tak	tak
Uwalnianie wody przy ścisnaniu w dłoni	nie	nie	nie	tak

Opracowanie własne na podstawie [Gąsior i in. 2013].

2.3. SONDY I SYSTEMY POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY W PRAKTYCE ROLNICZEJ I W DOŚWIADCZALNICTWIE

Pomimo że jest wiele technik umożliwiających pomiar wilgotności gleby, w praktyce rolniczej mają one nadal bardzo ograniczone zastosowanie. Rolnictwo precyzyjne opiera się na mapach obrazujących zróżnicowanie przestrzenne fizykochemicznych właściwości gleby w skali pola. Z przedstawionych niedestrukcyjnych metod pomiaru wymaganą rozdzielczość map w dowolnym terenie zarówno do rolnictwa precyzyjnego, jak i dla doświad-

czalnictwa rolniczego, można uzyskać jedynie z wykorzystaniem metod: GPR-S i GPR-AC. Niestety są to metody bardzo pracochłonne, nie zapewniają ciągłości czasowej, a opracowanie danych w postaci map wymaga znacznych umiejętności. Za pomocą metody CRNP, GNSS-R, MPG można otrzymać uśrednione wyniki dla pewnego obszaru wokół miernika, co nie zapewnia ani mobilności, ani wystarczającej rozdzielczości. Ponadto koszty tych metod [Bogena i in. 2015] rzędu tysięcy czy dziesiątek tysięcy euro wykraczają daleko poza zakres ekonomicznej opłacalności. Dyskusyjna jest również dokładność takich pomiarów prezentowana we wskazanym przeglądowym opracowaniu. Dokładność rzędu 2–3% objętościowych jest jedynie szacunkiem uśrednionego wyniku ze stosunkowo dużego areału i w poszczególnych miejscach pola rzeczywiste wartości mogą być bardzo różne. Dzięki tym metodom można stosunkowo dobrze oddać dynamikę zmian wilgotności, ale bez odniesienia do fizycznych kalibracyjnych pomiarów punktowych trudno mówić o wskazanym poziomie dokładności. Uzyskania rozdzielczości wymaganej przez rolnictwo precyzyjne (kilkudziesięciu metrów kwadratowych) nie zapewniają również przeprowadzenie pomiarów MWR, nawet po zastosowaniu modelowych opcji jej zwiększenia. Skala rzeczywistego pomiaru wilgotności gleby jest często różna od skali modelowania, co generuje duże nieścisłości między symulacjami a obserwacjami [Teuling i in. 2006]. Choć ze względu na coraz wydajniejsze narzędzia informatyczne następuje ciągłe zwiększanie możliwości modelowania, to technika rzeczywistych pomiarów nie dotrzymuje im kroku, zwłaszcza w skalach pól produkcyjnych. Dla wszystkich przestrzennych metod oceny wilgotności gleby przeszkodą są rosnące na polu rośliny. Uniemożliwiają one wykonanie pomiaru albo zmniejszają jego wiarygodność. Stąd ze względów praktycznych obecnie zastosowanie żadnej metody nie pozwala na spełnienie wymagań, jakie stawia rolnictwo precyzyjne; tym bardziej – wymagań dotyczących doświadczalnictwa polowego. Pomiar przestrzenne wymagają na ogół odniesień kalibracyjnych, jakie mogą zapewnić pomiary punktowe w reprezentatywnych miejscach pola. Ze względu na znaczną zmienność właściwości gleby w obrębie pola uprawnego takich punktów musi być bardzo dużo, a sondy powinny działać w sposób ciągły i bezprzewodowy, co jest wprawdzie technicznie możliwe, ale ekonomicznie nieuzasadnione w produkcji roślinnej, realizowane jednak w doświadczalnictwie polowym. Niemniej nawet niepełne pod względem przestrzennym informacje o wilgotności gleby mogą być podstawą do podjęcia właściwych decyzji w roślinnej produkcji polowej. W tej perspektywie interesujący jest rozwój wskazanych technik pomiarowych zarówno przestrzennych, jak i punktowych. Ze względu na koszty sondy punktowe przy odpowiedniej znajomości zmienności glebowej pól, a tym samym – przy właściwym doborze referencyjnych punktów pomiarowych mogą mieć obecnie szersze zastosowanie w rolnictwie.

2.3.1. Funkcjonalność sond

Punktowe metody pomiaru mogą znaleźć niemal bezpośrednio przeniesienie do produkcji roślinnej bazującej na homogenicznych podłożach bezglebowych stosowanych w ogrodnictwie i być doskonale wykorzystywane w tych warunkach, dając miarodajne wyniki stanowiące podstawę automatyzacji systemów nawadniających. W produkcji polowej – jak już wspomniano – zmienność glebowa powoduje znaczne ograniczanie ich zastosowania. Nie zmienia to faktu, że decydując się na zastosowanie którejś z metod pomiarowych, trzeba poznać możliwości i ograniczenia sond wykorzystywanych do ich realizacji. Dla każdej z metod można znaleźć wiele konkretnych rozwiązań technicznych w postaci sond wilgotności oferowanych na rynku. Każda z metod została już omówiona wcześniej, również w aspekcie jej funkcjonalności. Informacje te zestawiono jednak w tabeli 2. Dla niektórych metod w zależności od konkretnego modelu sondy możliwe są odpowiedzi tak lub nie (t/n). Dla przykładu, w zależności od modelu sondy TDR mogą wykonywać pomiary ciągłe przez cały okres wegetacji oraz jednorazowe, a inne tylko pomiary jednorazowe – każdy kolejny pomiar wymaga ręcznego uruchomienia. Pomijając koszty zakupu można stwierdzić, że najbardziej uniwersalne są sondy TDR i TDT. Cechuje je duża dokładność i mała wrażliwość na zasolenie, które można znaczyć za pomocą EC. W zależności od konkretnego modelu mogą być składowymi sieci pomiarowych i systemów sterujących nawadnianiem i zazwyczaj nie wymagają nadzoru i kalibracji. Mankamentem jest stosunkowo mała objętość gleby objęta pojedynczym pomiarem. Jednak ze względów praktycznych dla produkcji roślinnej najważniejszą cechą wszystkich sond jest ich ciągła, bezawaryjna praca niewymagająca nadzoru ani skomplikowanej obsługi wiążącej się z kalibracją i czynnościami eksploatacyjnymi.

Sensorami większości sond (TDR, TDT, FDR, HPP, DPHP) są na ogół różnego kształtu elementy w postaci szpilek o zróżnicowanych długościach i przekrojach. Wyniki pomiarów wilgotności gleby uśredniane są dla całej długości takiej szpilki. Zatem maksymalną miąższości warstwy gleby, jaką można opomiarować, wyznacza ich długość. Miąższość warstwy gleby można zmniejszyć przez umieszczanie szpilek nie prostopadle, ale pod skosem w stosunku do powierzchni pola. Ważna też jest możliwość oceny wilgotności nie tylko jednej warstwy gleby, ale całej strefy korzeniowej roślin rolniczych, podzielonej na kilka warstw. Do takich pomiarów przeznaczone są specjalne reflektometryczne sondy profilowe w postaci rury lub pręta z zamontowanymi pierścieniami. Te pierścienie są odpowiednikami falowodów sond szpilekowych. Para pierścieni oddalonych od siebie o kilka centymetrów umożliwia pomiar określonej warstwy gleby. Takich par jest kilka – zależnie od konkretnej sondy. Sondy profilowe wymagają zazwyczaj wprowadzenia do gleby rury pilotującej. Rury pilotujące można pozostawić na okres wegetacji w glebie, należy je jednak zabezpieczyć korkiem, umożliwia to wykonywanie pomiarów w wyznaczonych punktach za pomocą jednej sondy przekładanej do kolejnych rur. Sondy profi-

lowe na ogół nie są montowane na stałe w jednym miejscu, choć i takie rozwiązania są dostępne (np. sonda AM-100)⁷. Zamiast jednej sondy profilowej można umieścić na różnej głębokości kilka sond szpilkowych [Heimovaara 1993, Wraith i in. 2005].

Dosyć trudna do oceny jest dokładność metod pomiarowych. Wyniki doświadczalne wskazują na dość dużą dokładność większości metod pomiarowych po uwzględnieniu lub eliminacji źródeł błędów, co już opisano wcześniej w analizie każdej z nich. Takie badania są zapewne podstawą deklaracji producentów poszczególnych sond w kwestii ich dokładności. Zestawienie takie przedstawili w przeglądowym opracowaniu Robinson i in. [2008]. Wspomniani autorzy przeanalizowali też objętość opomiarowanej gleby dla różnych sond. Trzeba jednak wziąć pod uwagę dokładność, jaką można uzyskać w praktyce pomiarów polowych, wynikającą zarówno z teoretycznej dokładności metody pomiarowej (zależnej od poprawności kalibracji i wrażliwości na właściwości fizyko-chemiczne gleby), z objętości próbki, jak i z wpływu takich czynników, jak wrażliwość na słaby kontakt z glebą elementów receptorowych sond czy umiejętność obsługi. Nie ma możliwości, żeby wyrazić to liczbowo, stąd w prezentowanym zestawieniu tabelarycznym zdecydowano się dokonać arbitralnej oceny w skali porządkowej.

⁷ www.inventia.pl.

Tabela 2. Charakterystyka punktowych metod pomiaru wilgotności gleby

Metoda	Pomiar				Konieczność			Mozliwość			Wrażliwość na		Objętość badanego punktu	Dokładność
	parametr	ciągły	jednorazowy	profilowy	kalibracji	nadzoru	tworzenia sieci	automatyzacji	pomiaru EC _s temperatury	zasolenie	słaby styk gleba – czujnik			
Grawimetryczna	masa	n	t	n	n	t	n	n	n,n	brak	-	mała	mała	walidacyjna
TDR, TDT	objętość	t/n	t	t/n	t/n	t/n	t/n	t/n	t,t	mała	mała	mała	mała	duża
FDR – pojemnościowa	objętość	t/n	t	t/n	t/n	t/n	t/n	t/n	t,t	średnia	mała	mała	mała	średnia
Prom. jonizujące	objętość	n	t	t	t	t	n	n	n,n	brak	mała	mała	duża	b. duża
Termiczna	objętość	t/n	t	n	t	t	t/n	t/n	n,t	brak	średnia	b. mała	b. mała	średnia
PMG – Opornościowa	potencjał	t	n	n	t	n	t	t	n,t	duża	duża	mała	mała	mała
PMG – Tensjometryczny	potencjał	t	n	n	n	t	t/n	t/n	n,n	brak	duża	mała	mała	duża
PMG – FDR	potencjał	t	n	n	n	n	t	t	n,t	średnia	duża	mała	mała	średnia/duża

t – tak, n – nie, - – nie dotyczy, PMG – potencjał matrycowy gleby

Źródło: opracowanie własne.

2.3.2. Sieciowe systemy monitoringu

Sondy używane do punktowego pomiaru wilgotności gleby mogą służyć do wykonywania pojedynczych pomiarów lub do ciągłego monitoringu wilgotności gleby w jednym punkcie. Właśnie to drugie rozwiązanie wykorzystuje się do tworzenia sieci monitoringu wilgotności gleby. Obecnie zastosowanie mają dwie podstawowe technologie, tj. sieci przewodowe i bezprzewodowe.

Typowa sieć przewodowa składa się z sond wilgotności połączonych z multiplekserem, który dokonuje analizy sygnału z sond i w postaci danych przesyła je do czytnika danych wyposażonego w nośnik pamięci. Niezbędne w takim systemie jest też centralne źródło zasilania całego systemu, na które w warunkach polowych mogą składać się akumulator i panel fotowoltaiczny. Charakterystykę takiego rozwiązania można znaleźć w pracach Skieruchy i in. [2012] czy Skieruchy i Wilczka [2007]. W systemach omówionych przez przytoczonych autorów zastosowano jednak bezprzewodową transmisję danych zapisywanych na nośniku pamięci do serwera internetowego. W zakresie sieci przewodowych podstawowym ograniczeniem praktycznym monitoringu określonego obszaru jest możliwa do zastosowania długość kabli. Na przedmiotowe ograniczenie składają się straty i zakłócenia sygnału przesyłanego z sondy do multipleksera oraz możliwości praktycznego rozmieszczenia sieci przewodów w terenie. Przewody ze względu na szereg prac agrotechnicznych powinny być zakopane w ziemi, co w niektórych badaniach może być źródłem błędów doświadczeń rolniczych. Niezależnie od tego, czy kable będą usytuowane pod powierzchnią gleby czy też na niej, powinny być umieszczone w elastycznych rurach osłonowych ze względu na możliwość ich uszkodzenia przez zwierzęta polne lub narzędzia uprawowe [Wraith i in. 2005, Vereecken i in. 2014].

Praca Ojha i in. [2015] to najszersze przeglądowe opracowanie dotyczące bezprzewodowych technologii stosowanych w rolnictwie. Obecnie dostępne technologie bezprzewodowe umożliwiają projektowanie bezprzewodowych sieci monitoringu – WSNs (*Wireless Sensor Network*) wilgotności gleby. Wyróżnić można sieci naziemne – TWSN (*Terrestrial Wireless Sensor Networks*) oraz sieć podziemną – WUSN (*Wireless Underground Sensor Networks*). Podstawowym elementem takiego systemu są rozmieszczone w polu zasilane bateryjnie sondy łączące się między sobą lub/i z innymi elementami systemu za pomocą nośnika bezprzewodowego. Zasadnicza różnica polega na tym, że w systemach podziemnych sondy umieszczone są całkowicie pod ziemią, nawet do dwóch metrów głębokości, dzięki czemu nie są narażone na uszkodzenia mechaniczne w trakcie prac polowych, a także odbywać się może nieprzerwany monitoring przez cały okres wegetacji. W rozwiązaniach naziemnych przynajmniej część sondy z nadajnikiem znajduje się nad powierzchnią ziemi, co wiąże się z oczywistymi ograniczeniami związanymi z możliwością ich uszkodzenia. Podstawowym jednak mankamentem sond podziemnych jest zdecydowanie mniejszy zasięg komunikacji, co w konsekwencji wymaga gęstszej, a zatem droższej sieci przekaźników (bram sieciowych). Problemy niektórych

sieci bezprzewodowych to także większy pobór energii i brak możliwości dola-dowania w trakcie użytkowania.

2.3.3. Regulacja wilgotności podłoża w doświadczeniach wazonowych

Doświadczenia wazonowe są jedną z metod doświadczalnictwa rolniczego, umożliwiającą poznanie zjawisk niemożliwych do właściwego zinterpretowania w warunkach polowych. Niektórzy autorzy uważają, że doświadczenia wazo-nowe są tanie i technicznie łatwe do wykonania [Lu i in. 2018]. W rzeczywisto-ści metodologia doświadczeń wazonowych jest bardzo złożona [Żurbicki 1974]. Doświadczenia wazonowe w halach wegetacyjnych to jedne z najbardziej pra-cochłonnych i kosztownych doświadczeń. Najbardziej problematyczne pod względem metodycznym jest utrzymanie wilgotności podłoża na zakładanym poziomie.

Jeśli dostępność wody nie jest czynnikiem doświadczalnym, to we wszyst-kich wazonach powinna ona być jednakowo dostępna dla roślin, a im większa precyzja w tym zakresie, tym mniejszy błąd doświadczalny, dzięki czemu moż-liwe jest właściwe wnioskowanie. Zarówno precyzja w obrębie powtórzeń, jak i dokładność w rozumieniu określenia zróżnicowania poziomów czynnika są szczególnie istotne w przypadku, gdy czynnikiem tym jest dostępność wody. Niestety pomimo że publikacji badań opartych na doświadczeniach wazonowych jest bardzo wiele, to w metodykach autorzy zazwyczaj bardzo lakonicznie podają, na jakim poziomie była utrzymywana wilgotność, i nie precyzują sposobu, w jaki to zrealizowano. Wydaje się, że aspekt utrzymania wilgotności na zakładanym poziomie jest tak oczywisty, że nie wymaga dodatkowych wyjaśnień w metodyce publikowanych opracowań. Praktyka doświadczalna wskazuje, że tak nie jest, a rzeczywista wilgotność podłoża może znacznie odbiegać od zakładanej.

W problemie regulacji wilgotności podłoża w wazonach należy rozpatrzyć dwa wiążące się ze sobą aspekty. Pierwszy to sposób aplikacji wody do wazonu. Drugi – metoda ustalenia jej ilości. Klasyczne podejście w metodologii doświad-czeń wazonowych to regulacja wilgotności podłoża przez podlewanie powierzch-niowe lub przez podsiąk kapilarny do określonej masy wazonu. Mając na uwadze, że czynniki doświadczalne różnicują biomasę roślin, oraz to, że jedno doświad-czenie może obejmować kilkadziesiąt, a nawet kilkaset wazonów doświadczal-nych, można stwierdzić, że wagowe ustalanie i dawkowanie wody ma wiele mankamentów.

Odnosząc się do polowej pojemności wodnej określanej wagowo, należy korygować ilość dostarczanej masy wody o przyrost biomasy roślin. Pociąga to za sobą konieczność stosowania większej liczby powtórzeń i sukcesywnego ich zmniejszania, ponieważ pomiary biomasy mają charakter destrukcyjny [Lee i Son 2019]. Trzeba też zauważyć, że świeża masa roślin zależy od pory dnia i zmienia się w zależności od pogody i warunków uprawy [Ueda i Nakamura 2007], więc korekty takie wykonywane na dużej liczbie obiektów mogą być obarczone błędem wynikającym z długiego czasu, którego wymaga sama tech-

nika pomiaru. Korekty nie dokonuje się ponadto w sposób ciągły, lecz co pewien czas, stąd nie zachowuje się ciągłości zakładanej wilgotności. Wprawdzie są metody szacowania ciągłego przyrostu biomasy roślin [Chen i in. 2016, Kim i in. 2016], ale nie nadają się one do stosowania w warunkach doświadczeń wazonowych – z podłożem, w którym dynamicznie zmienia się wilgotność. W celu wyeliminowania skokowości przedmiotowych korekt praktykuje się wprawdzie modele teoretycznych przyrostów biomasy, ale są to metody szacowania na podstawie informacji ogólnych, natomiast nie wiadomo, jak w rzeczywistości wprowadzony czynnik będący przedmiotem testów doświadczalnych wpłynie na dynamikę przyrostu biomasy; poza tym dotyczą one tylko niektórych gatunków roślin [Katsoulas i in. 2015, Martinez-Ruiz i in. 2019]. W trakcie wegetacji połowa pojemność wodna zmienia się ponadto na skutek naturalnego osiadania podłoża w wazonie oraz przerastania go przez system korzeniowy roślin, a takich korekt uwzględnić się nie da. Ten aspekt wydaje się najpoważniejszym zarzutem wobec wagowej regulacji wilgotności podłoża.

Dość często dążenie do utrzymania wilgotności podłoża w wazonach na zakładanym poziomie dla różnych obiektów doświadczalnych nie jest realizacją warunku równej dostępności wody dla roślin. Jeżeli dwa wazony wskutek działania czynnika doświadczalnego (innego niż dostępność wody) różnią się masą rosnących w nich roślin, to różna transpiracja może powodować, że do utrzymania tej samej wilgotności podłoża w obu wazonach będzie potrzebna inna ilość aplikowanej wody. Wówczas wilgotność podłoża w tych wazonach będzie taka sama, ale ilość wody dostępnej dla roślin – różna. Takie utrzymywanie wilgotności podłoża ogranicza możliwości odnoszenia wyników doświadczeń wazonowych do warunków polowych, w których rośliny o większej transpiracji szybciej zubażają zapasy wody w glebie, mimo iż początkowo dostęp do wody miały wszystkie taki sam. W obrębie rozważnego problemu trzeba wziąć jeszcze pod uwagę to, że pomimo wypełnienia wazonów jednolitym (homogenizowanym) podłożem glebowym, pojemność wodna podłoża ulegać może sporym wahaniom pomiędzy wazonami, związanym z rozrostem różnej masy korzeni i różną częstotliwością podlewania. Rośliny jednak (w uproszczeniu) potrzebują określonej objętości wody do wyprodukowania jednostki biomasy, jeśli więc nawet w wazonach będzie równa wilgotność podłoża pod względem polowej pojemności wodnej, ale różna ilość wody dozowanej w celu jej utrzymania, to skutkiem może być niepożądana zmienność zwiększająca błąd doświadczenia. Implikuje to błędy, zwłaszcza jeśli na czynnik wodny nakładają się czynniki istotnie wpływające na przyrost biomasy i gospodarkę wodną roślin. Rozwiązaniem alternatywnym do przedstawionego jest dostarczanie określonej objętości wody, takiej samej do wszystkich wazonów, której ilość ustala się poprzez uśrednienie opomiarowanej wilgotności podłoża w grupie obiektów nieróżniących się pod względem poziomu czynnika wodnego.

W doświadczeniach wazonowych zastosowanie mogą znaleźć różne typy pojemników wypełnionych podłożem, nazywanych wazonami doświadczalnymi lub wazonami wegetacyjnymi. Wazon doświadczalny powinien być tak

skonstruowany, aby zaaplikowanie wody pozwalało na równomierne jej rozprowadzanie w całej objętości podłoża. W doświadczalnictwie rolniczym najpowszechniej stosowane są wazony typu Mitscherlicha lub Kocha. Ze względów praktycznych w krajowych stacjach doświadczalnych najszerze zastosowanie znalazły plastikowe wazony typu Kocha. Wazon taki składa się z czarnego wazonu wewnętrznego – bez dna, ale z ryflowaną dolną krawędzią, oraz białego wazonu zewnętrznego; pomiędzy ścianami obu części jest pusta przestrzeń, do której dozowana jest woda. Biały kolor chroni przed nadmiernym nagrzewaniem, czarny przed przenikaniem światła do korzeni. Pusta przestrzeń między wazonami ma dość dużą objętość, dzięki czemu można szybko dozować większą ilość wody, która powoli, od dna wazonu, podsiąkowo przemieszcza się w podłożu. Istnieją również inne konstrukcje wykorzystujące to rozwiązanie [Spray 2007]. Niestety zastosowanie wyłącznie podsiąkowego systemu aplikacji wody nie zapewnia równomiernego uwilgotnienia całej objętości podłoża. Świercz i Słomkiewicz [2015] opracowali wazon o bardziej złożonej budowie, co miało lepiej rozwiązać ten problem. Autorzy zaprojektowali wazon ze specjalnymi dyszami nawadniającymi i z dyszami powietrznymi – z możliwością odprowadzenia nadmiaru wody. Literatura przedmiotu dostarcza innych rozwiązań w tym zakresie, np. Szulc [2007] zaproponował, aby w wazonie woda podawana była przez rurkę do perforowanego zbiornika umieszczonego na jego dnie. Woda do wazonu może być doprowadzana przez rurkę z otworami w przypadku rozwiązania zaproponowanego przez Jean [2003 i 2008]. W sytuacji braku osłony chroniącej przed opadami deszczu można zastosować trójwarstwowe wazony umożliwiające odpływ nadmiaru wody oraz zabezpieczające przed nadmiernym nagrzewaniem podłoża – zgodnie z koncepcją Rafel [2006].

Problemem jest fizyczne zapewnienie dokładnego utrzymywania ściśle określonej wilgotności podłoża na pożądanym poziomie indywidualnie dla każdego wazonu. Wazon z podłożem i roślinami może mieć masę od kilku do kilkunastu kilogramów. Metoda wagowa jest niezwykle pracochłonna, ponieważ trzeba codziennie podlewać każdy wazon osobno (nawet kilka razy dziennie w upalne dni przy dużej biomase roślin w wazonach). W praktyce polega ona na podnoszeniu i ważeniu każdego z nich. Wprawdzie można zainstalować wagę na różnego rodzaju mniej lub bardziej zautomatyzowanych chwytakach unoszących i jednocześnie ważących wazony, nie zmienia to jednak faktu, że z każdym wazonem trzeba postępować indywidualnie, a całe doświadczenie wymaga ciągłego nadzoru. Częste przestawianie wazonów podczas ważenia powoduje, że rośliny są uszkodzane, a ich wzrost – zakłócany. Istnieją rozwiązania automatyczne stosowane w ogrodnictwie, np. doniczki zawieszane na dozownikach reagujących na ich masę. Woda dostarczana jest indywidualnie do doniczek przez zawór, który w zależności od zmian ich masy zamyka się lub otwiera. W opisach patentowych [Spelt 1997, Muxlow 2005, Jonson i in. 2016] można znaleźć różne warianty takich rozwiązań, które mogą być adaptowane do tego właśnie celu. Są to jednak na ogół bardzo proste rozwiązania przydatne do celów produkcji ogrodniczej, niegwarantujące precyzji wymaganej w doświad-

zeniach wazonowych. Szczególnym problemem jest dozowanie wody – jego kalibracja i korekta zależnie od zmiany masy wazonu. Podwieszanie wazonów na hakach wiąże się ponadto z nadmierną ekspozycją całego wazonu na insolację i nadmierny wzrost temperatury bryły korzeniowej.

Sposobem samoczynnej regulacji wilgotności podłoża, polegającym na zmianie masy wazonu, wykorzystywanym w doświadczeniach wazonowych, jest metoda zaproponowana przez Wang i in. [2014]. Obok wazonu wegetacyjnego na podwyższeniu stawia się pojemnik z zaworem, wypełniony wodą. Wazon ustawia się poniżej na wadze sprężynowej. Platforma wagi połączona jest ramieniem przegubowym z zaworem. Zmiana napięcia sprężyny za pomocą przegubu otwiera lub zamyka wypływ wody z zasobnika, która grawitacyjnie przemieszcza się do wazonu. Różnice masy wazonu powodują, że zawór się zamyka i otwiera. Głównym problemem jest w tym przypadku kalibracja, dla jakiego napięcia sprężyny zawór ma się otwierać i zamykać. Zaletą jest możliwość dokładnego określenia, ile wody w trakcie wegetacji zużyto indywidualnie dla każdego wazonu. Rozwiązanie Gong i in. [2015] opiera się na tej samej idei – udoskonalono ją jednak: prosty mechanizm sprężynowy zastąpiono przesuwaną platformą ważącą wazon. Oba opisane powyżej sposoby wymagają zbudowania specjalnych, trwałych i dość skomplikowanych konstrukcji, co związane jest z generowaniem kosztów.

W praktyce rolniczej i ogrodniczej od wielu lat znalazły zastosowanie systemy samoczynnego nawadniania. Istotą tych rozwiązań jest wykorzystanie sprzężenia zwrotnego miernika wilgotności i elektrozaworu uruchamiającego nawadnianie. Stosowane są różne czujniki punktowe, które zamykają obwód elektryczny w przypadku wzrostu siły ssącej lub spadku wilgotności podłoża powyżej ustalonej wartości. Po zamknięciu obwodu elektrozawór podaje wodę do sieci nawadniającej. Elementami wydatkującymi wodę mogą być zraszacze lub kroplozniki. W produkcji roślinnej znalazły zastosowanie różnego rodzaju emitery sieci kropłujących, wśród nich są takie, które można montować w dowolnym miejscu sieci przewodów zasilających (online), i umożliwiające aplikowanie określonej ilości wody w ściśle określony punkt. Możliwości te wykorzystano w systemie nawadniania wazonów autorstwa Liu i in. [2015]. System podzielony jest na sekcje, każda sekcja działa niezależnie, łączy je wspólne źródło wody, system monitorujący/sterujący i zapisujący dane. Każda sekcja składa się z określonej liczby wazonów, przewodu, w którym zamontowane są emitery kropłowe aplikujące wodę do wazonów w tej sekcji, elektrozaworu i przepływomierza. Każdy wazon zasilany jest przez jeden emiter. Zakłada się, że każdy emiter ma taką samą wydajność, tj. wydatkuje taką samą ilość wody w jednostce czasu. Emisja wody do wszystkich wazonów w sekcji jest uruchamiana w zależności od zmiany masy wazonu referencyjnego. Każda sekcja ma po jednym wazonie referencyjnym. W miarę wysychania podłoża zmniejsza się masa wazonu referencyjnego, co rejestruje waga. Na podstawie ustawień sterownika masy minimalnej i maksymalnej wazonu referencyjnego danej sekcji elektrozawór otwiera lub zamyka wodę na tę sekcję. Każdy wazon w sekcji

otrzymuje taką samą co wazon referencyjny ilość wody. Założenie jest takie, że wazon w obrębie sekcji nawadniane są taką samą ilością wody jak pojedynczy wazon referencyjny stojący na wadze. To właśnie jest mankamentem tej metody, ponieważ ze względu na wiele czynników niekontrolowanych (zmiennosc osobnicza roślin, różnice stopnia zagęszczenia podłoża w wazonach itp.), będących źródłami błędu doświadczalnego, powinno się stosować powtórzenia, zwłaszcza dla wazonów referencyjnych. Mankamentem opisanego systemu jest również stosowanie tylko jednego kroplownika wydającego ciecz do wazonu. Kroplownik może w trakcie pracy zmienić wydajność aplikowanej wody na skutek choćby częściowego zatkania kapilary lub innych przyczyn (patrz podrozdział 3.2.1). Zgodnie z koncepcją autorów przewód był zakończony zaślepką, co przy większej liczbie wazonów, a tym samym – zwiększonej długości przewodu mogło powodować różnice ciśnień na jego początku i na jego końcu, a także różny czas startu emisji między pierwszym i ostatnim emiterym. Jak wskazano wcześniej, należy ponadto wprowadzać ciągłe korekty na przyrastającą biomasa roślin.

Przedstawione powyżej sposoby umożliwiają aplikację ustalonej objętości lub masy wody do wazonu, są jednak inne rozwiązania mające na celu podtrzymywanie wilgotności podłoża w wazonie. Można utrzymywać określony poziom wody (lub głębokość zanurzenia wazonu) w pojemniku, w którym umieszczony jest wazon – jak w rozwiązaniu [Liu i Zhang 2009]. Innym sposobem utrzymania wilgotności w wazonach jest postawienie wazonu powyżej poziomu wody większego pojemnika na aktywnej kapilarnie ramce (podkładce). Wówczas podsiąkiem kapilarnym woda jest doprowadzana do dna wazonu [Hedwing 2002, Emilio 2003]. W taki sposób trudno jednak różnicować wilgotność podłoża w wazonie do ustalonego poziomu. Można natomiast uzyskać trwałe utrzymanie wilgotności podłoża na niemal jednakowym poziomie we wszystkich jednostkach doświadczalnych. Jest to właściwe dla doświadczeń, w których wilgotność podłoża lub dawkowanie wody nie są czynnikami doświadczalnymi, a jedynie – tłem.

3. PRACE EKSPERYMENTALNO-PROJEKTOWE

3.1. Woda zawarta w korzeniach roślin a wilgotność gleby

Opisując w podrozdziale 2.1 rodzaje wody w glebie, pominięto wodę zawartą w układach biologicznych, tj. wodę zawartą w żywych częściach roślin i w innych organizmach żyjących w glebie. Okazuje się, że w przedstawionym przeglądzie literatury dotyczącym metod pomiaru wody w glebie brak odpowiedzi na fundamentalne pytanie: czy mierzona zawartość wody w glebie obejmuje tylko wodę zawartą w nieożywionej części gleby, bez wody zawartej w organizmach żywych (zwłaszcza w korzeniach roślin), czy też dotyczy wody zawartej zarówno w nieożywionych, jak i w żywych częściach gleby?

Odpowiedź na to pytanie ma duże znaczenie w kontekście dostępności wody dla roślin. Dylemat traci na znaczeniu, gdy pomiary wilgotności są dokonywane w glebie bez roślinności. Jeśli jednak pobiera się próbki ze strefy korzeniowej swartego ładu roślin lub dokonuje w nim pomiaru za pomocą sond, to uzyskane wyniki prowadzić mogą do błędnych wniosków. Utrzymywana w korzeniach roślin woda może istotnie zawyżać dane wilgotności gleby, bowiem jej faktyczna ilość w glebie będzie o wiele mniejsza. Przykładowo: w długotrwałym okresie bezopadowym w międzyrzędziu roślin pomiary wilgotności gleby mogą wskazywać mniejsze wartości niż w rzyosferze w rzędzie gęsto sianych roślin. Faktyczna ilość wody dostępnej dla roślin w rzędzie w rzeczywistości będzie jednak niższa niż w międzyrzędziu.

Aby uzyskać dokładne pomiary zawartości wody dla danego typu podłoża, konieczna jest kalibracja urządzeń pomiarowych. Kalibrację taką zwykle przeprowadza się na podłożu pozbawionym roślin, a więc i ich żywych korzeni o właściwym sobie uwodnieniu. Woda zawarta w systemie korzeniowym może jednak znacząco wpływać na odczyty stosowanych czujników, o czym donoszą na podstawie badań podłoża bezglebowych Kang i in. [2019]. Problem polega jednak na tym, że podstawowy sposób walidacji, jakim jest metoda grawimetryczna, uwzględnia zawartość wody w glebie zarówno w jej biotycznej, jak i abiotycznej części – wynika to z temperatury, w której dokonywane jest oznaczenie. Wszystkie pozostałe metody oznaczenia zawartości wody w glebie są walidowane grawimetrycznie, więc już z założenia nie są selektywne względem wody zawartej w organizmach żywych. Właściwie światowa literatura praktycznie nie podejmuje tej kwestii. W opisach metod pomiarowych brak jest wzmianek na ten temat. O tym, że za pomocą metod pośrednich mierzy się wodę zawartą zarówno w korzeniach roślin, jak i w części abiotycznej gleby, można domniemać po samym charakterze fizyki danego sposobu pomiaru. Analiza merytoryczna literatury wykonana przez autora wskazuje, że zjawiska fizyczne wykorzystywane do pośredniej oceny zawartości wody w glebie (dotyczy wszystkich obecnie

dostępnych metod) nie są selektywne względem wody zawartej w korzeniach roślin. Z przedmiotowej analizy wynika, że sposobem na zmierzenie wilgotności gleby, który może być rozwiązaniem tego problemu, jest pomiar potencjału matrycowego gleby. Jednak – jak wskazywano w części przeglądowej – w warunkach bardzo niskiej wilgotności podłoża realizacja tego pomiaru z użyciem standardowych tensjometrów może być niemożliwa ze względu na przekroczenie ich zakresu pomiarowego. W warunkach laboratoryjnych przydatna może być również tomografia komputerowa (NCT). Na podstawie tych spostrzeżeń postawiono hipotezę, że w warunkach niskiej wilgotności gleby woda zawarta w systemie korzeniowym roślin może istotnie zawyżać wyniki uzyskiwane z pomiarów pośrednich. Przeprowadzono więc badania polowe i laboratoryjne nakierowane na poznanie wpływu obecności korzeni roślin w warunkach niskiej wilgotności gleby na wyniki jej oznaczeń uzyskane za pomocą metody TDR i metody grawimetrycznej – jako najczęściej wykorzystywanych w badaniach.

3.1.1. Metodyka pomiaru wilgotności gleby z uwzględnieniem wody zawartej w korzeniach roślin

W celu zweryfikowania postawionej hipotezy przeprowadzono serię doświadczeń polowych i laboratoryjnych:

Doświadczenie 1

Pole doświadczalne obsiane żytem ozimym zlokalizowane było w punkcie 52°52'14,273"N i 17°55'18,383"E w warunkach gleby lekkiej o składzie granulometrycznym piasku słabo gliniastego. Żyto ozime wysiano w rozstawie rzędów 20 cm. W fazie krzewienia żyta (BBCH 22–25) na polu wyznaczono 30 punktów, w których wykonano pomiary wilgotności gleby. Punktem pomiarowym był odcinek rzędu o długości 10 cm, na którym rosło od trzech do pięciu roślin żyta, oraz przylegające do niego międzyrzędzie. W każdym punkcie dokonano dwóch pomiarów: w rzędzie i na środku międzyrzędzia. Na obszarze badań w okresie dwóch dekad przed wykonaniem oznaczenia wilgotności gleby nie odnotowano opadów atmosferycznych. Pomiary wykonano za pomocą sondy TDR 350 Soil Moisture Meter⁸ wg schematu:

- w punkcie pomiarowym rośliny żyta pozbawiono liści równo z powierzchnią gleby (aby podczas pomiaru nasada sondy miała bezpośredni kontakt z glebą),
- wprowadzono w glebę szpilki pomiarowe (długość 7,5 cm) sondy TDR tak, aby korzenie pozbawionych liści roślin znajdowały się pomiędzy szpilkami pomiarowymi, i wykonano pomiar,
- w tym samym punkcie pomiarowym na środku międzyrzędzia dokonano pomiaru sondą TDR – kontrola,
- analogiczne pary pomiarów wykonano w 30 punktach będących kolejnymi powtórzeniami,

⁸ [www.specmeters.com/asset/1/22/6435TDR_350_\(web\).pdf](http://www.specmeters.com/asset/1/22/6435TDR_350_(web).pdf).

- wyniki porównano statystycznie za pomocą testu t-studenta dla prób powiązanych. Obiektami były: wilgotność gleby części strefy korzeniowej żyta (miąższość 7,5 cm) – nazywana dalej strefą korzeniową, a także gleba bez korzeni – nazywana dalej kontrolą. Do analizy zastosowano program TIBCO Software INC. 2017. Statistica data analysis software system, version 12 [<http://statistica.io>].

Doświadczenie 2

Pole doświadczalne obsiane rzepakiem ozimym zlokalizowane było w punkcie 52°53'59,419"N i 17°54'2,319"E w warunkach gleby lekkiej o składzie granulometrycznym piasku gliniastego. Pomiar wilgotności gleby przeprowadzono w fazie 3–5 liścia rzepaku (BBCH 13–15). Punktem pomiarowym był odcinek rzędu roślin rzepaku o długości 10 cm, na którym rosły trzy rośliny rzepaku, oraz przylegające do niego międzyrzędzie. Pozostałe założenia metodyczne były identyczne jak w doświadczeniu nr 1.

Doświadczenie 3

Na polu opisanym w metodyce doświadczenia nr 1 pobrano próby gleby za pomocą stalowych cylindrów Kopecckiego średnicy 50 mm i objętości 100 cm³ wg schematu:

- rosnące na długości 10 cm rzędu rośliny żyta pozbawiono liści równo z powierzchnią gleby,
- w miejscu pozbawionych liści roślin pobrano cylinderkami próbki gleby do dalszych analiz,
- w bezpośrednim sąsiedztwie pobranej próbki gleby z korzeniami roślin (nazywanej dalej strefą korzeniową), na środku międzyrzędzia pobrano próbkę gleby bez korzeni (nazywaną dalej kontrolą),
- pobrano 12 próbek strefy korzeniowej z rzędów żyta i 12 cylindrów kontrolnych,
- po 6 próbek strefy korzeniowej i po 6 próbek kontrolnych umieszczono w suszarce i dokonano oznaczenia wilgotności z wykorzystaniem metody grawimetrycznej,
- z pozostałych 6 próbek wyizolowano korzenie żyta i określono ich świeżą masę. Glebę pozbawioną korzeni z tych próbek wsypano do cylindrów, zagęszczając tak, aby zajmowała objętość 100 cm³, i poddano ocenie wilgotności za pomocą metody grawimetrycznej, licząc się z tym, że po wyizolowaniu korzeni struktura gleby była już zmieniona,
- pozostałe 6 próbek kontrolnych, które stanowiły parę z próbkami zawierającymi korzenie żyta, wsypano z cylindrów, rozpulchniono (tak jak próbki, z których wyizolowano korzenie) i ponownie wsypano do cylindrów, zagęszczając tak, aby gleba zajmowała objętość 100 cm³,
- porównywane statystycznie za pomocą testu t-studenta dla prób powiązanych. Do analizy zastosowano program TIBCO Software INC. 2017. Statistica data analysis software system, version 12 [<http://statistica.io>].

Doświadczenie 4

Na polu doświadczalnym z rzepakiem ozimym, opisanym w metodyce doświadczenia nr 2, pobrano próby gleby za pomocą stalowych cylinderków o objętości 100 cm³ wg metody analogicznej do doświadczenia 3.

Doświadczenie 5

Na polu doświadczalnym z żytem ozimym, opisanym w metodyce doświadczenia nr 1, przeprowadzono pomiary wilgotności gleby za pomocą sondy TDR 350 Soil Moisture Meter wg metodyki:

- próbki gleby pobierano z rzędów roślin żyta,
- na długości 50 cm rzędu, równo z ziemią obcięto części nadziemne roślin,
- pobrano 8 próbek gleby wraz z korzeniami za pomocą cylindra metalowego (100 cm³),
- przesypano z cylindrów glebę do szklanego, wyskalowanego pojemnika (zlewki) o pojemności 1000 cm³,
- zagęszczono glebę w zlewce do objętości odpowiadającej łącznej objętości próbek pobranych w cylindrach, tj. 800 cm³ – obiekt nr 1,
- zmierzono wilgotność gleby w szklanym pojemniku za pomocą sondy TDR, używając szpilek pomiarowych długości 7,5 cm,
- wysypano glebę na matę i za pomocą sita odizolowano korzenie,
- przesypano tak odizolowaną glebę ponownie do szklanego pojemnika (zlewki),
- zagęszczono glebę w pojemniku do objętości wyjściowej i dokonano ponownego oznaczenia wilgotności miernikiem TDR – obiekt nr 2,
- ponownie przesypano na matę glebę i wymieszano ją z wcześniej odseparowanymi korzeniami,
- wymieszaną z korzeniami glebę ponownie przesypano do zlewki, zagęszczono do objętości wyjściowej i zmierzono wilgotność miernikiem TDR – obiekt nr 3,
- całą sekwencję wykonano w czterech powtórzeniach,
- dane poddano analizie wariancji jednoczynnikowej w układzie całkowicie losowym. Ocenę istotności różnic średnich wykonano za pomocą testu *post hoc* Tukeya przy $\alpha = 0,05$. Do analizy zastosowano program TIBCO Software INC. 2017. Statistica data analysis software system, version 12 [<http://statistica.io>].
- obiektami doświadczalnymi były:
 - 1) gleba zawierająca korzenie, pobrana ze strefy korzeniowej rzędów żyta (na rys. 9 – strefa korzeniowa),
 - 2) ta sama gleba co w obiekcie 1 po odseparowaniu korzeni żyta (na rys. 9 – gleba bez korzeni),
 - 3) gleba z obiektu 2 zmieszana z wcześniej wyizolowanymi korzeniami (na rys. 9 – gleba + korzenie).

W trakcie przesiewania gleba może przeschnąć, dlatego – aby dokonać właściwej interpretacji – powtórnie wymieszano glebę z korzeniami i zmierzono wilgotności.

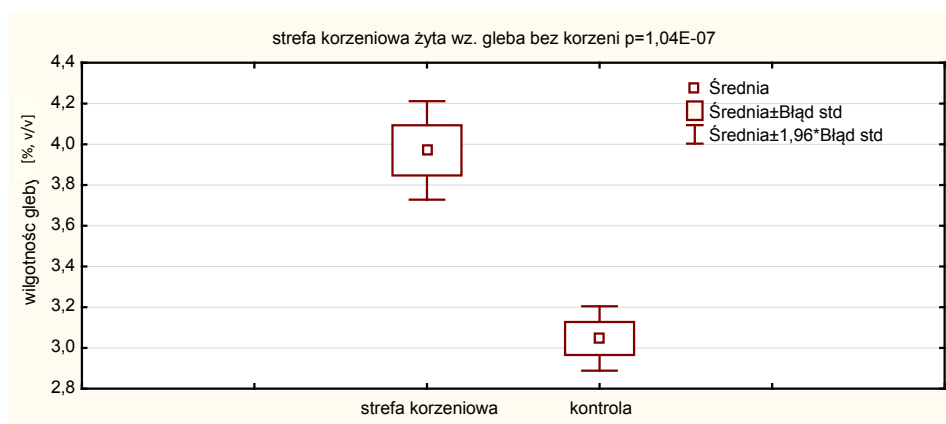
Doświadczenie 6

Na polu z rzepakiem ozimym, opisanym w metodyce doświadczenia nr 2, wykonano doświadczenie wg metodyki analogicznej do metody zastosowanej w doświadczeniu nr 5.

3.1.2. Wilgotność gleby z korzeniami roślin vs wilgotność gleby bez korzeni roślin – omówienie i dyskusja wyników

Wyniki doświadczenia nr 1 wskazują, że wilgotność 7,5 cm warstwy gleby na polu doświadczalnym żyta była bardzo niska. Stwierdzono jednak, że średnia wilgotność gleby z korzeniami, wedle wskazań TDR, była istotnie większa (o 0,92 p.p., tj. o 23,3%) niż gleby bez korzeni roślin (rys. 3). Doświadczenie nr 2 realizowane było w zasiewach rzepaku ozimego, na glebie o większej zawartości frakcji łu (poniżej 0,002 mm). Oznaczone TDR wilgotności przyjmowały wprawdzie większe wartości niż w doświadczeniu pierwszym, ale również były to niewielkie zawartości wody w glebie (rys. 4). Podobnie jak w doświadczeniu nr 1 wilgotność gleby z korzeniami rzepaku była większa niż gleby bez korzeni rzepaku. Różnica ta wyniosła 0,91 p.p. (tj. 16,2%), więc była nieco mniejsza niż w doświadczeniu nr 1.

Wyniki te przeczą podstawowym prawidłowościom interakcji gleba – roślina w zakresie wyczerpywania zasobów wody w glebie. Pobór wody przez korzeń powoduje, że spada potencjał wody w jego otoczeniu [Nosalewicz 2013]. Skoro rośliny pobierają wodę z gleby, to zmniejszają jej wilgotność w strefie objętej zasięgiem korzeni. Powinno to być dostrzegalne zwłaszcza w warunkach limitowanych zasobów wody. Prawidłowość ta wskazuje, że w strefie korzeniowej wilgotność gleby powinna być niższa niż poza nią, co powoduje różnicę potencjałów i przepływ wody z gleby nieporośniętej do strefy korzeniowej.



Rys. 3. Wilgotność objętościowa gleby [% v/v] w strefie korzeniowej żyta i poza strefą korzeni – kontroli (TDR)

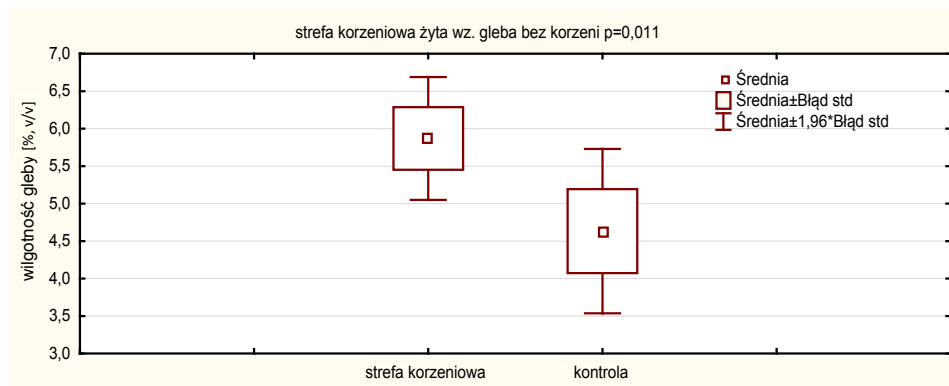
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Wilgotność gleby [% v/v] w strefie korzeniowej rzepaku i poza strefą korzeni – kontroli (TDR)

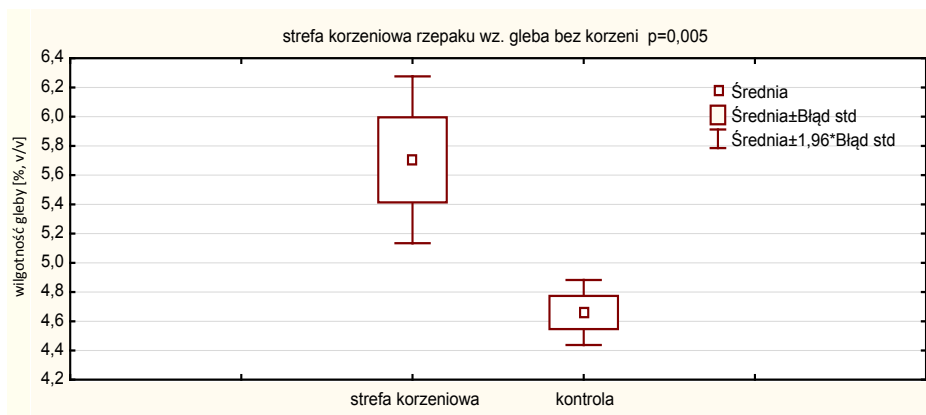
Źródło: opracowanie własne.

Potwierdzeniem kierunkowej zgodności komentowanego wyżej zjawiska są wyniki uzyskane za pomocą metody grawimetrycznej w doświadczeniach 3 i 4 (rys. 5 i 6). Zgodnie z metodą TDR otrzymuje się wyniki objętościowej wilgotności gleby [% v/v] – w skrócie $\%(\text{v/v})$, dlatego wyniki metody grawimetrycznej również przeliczono na wilgotność objętościową $\%(\text{v/v})$. Ta klasyczna metoda oceny wilgotności gleby polega na odparowaniu wody w temperaturze 105°C i ocenie różnicy mas przed rozpoczęciem suszenia i po jego zakończeniu w stałej objętości próbki. Dzięki pomiarom przeprowadzonym z wykorzystaniem tej metody wykazano istotnie większą wilgotność gleby zawierającej korzenie młodych roślin żyta (rys. 5) lub korzenie rzepaku (rys. 6) niż gleby spoza strefy korzeniowej tych roślin. W przypadku stanowiska żyta różnica ta wyniosła 1,23 p.p. (21,1%), a rzepaku 1,05 p.p. (18,3%).



Rys. 5. Wilgotność gleby [% v/v] w strefie korzeniowej żyta i poza strefą korzeni – kontroli (metoda grawimetryczna)

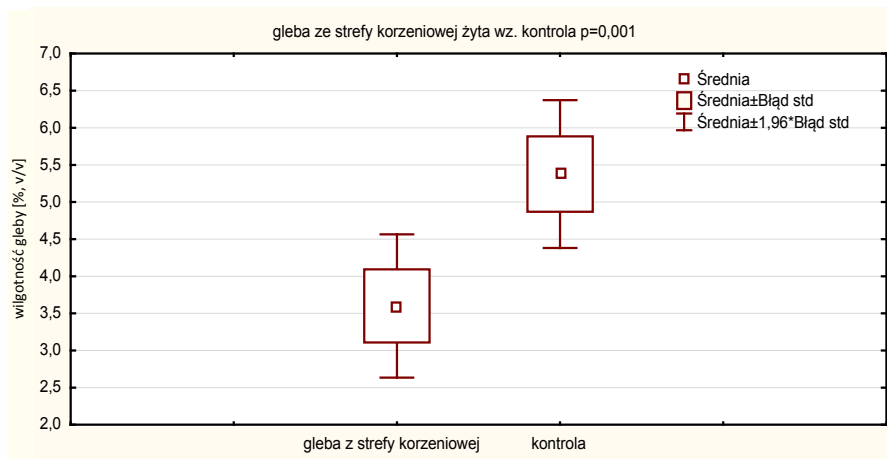
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Wilgotność gleby [% v/v] w strefie korzeniowej rzepaku i poza strefą korzeni – kontroli (metoda grawimetryczna)

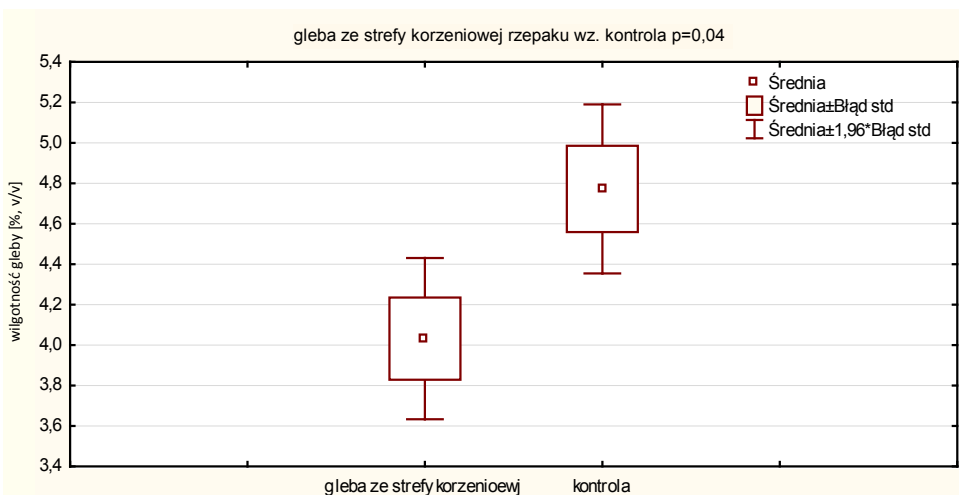
Źródło: opracowanie własne.

W tych samych doświadczeniach (3 i 4) po odseparowaniu korzeni z próbki pobranej ze strefy korzeniowej uzyskano odmienne rezultaty. Gleba ze strefy korzeniowej po usunięciu korzeni cechowała się istotnie mniejszą wilgotnością niż próbka kontrolna (rys. 7 i 8). W przypadku gleby pobranej z doświadczenia z żytem różnica ta wynosiła 1,8 p.p. (rys. 7), a w doświadczeniu z rzepakiem 0,74 p.p. (rys. 8). Pomijając niewielkie różnice średniej wilgotności dla obiektów kontrolnych, można szacować, że błąd pomiaru wilgotności gleby (różnica między wilgotnością gleby strefy korzeniowej zawierającej korzenie a wilgotnością gleby ze strefy korzeniowej po ich odseparowaniu) wynikający z obecności korzeni żyta był rzędu 2,72 p.p., a rzepaku 1,67 p.p. Są to stosunkowo niewielkie różnice, jeśli rozpatrywałoby się je w kontekście wartości bezwzględnych wilgotności gleby. Wilgotność próbek była jednak bardzo mała i różnice te w stosunku do kontroli należy uznać za całkowicie zmieniające interpretację uzyskanych wyników. Potwierdzeniem tego jest wyrażenie różnic w wartościach względnych, w którym za podstawę odniesienia przyjęto średnią obiektów kontrolnych (średnia z kontroli rys. 5 i 7 dla żyta; rys. 6 i 8 dla rzepaku). Wynika z nich, że błąd oceny wilgotności gleby był rzędu 45,4% dla żyta i 35,5% dla rzepaku. Tak duży błąd oceny może być źródłem niewłaściwej interpretacji wyników doświadczeń rolniczych.



Rys. 7. Wilgotność gleby [% v/v] wyizolowanej ze strefy korzeniowej żyta i kontroli – metoda grawimetryczna

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Wilgotność gleby [% v/v] wyizolowanej ze strefy korzeniowej rzepaku i kontroli – metoda grawimetryczna

Źródło: opracowanie własne.

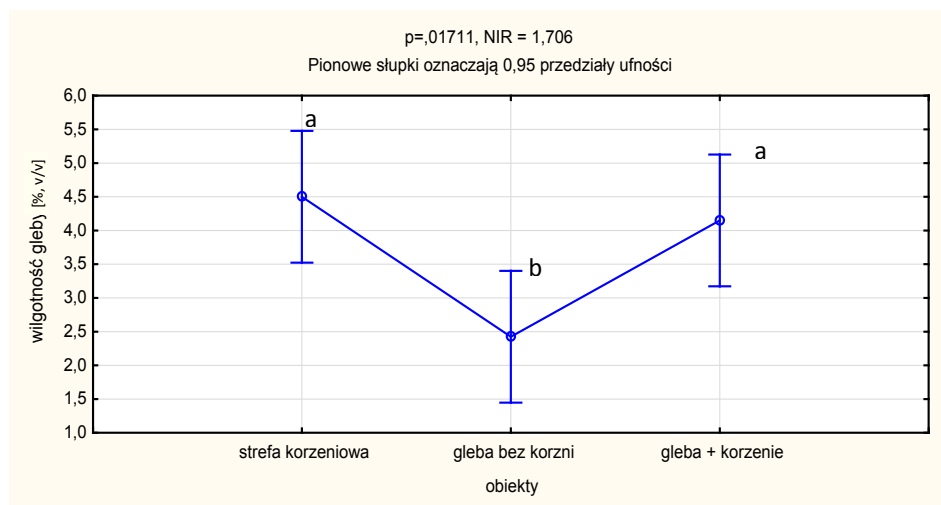
Udział świeżej masy korzeni w całej próbce gleby był niewielki i wynosił dla żyta średnio zaledwie 0,79%, a dla rzepaku 1,02% (tabela 3), co zdawałoby się nie być przyczyną większego błędu. Na skutek długotrwałego okresu bezopadowego zawartość wody w glebie była bardzo mała, stąd okazało się, że zawarta w korzeniach żyta i rzepaku woda stanowiła odpowiednio aż 20,3% i 22,4% całej zawartej w glebie wody. Było to konsekwencją uzyskanych różnic w ocenie wilgotności gleby pochodzącej ze strefy korzeniowej roślin i gleby nieporośniętej.

Tabela 3. Masa korzeni i zawartej w nich wody w odniesieniu do masy próbki gleby pobranej ze strefy korzeniowej żyta i rzepaku

Cecha		Próbki gleby dla	
		żyto	rzepak
Świeża masa [g]	gleba z korzeniami	139,7	136,1
	gleba bez korzeni	138,6	134,8
	korzenie	1,10	1,38
Sucha masa [g]	gleba z korzeniami	135,21	130,95
	gleba bez korzeni	135,03	130,73
	korzenie	0,18	0,22
Zawartość wody [g]	gleba z korzeniami	4,52	5,20
	gleba bez korzeni	3,60	4,03
	korzenie	0,92	1,16

Źródło: opracowanie własne.

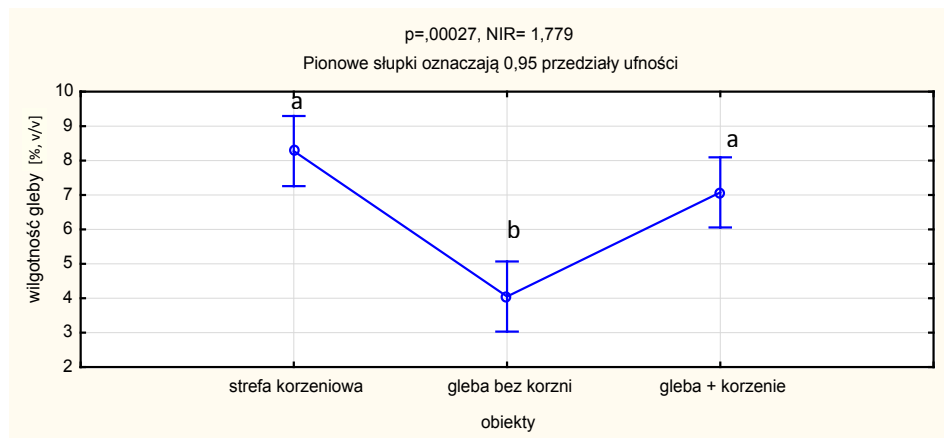
Pomiary wilgotności gleby wykonane za pomocą techniki TDR również wskazują, że metoda nie jest selektywna względem wody zawartej w korzeniach roślin. Tezę tę potwierdzają wyniki doświadczeń 5 i 6. Gleba pobrana ze strefy korzeniowej żyta, niepozbawiona korzeni, cechowała się o 2,08 p.p. (46,1%) wyższą wilgotnością oznaczoną za pomocą metody TDR niż ta sama gleba pozbawiona korzeni (rys. 9). Należy zaznaczyć, że przesianie gleby w celu odseparowania korzeni spowodowało niewielki i statystycznie niepotwierdzony spadek jej wilgotności. Wynika to z faktu, że powtórne zmieszanie gleby z odseparowanymi korzeniami dało podobne wyniki wilgotności, jakie uzyskano przed odseparowaniem korzeni.



Rys. 9. Oznaczona za pomocą metody TDR wilgotność gleby [% v/v] ze strefy korzeniowej żyta w zależności od obecności w niej korzeni

Źródło: opracowanie własne.

Analogiczne wnioski wynikają z doświadczenia wykonanego na próbkach gleby z uprawy rzepaku (rys. 10). Wilgotność gleby oznaczona z wykorzystaniem metody TDR w próbkach wyjściowych wynosiła 8,29% (v/v). Ta sama gleba po usunięciu korzeni miała jednak o 51,06% mniejszą wilgotność, tj. 4,05% (v/v). Również w przypadku tego doświadczenia odsianie korzeni nie spowodowało istotnego spadku wilgotności badanych prób.



Rys. 10. Oznaczona z wykorzystaniem metody TDR wilgotność gleby [% v/v] ze strefy korzeniowej rzepaku w zależności od obecności w niej korzeni

Źródło: opracowanie własne.

Sondy wilgotności gleby czy innych materiałów porowatych umożliwiają obecnie ciągłą rejestrację tego parametru. Możliwości takie są z kolei podstawą tworzenia różnych modeli związanych z dynamiką przemieszczania się wody w poszczególnych strefach gleby [Brocca 2017, Ursulino i in. 2019], pobierania wody przez korzenie [Musters i Bouten 2000], plonowania roślin [Helman i in. 2019], a w doświadczeniach wazonowych – również z dynamiką przyrostu biomasy roślin [Baas i Slooeweg 2004]. Zdaniem Guderle i Hildebrandt [2015] metody takie oparte na danych są tak dobre jak ich dane wejściowe. Autorzy w opisie metodycznym oszacowania profili ewapotranspiracji i pobierania wody z korzeni poświęcają dużą uwagę na właściwą kalibrację czujników do właściwości gleby, precyzję i dokładność ich pomiarów, które determinują błąd. W cytowanych badaniach użyto jednak reflektometrycznych sond wilgotności TDR, które – jak wynika z badań własnych – nie są selektywne względem wody zawartej w korzeniach roślin. Analiza dostępnej literatury wskazuje, że większość publikowanych badań naukowych w zakresie zawartości wody w strefie korzeniowej bazuje na pomiarach reflektometrycznych i w żadnej nie wzięto pod uwagę analizowanego problemu. Wyniki badań własnych wskazują jednak, że wnioski i tworzone modele matematyczne na podstawie pomiarów nieuwzględniających wody zawartej w organizmach żywych mogą być obar-

zione błędem. Problem polega na tym, że w literaturze właściwie nie podejmuje się tego zagadnienia, stąd brak możliwości odniesienia wyników własnych do badań innych autorów. Prace badawcze w celu wyjaśnienia wpływu obecności korzeni na kalibrację sond FDR w ogrodniczych podłożach bezglebowych podjęli Kang i in. [2019], wnioskując, że na dokładność pomiaru ma wpływ wielkość systemu korzeniowego, tj. świeża masa korzeni, sucha masa korzeni i zawarta w nich woda. Stąd konieczna jest właściwa interpretacja uzyskanych wyników objętościowej wilgotności podłoża szacowanej za pomocą metody FDR. Autorzy stwierdzili, że przy 65% wilgotności podłoża rzeczywista jego wilgotność była o 9% mniejsza w porównaniu z wilgotnością oszacowaną na podstawie kalibracji na podłożu bez roślin. Badania te jednak nie obejmowały takiego zakresu wilgotności podłoża, aby można było porównywać te wyniki z wynikami badań własnych.

Zjawisko dynamiki wody w glebie potencjalnie uwzględniające jej zawartość w korzeniach można zaobserwować dzięki neutronowej tomografii komputerowej (NCT) wykorzystywanej do oznaczania architektury systemu korzeniowego [Segal i in. 2008]. Ze względu na wrażliwość neutronów na wodór, zawarty nie tylko w korzeniach roślin, lecz także w materii organicznej i w wodzie, badania takie przeprowadza się głównie w homogenicznych podłożach mineralnych [Mawodza i in. 2020]. Wskazano również wcześniej, że dla badań modelowych obejmujących swoim zakresem strefę korzeniową roślin ze względu na samą metodę pomiaru zasadne jest rozpatrzenie zastosowania pomiaru potencjału matrycowego gleby.

3.1.3. Wilgotność gleby z korzeniami roślin vs wilgotność gleby bez korzeni roślin – wnioski

W zależności od celu badań bezkrytyczna interpretacja wyników wilgotności gleby uzyskanych za pomocą metody grawimetrycznej i metody TDR może prowadzić do błędnych wniosków. W warunkach niewielkiej wilgotności gleby zawarta w korzeniach roślin woda stanowi znaczący odsetek całej wody w glebie. Testowane metody pomiaru wilgotności, tj. grawimetryczna i TDR, nie są selektywne względem wody zawartej w części abiotycznej gleby i wody zawartej w żywych korzeniach. Zatem generując wnioski dotyczące zawartości wody i jej dynamiki w glebie porośniętej roślinnością, należy uwzględnić, że oznaczona wilgotność obejmuje także wodę zawartą w korzeniach roślin. Wilgotność gleby jest bardzo ważnym aspektem badań rolniczych, a jej parametryzacja powinna być zestandaryzowana w oparciu o pełne zrozumienie zjawisk związanych z biotyczną i abiotyczną retencją wody w glebie. Omawiane zjawisko wymaga dalszych badań w zakresie rozpoznania skali błędu pomiaru w różnych warunkach środowiskowych i dla różnych metod pomiarowych.

3.2. REGULACJA WILGOTNOŚCI PODŁOŻA W DOŚWIADCZENIACH WAZONOWYCH – ROZWIĄZANIA WŁASNE

3.2.1. Możliwość wykorzystania nawadniania kropłowego w doświadczeniach wazonowych

W doświadczeniach wazonowych wilgotność podłoża powinna być utrzymywana na ściśle określonym i zazwyczaj stałym poziomie. Ręczne podlewanie nie pozwala na spełnienie tego wymagania. Woda powinna być dostarczana na bieżąco wraz z jej ubywaniem. W części przeglądowej pracy (podrozdział 2.3.3) przedstawiono szereg rozwiązań umożliwiających automatyzację regulacji wilgotności, część z tych rozwiązań opartych jest na kropłowej emisji wody do wazonów. Nawadnianie kropłowe ma powszechne zastosowanie w praktyce rolniczej i ogrodniczej. Istotą działania takiego nawadniania jest ukierunkowana, kropłowa emisja wody z emiterów zamontowanych na przewodach zasilających [PN-EN 13635 2003, Jeznach 2009, Mangrio i in. 2013]. Emiter jest zatem ważną częścią takiego systemu nawadniającego, decydującą o jego sprawności [Zhengying 2012]. Na systemy nawodnień kropłowych składają się źródło wody, zawory odcinające, zawory kontrolne (elektrozawory), manometry, regulatory ciśnienia, filtry, przewody zasilające główne i przewody zasilające z zintegrowanymi emiterami kropłowymi lub oddzielnie przewody zasilające i emitory [Schwankl i Prichard 1999].

Istnieją różne rozwiązania w zakresie budowy zarówno przewodów zasilających, jak i emiterów kropłowych. Klasyfikacja emiterów kropłowych zależy od ich konstrukcji, sposobu montażu, wielkości emisji, sposobu redukcji ciśnienia [Karmeli 1977]. W warunkach doświadczeń wazonowych nie ma takich problemów z projektowaniem instalacji nawadniającej jak warunkach produkcji polowej. Pochyłość terenu powodują, że powstaje różnica ciśnienia wody w poszczególnych sekcjach systemu nawadniającego, co może determinować dokładność i precyzję wydatkowanej przez emitory wody [Sicoli i in. 2019]. Nie zmienia to jednak faktu, że właściwy dobór emiterów może decydować o zmniejszeniu błędów doświadczenia. Przyjęto więc założenie, że niektóre z emiterów kropłowych w zależności od ich parametrów technicznych i precyzji działania potencjalnie mogą znaleźć zastosowanie do nawadniania podłoża w doświadczeniach wazonowych.

3.2.1.1. Dobór emiterów

W zależności od warunków technicznych i metodycznych rozmieszczenie wazonów doświadczalnych może być bardzo różne. Lokalizacja nawodnieniowych emiterów kropłowych (nazywanych również kropłownikami) na przewodzie zasilającym powinna być zatem do niego dostosowana. Nie nadają się do tego celu emitory kropłowe fabrycznie zintegrowane z przewodem zasilającym. Biorąc pod uwagę przedmiotowe uwarunkowanie, zastosowanie mogą mieć w tym przypadku tylko emitory zewnętrzne, tzw. „online” [Shamshery i in. 2017], montowane na przewodach zasilających stosownie do potrzeby. Podstawową zaletą takiego roz-

wiązania jest stosunkowo niewielki koszt sieci przewodów i samych emiterów pozwalający na stosowanie dużej liczby obiektów doświadczalnych i ich replikacji.

Cały system nawadniający wazony doświadczalne powinien być zaprojektowany tak, aby minimalizować możliwe źródła błędów doświadczalnych. Podstawowym założeniem jest, aby wszystkie jednostki doświadczalne stanowiące powtórzenia danego obiektu lub obiektów z takim samym poziomem uwilgotnienia były zasilane taką samą objętością wody. Najpoważniejszym źródłem błędu doświadczalnego jest więc nierównomierność wydatkowania wody przez poszczególne kroplozniki. Nierównomierność taka może wynikać z wielu przyczyn [Tayel i in. 2019]. Jedną z ważniejszych jest zróżnicowane ciśnienie wody w przewodach sieci kropelującej [Dudek i in. 2007]. Zminimalizowanie wpływu nierównomierności ciśnienia wody można osiągnąć przez zastosowanie emiterów z kompensacją ciśnienia o względnie stałym objętościowym natężeniu wypływu przy zmieniającym się ciśnieniu wody na wlocie do emitera [PN-R-01000 1997]. Istotę działania takich emiterów opisali Shamsbery i in. [2017]. Cały system ma utrzymywać stały poziom wilgotności podłoża, dlatego emiterzy powinny dozować wodę w częstych, ale krótkich cyklach (podrozdział 3.2.2). Sieć przewodów zasilających powinna być zatem tak skonstruowana, aby pomimo stosowania emiterów z kompensacją ciśnienia minimalizować różnicę ciśnień w całym obwodzie. Ważne jest również, aby czas rozpoczęcia emisji dla pierwszego i ostatniego kroploznika w całej sieci był jednakowy, oraz aby po zakończeniu emisji woda nie wypływała samoczynnie do momentu całkowitego spadku ciśnienia w sieci. Zastosowanie powinny zatem znaleźć emiterzy *Drop-Stop*, czyli wyposażone w tzw. antykapacz, który przeciwdziała spadkowi ciśnienia w instalacji po zakończeniu nawadniania, co zapobiega samoistnemu wypływowi wody po zamknięciu jej zasilania. Emiterzy nie są odporne na zanieczyszczenia wody, które powodują ich zapychanie [Niu i in. 2013, Katz i in. 2014], co jest przyczyną niejednorodności aplikacji wody [Zhou i in. 2015], a tym samym generuje błąd doświadczenia. System nawadniający powinien być zatem zaopatrzony w wielostopniowy filtr [Lamm i Camp 2007, Oliveira i in. 2017]. Ze względu na możliwość zmiany dokładności i precyzji ilości aplikowanej przez emiterzy wody związanej z jej jakością, do celów nawadniania doświadczeń wazonowych wskazane jest zasilanie wodą destylowaną lub demineralizowaną. Zastosowanie nawet najlepszych filtrów nie chroni jednak emiterów przed zanieczyszczeniami, które mogą się dostać do przewodów w czasie ich montażu i prac konserwacyjnych całego systemu, lub przed rozwojem mikroorganizmów [Qian i in. 2017]. Poszczególne typy emiterów bardzo różnią się pod względem podatności na zapychanie [Yan i in. 2009]. Wskazane jest więc stosowanie emiterów tzw. „samopłuczających” (*self-flushing*), w których wymywanie zanieczyszczeń powodowane jest chwilowym wzrostem przepływu wody przez emiter występujący w czasie narastania ciśnienia w instalacji [Tajrishy i in. 1994, Hills i in. 2000]. Reasumując, w doświadczeniach wazonowych znaleźć mogą zastosowanie samoczyszczące emiterzy online *Drop-Stop* z kompensacją ciśnienia. W tabeli nr 4 zestawiono parametry wybranych emiterów montowanych indywidualnie na przewodach nawadniających. Na potrzeby badań własnych, których celem było utworzenie systemu nawadniającego dla doświadczeń wazonowych, wybrano emiterzy typu TORO NGE.

Tabela 4. Specyfikacja techniczna wybranych emiterów kropłowych online

Nazwa emitera	Kompensacja ciśnienia	Wydatek [dm ³ ·h ⁻¹]	Wyjście		Ciśnienie robocze [bar]	Drop-Stop	Samo-czyszcząca
			przewód	adapтеры rozdzielające			
Palaplast ST	nie	1–100	nie	nie	1,0–3,5	nie	nie
Nestos	nie	2,0	nie	tak	0,5–3,5	nie	nie
AGRAS-SC/ND	tak	4,0; 8,0	nie	tak	0,5–3,5	tak	tak
Palaplast AX	tak	2,0; 4,0; 8,0	tak	tak	1,0–3,5	nie	nie
Supertif	tak	2,2; 3,85; 7,8; 12,0; 25,0	tak	tak	0,6–3,5	nie	tak
Supertif NDH	tak	1,1; 2,2; 3,85; 7,8	tak	tak	0,7–3,5	tak	tak
Supertif ND	tak	1,6; 3,1; 8,0; 11	tak	tak	1,2–3,5	tak	tak
Irritec iDrop	tak	2,2; 3,2; 4,0; 6,0; 7,8	tak	tak	0,5–3,5	tak	tak
SAB RAMBO	tak	2,0; 8,0	tak	tak	0,5–3,6	nie	nie
Rivulis E1000	nie	2,0; 4,0; 8,0	tak	nie	0,8–2,0	nie	nie
Click Tif PC CNL HD	tak	2,0; 4,0; 8,0	nie	tak	1,0–4,0	tak	tak
Click Tif PC CNL HD barbed	tak	2,0	tak	nie	1,0–4,0	tak	tak
NETAFIM	tak	1,2; 2,0; 3,0; 4,0	tak	tak	1,5–4,0	tak	tak
TORO NGE	tak	2,0; 3,0; 4,0	nie	tak	0,4–3,5	tak	tak
Irriga Turbo	nie	3,0	nie	tak	0,5–3,5	nie	nie
Katif	tak	2,3; 3,75; 8,0	nie	nie	0,8–3,0	nie	tak

Źródło: opracowanie własne.

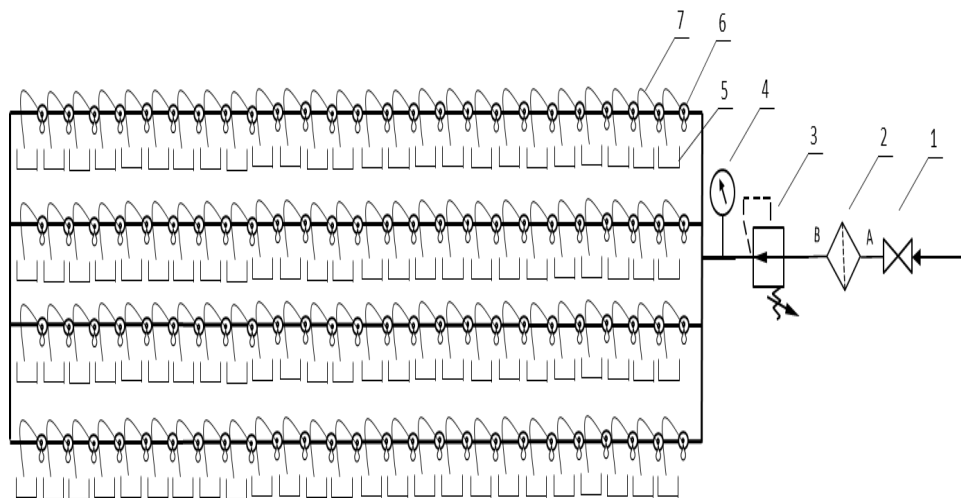
3.2.1.2. Ocena zmienności wydatku wody przez emiterzy

Producenci deklarują określony wydatek wody dla emiterów kroplowych. Emiterzy kroplowe wykonywane są z tworzyw sztucznych w formach wtryskowych. Na skutek zmian ciśnienia i niestabilności cieplnej oraz heterogeniczności wtryskiwanego materiału podczas procesu produkcji mogą wystąpić różnice w geometrii poszczególnych elementów składowych emitera, czego skutkiem może być niezgodny z deklarowanym (niedokładny) wydatek wody w trakcie eksploatacji [Kirnak i in. 2004]. Postawiono zatem hipotezę, że każda partia emiterów używanych do nawadniania wazonów doświadczalnych przed zamontowaniem powinna być przetestowana w celu sprawdzenia dokładności i precyzji ich działania w różnych warunkach eksploatacji.

3.2.1.2.1. Metodyka badań

Doświadczenie 1

W celu sprawdzenia dokładności i precyzji emisji wody w kontekście wykorzystania emiterów do nawadniania doświadczeń wazonowych przetestowano partię 100 emiterów dla sześciu różnych wartości ciśnienia wody w zakresie 0,5–5 barów. Testowaniu poddano emiterzy TORO NGE⁹ o deklarowanym przez producenta wydatku wody $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Do testów przygotowano stanowisko (rys. 11, fot. 1), a pomiary ilości wydatkowanej wody wykonano w trzech powtórzeniach dla każdej wartości ciśnienia.



1 – zawór, 2 – filtr, 3 – regulator ciśnienia, 4 – manometr, 5 – pojemnik na wodę, 6 – emiter, 7 – przewód odprowadzający wodę od emitera $\varnothing 5 \text{ mm}$

Rys. 11. Schemat instalacji do testowania wydatku emiterów (opracowanie własne)

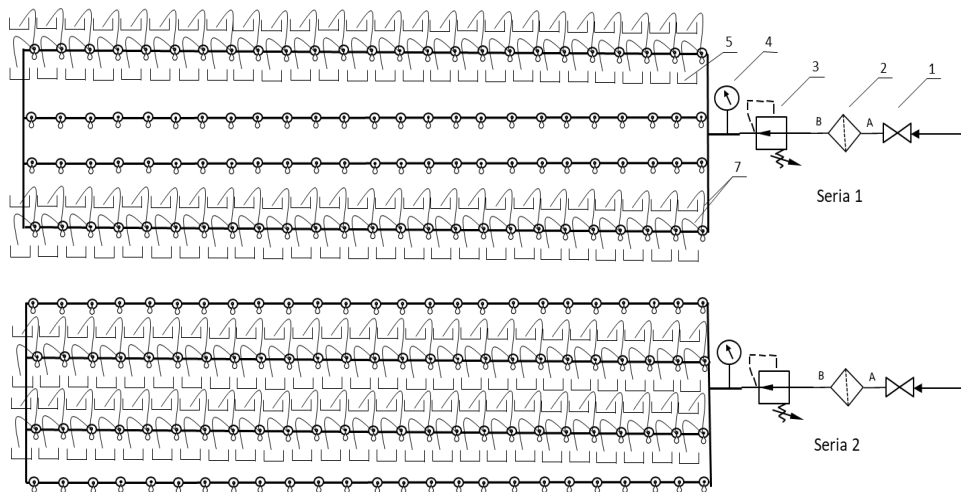
⁹ www.toro.com/en/professional-constructor/irrigation-landscape-drip/nge-pc-emitters.



Fot. 1. Instalacja do testowania wydanku emiterów (fot. autor)

Doświadczenie 2

Osobnym zagadnieniem jest stosowanie różnego rodzaju adapterów odbierających wodę z emitera i doprowadzających ją do punktu docelowego. Wyjście niektórych emiterów dostosowane jest tak, aby bezpośrednio na nim montować przewód odprowadzający wodę do punktu docelowego i zazwyczaj nie można na nim zamontować dodatkowego rozdzielacza. Niektóre emityry mają wyjścia dostosowane do montowania adapterów rozdzielczych tak, aby z jednego punktu emisji rozprzewadzać wodę do dwóch lub większej liczby miejsc docelowych. W rozwiązaniach produkcyjnych zmniejsza to koszt samej instalacji nawadniającej.



1 – zawór, 2 – filtr, 3 – regulator ciśnienia, 4 – manometr, 5 – pojemnik na wodę, 6 – emiter, 7 – przewód odprowadzający wodę od emitera \varnothing 5 mm

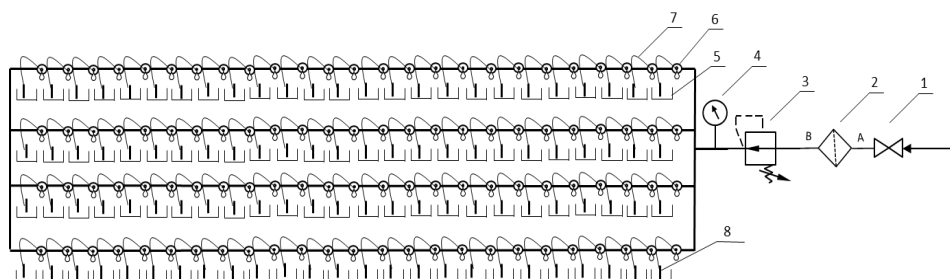
Rys. 12. Schemat instalacji do testowania wydanku emiterów z rozdzielaczami podwójnymi (opracowanie własne)

W celu sprawdzenia wpływu zamontowania na emiterze rozdzielacza podwójnego na emisję wody wykorzystano to samo stanowisko co w wyżej opisanym teście. Ze względu na ograniczoną ilość miejsca na stanowisku doświadczenie przeprowadzono w dwóch seriach jednorazowo, testując 50 emiterów (rys. 12). W czasie testów woda z emiterów niepodlegających pomiarom swobodnie spływała na perforowaną płytę i odciekała poza stanowisko. Na rozdzielacze podwójne nałożono wężyki odprowadzające wodę o długości 50 cm każdy (z dokładnością do 1 mm). Test przeprowadzono w warunkach ustalonego ciśnienia wody: 2 bary. W celu jednoznacznej identyfikacji uzyskanych wyników dokonano podziału na prawą i lewą stronę rozdzielacza.

Doświadczenie 3

W praktyce nawodnień kroplowych mają zastosowanie również emiterzy patykowe z labiryntem. Woda jest doprowadzana do nich z przewodu zasilającego przez montowaną indywidualnie złączkę i wąż o małym przekroju. Zaletą tego rozwiązania jest to, że woda z takiego emitera spływa po nim w głąb podłoża w ściśle określonym miejscu. Można też montować takie emiterzy patykowe na końcach węży odprowadzających wodę od emiterów montowanych na węzłach zasilających, zabezpiecza to przed zmianą położenia przewodu odprowadzającego wodę z emitera do punktu docelowego. Niesie to za sobą jednak możliwość zakłócenia wydatkowania wody.

W celu sprawdzenia równomierności emisji wody przez zestaw: emiter z kompensacją ciśnienia + emiter patykowy z labiryntem wewnętrznym przeprowadzono doświadczenie laboratoryjne. Partię 100 przedmiotowych zestawów testowano z uwzględnieniem różnych wartości ciśnienia wody. Testowaniu poddano emiterzy TORO o deklarowanym przez producenta wydatku wody $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, połączone gumowym węzłem o średnicy wewnętrznej $\varnothing 5 \text{ mm}$ i długości 50 cm z emiterem patykowym wyposażonym w labirynt firmy Irriga. Do testów przygotowano stanowisko (rys. 13), a pomiary ilości wydatkowanej wody wykonano w trzech powtórzeniach dla każdej wartości ciśnienia.



1 – zawór, 2 – filtr, 3 – regulator ciśnienia, 4 – manometr, 5 – pojemnik na wodę, 6 – emiter, 7 – przewód odprowadzający wodę od emitera, 8 – emiter patykowy z labiryntem

Rys. 13. Schemat instalacji do testowania wydatku zestawu emiter z kompensacją ciśnienia + emiter patykowy z labiryntem (opracowanie własne)

3.2.1.2.2. Omówienie i dyskusja wyników

Doświadczenie 1

Wyniki przeprowadzonego testu (tabela 5) wskazują, że średnia wydatkowania wody dla próby 100 emiterów nie odbiega od założonych przez producenta $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, niezależnie od ciśnienia wody w zakresie 0,5–5 barów. Trzeba jednak wskazać, że w zależności od ciśnienia wody w przewodach zasilających uzyskano różne wartości współczynnika zmienności. Dla całej próby najmniejszą zmiennością cechowała się emisja przy ciśnieniu 0,5 bara i na ogół rosła ona wraz ze wzrostem ciśnienia. Najważniejszym jednak parametrem jest precyzja wydatkowania wody dla każdego emitera osobno. Najmniejszą średnią zmienność wydatku wody dla pojedynczego kroploznika z trzech powtórzeń uzyskano dla ciśnienia 2 barów. Uzyskane wyniki wskazują, że testowane emitery mogą być zastosowane do nawadniania wazonów doświadczalnych przy założeniu utrzymywania w sieci zasilającej podczas cyklu nawodnieniowego ciśnienia 2 barów. Doświadczenia wymagają jednak szczególnej precyzji i dokładności w aplikacji wody, stąd przed montażem trzeba na podstawie przedmiotowego testu wyselekcjonować te emitery, które spełniają wskazane założenia. W badaniach własnych tylko około 40% testowanych emiterów spełniało warunki do zastosowania w doświadczeniach.

Tabela 5. Wydatek emiterów w zależności od ciśnienia wody w sieci zasilającej

Wydatek wody [dm ³ ·h ⁻¹]	x	Ciśnienie wody [bar]					
		0,5	1	2	3	4	5
2,15->	liczba kroplozników	0	0	0	0	0	0
2,15–2,09		5	9	6	5	1	0
2,09–2,03		30	11	31	25	25	5
2,03–1,97		44	47	41	39	31	26
1,97–1,91		19	27	14	14	22	24
1,91–1,85		2	6	7	9	3	22
1,85–1,79		0	0	1	5	6	3
1,79–1,73		0	0	0	2	8	1
1,73–1,67		0	0	0	1	2	0
<1,67		0	0	0	0	2	19
Średnia			2,011	1,991	1,993	1,986	1,953
CV dla próby		2,36	3,00	2,97	4,21	5,42	12,33
Średnie CV dla emitera		1,23	0,97	0,34	1,79	2,59	1,33

Źródło: opracowanie własne

Podobne prace podjęli inni autorzy, skupiając się na badaniach porównawczych między różnymi typami emiterów. Behzad i in. [2010] testowali 11 typów emiterów kroplowych w zakresie wydajności 2–24 dm³·h⁻¹ przy różnych ciśnieniach wody, a zmienność wydatku wody wahała się w szerokich grani-

cach, tj. 0,1–34,6%. Mangrio i in. [2013] wskazują, że w zakresie ciśnień 0,34–2,07 barów współczynnik zmienności dla trzech różnych typów emiterów kropkowych w zależności od ciśnienia mieścił się w przedziale 3–7%. Wyniki będące rezultatem zależności między ciśnieniem a ilością wydatkowanej wody, prezentowane przez autorów, dowodzą, że to konstrukcja emitera decyduje o objętości emitowanej wody. W przypadku dwóch testowanych emiterów ciśnienie wody miało niewielki wpływ na zmianę wydatku wody, w przypadku trzeciego – wraz ze wzrostem ciśnienia wzrastała wielkość emisji. W przytoczonych badaniach porównywano ze sobą różne typy emiterów kropkowych, ale przeprowadzono je na próbach małych. Badania własne nakierowane były natomiast na poznanie zmienności wydatkowanej przez emiterzy wody w odniesieniu do dużej partii jednego rodzaju kropłowników potencjalnie przydatnych do realizacji założeń metodycznych doświadczeń wazonowych.

Każdy z emiterów cechuje się określoną dokładnością i precyzją emisji wody, zatem rachunek prawdopodobieństwa wskazuje, że aplikacja wody do jednego punktu odbiorczego (wazonu) będzie tym precyzyjniejsza i dokładniejsza im będzie realizowana przez większą liczbę emiterów. Na podstawie wyników omawianego doświadczenia przeprowadzono symulację matematyczną. Symulacja polegała na wyliczaniu sumy kroczącej dla dwóch, trzech i czterech kolejnych emiterów w próbie. Odpowiadać to ma rzeczywistej aplikacji wody do jednego wazonu przez dwa, trzy lub cztery losowo wybrane kropłowniki jednocześnie – jako jeden punkt emisji. Posłużono się wynikami uzyskanymi dla ciśnienia 2 barów.

Tabela 6. Symulacja wydatku wody dla punktów emisyjnych w zależności od liczby emiterów w punkcie

Wydatek wody [dm ³ ·h ⁻¹]*	x	Liczba emiterów			
		1	2	3	4
2,15->	liczba punktów emisji	0	0	0	0
2,15–2,09		6	2	1	1
2,09–2,03		31	18	16	22
2,03–1,97		41	59	57	56
1,97–1,91		14	17	24	18
1,91–1,85		7	3	0	0
1,85–1,79		1	0	0	0
1,79–1,73		0	0	0	0
1,73–1,67		0	0	0	0
<1,67		0	0	0	0
Suma			100	99	98
Średni wydatek wody dla punktu		1,993	3,986	5,980	7,973
CV dla próby		2,97	2,16	1,87	1,74
Średnie CV dla punktu		0,34	0,32	0,30	0,29

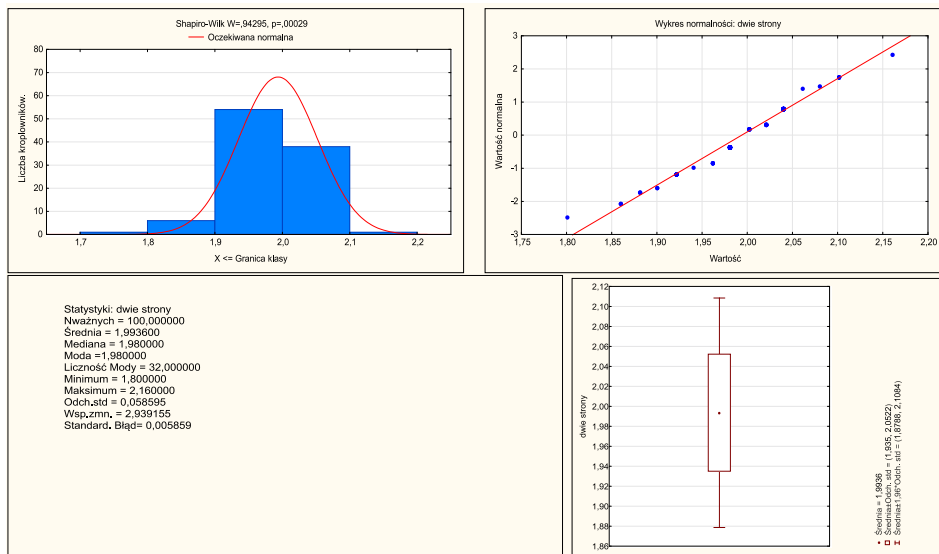
* wartości granic przedziałów mnożone odpowiednio ×2 lub 3, lub 4 dla liczby emiterów w punkcie emisyjnym

Źródło: opracowanie własne

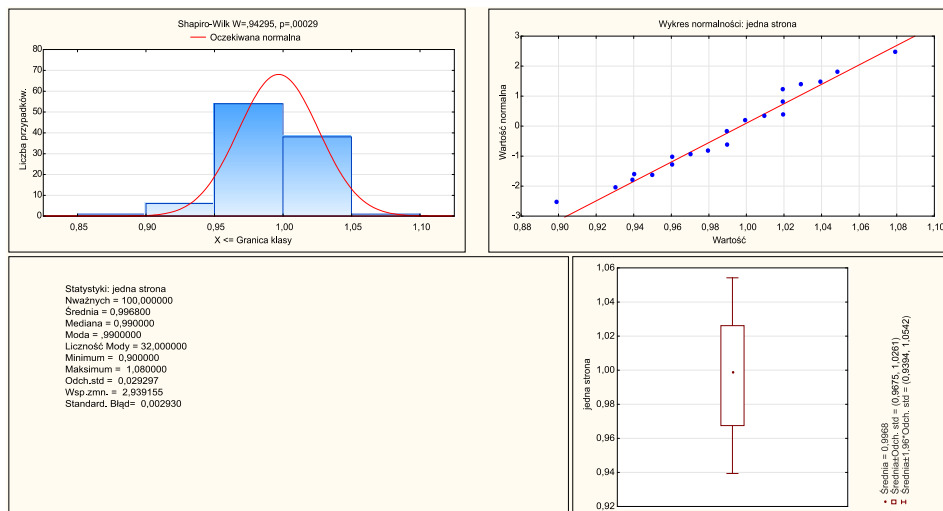
Symulacja matematyczna wskazuje, że średni wydatek wody dla punktu emisyjnego jest jedynie zwiokrotnionym (o liczbę emiterów w punkcie) średnim wydatkiem wody dla punktu z jednym emiterem (tabela 6). Wraz ze wzrostem liczby emiterów w punkcie zwiększa się liczba punktów emisji wokół średniej dla próby, co powoduje wzrost plaktokurtyczności rozkładu. Zatem o ile w przedziale $2,03-1,97 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ dla punktu z jednym emiterem odnotowano 41 przypadków, to dla 2, 3 i 4 – odpowiednio 59, 57 i 56 przypadków. Trzeba zauważyć, że ze względu na matematyczną formułę wyliczenia sumy kroczącej liczebność próby maleje ze wzrostem liczby sumowanych przypadków. Świadczy to o wzroście dokładności, czyli o mniejszym odchyleniu emisji od zakładanej średniej ilości aplikowanej wody. Zwiększenie liczby emiterów w punkcie skutkuje również wzrostem precyzji, o czym świadczy malejący współczynnik zmienności dla pojedynczego punktu.

Doświadczenie 2

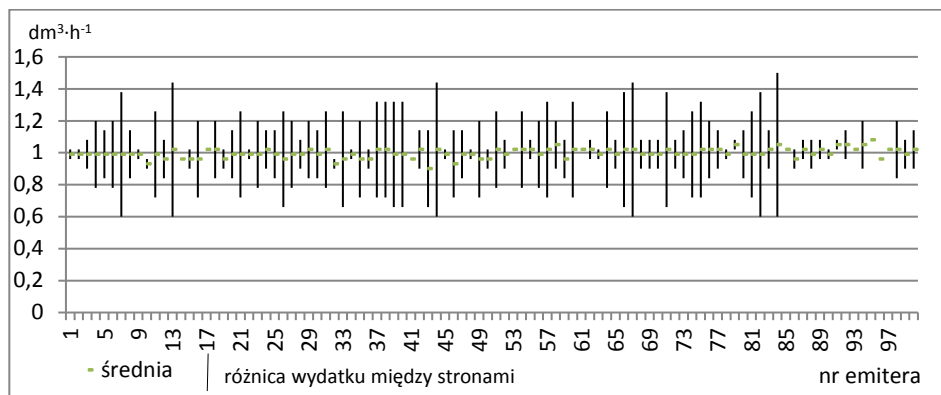
Zamontowanie na kroploownikach rozdzielaczy podwójnych nie wpłynęło na parametry wydatkowania wody przez emitery (rys. 14). Stwierdzono, że rozkład objętości wydatkowanej wody dla próby 100 emiterów był zgodny z rozkładem normalnym, a średnia wyniosła $1,99 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ i była zgodna z deklarowaną przez producenta. Również uśrednione z powtórzeń wyniki sugerują, że woda jest równo rozdzielana na obie strony rozdzielacza, gdyż średni wydatek wody z jednej strony rozdzielacza oscyluje w okolicach $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (rys. 15). Wnioski takie są jednak niemiarodajne. Analiza różnic wydatku wody dla obu stron rozdzielacza w poszczególnych powtórzeniach wskazuje, że są one tak duże, iż całkowicie dyskwalifikują zastosowanie rozdzielaczy wody do celów doświadczalnych (rys. 16, 17 i tabela 7). Podobnie jak wynika z prezentowanych powyżej analiz, graficzne przedstawienie wydatku poszczególnych emiterów dla jednej z replikacji (rys. 16) wskazuje, że średnie dla obu stron rozdzielacza oscylują ok. $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ale różnice pomiędzy obiema stronami rozdzielacza są bardzo różne i sięgają nawet $0,84 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Stąd stosunek wody rozdzielonej na prawą i lewą stronę rozdzielacza jest bardzo różny dla poszczególnych emiterów (rys. 17). Należy zwrócić uwagę, że zaledwie 52 przypadki pomiarów dla trzech powtórzeń miały minimalną różnicę w ilości wydatkowanej wody między obiema stronami rozdzielacza w przedziale $0-0,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, a zaledwie dla sześciu emiterów średnia różnica mieściła się w tym zakresie (tabela 7). Reasumując, nie należy rozdzielać wody z jednego emitera na dwa wazony doświadczalne, gdyż każdy z nich będzie zasilany różną ilością wody. W literaturze nie znaleziono informacji na temat adekwatnych badań innych autorów, stąd brak jest możliwości porównania wyników własnych z rezultatami innych prac.



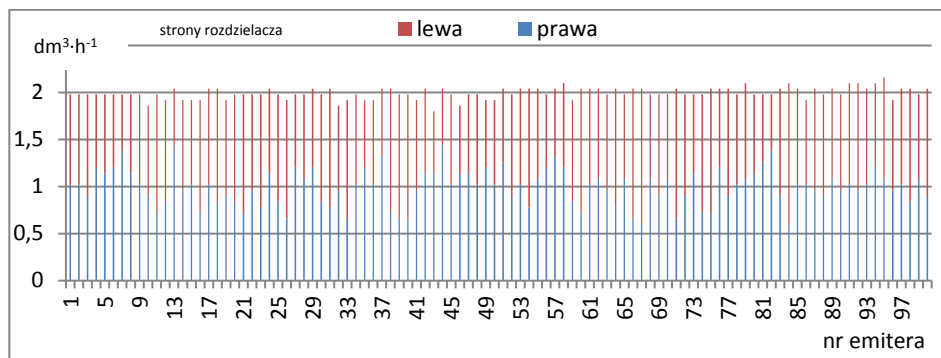
Rys. 14. Podstawowe statystyki łącznego wydatku wody dla kroplowników z obu stron rozdzielacza podwójnego (opracowanie własne)



Rys. 15. Podstawowe statystyki średniego z powtórzeń wydatku wody dla kroplowników dla prawej strony rozdzielacza podwójnego (opracowanie własne)



Rys. 16. Różnice w objętości wydatkowanej wody [dm³·h⁻¹] pomiędzy stronami rozdzielacza dla jednego z powtórzeń (opracowanie własne)



Rys. 17. Ilość wydatkowanej wody [dm³·h⁻¹] dla poszczególnych emiterów z uwzględnioną objętością wody rozdzieloną na prawą i lewą stronę rozdzielacza (opracowanie własne)

Tabela 7. Różnice w ilości wydatkowanej wody pomiędzy stronami rozdzielacza podwójnego

Różnica wydatku wody [dm ³ ·h ⁻¹]	Liczba emiterów		
	min.	max.	średnia
0,00–0,10	52	1	6
0,11–0,20	32	9	18
0,21–0,30	8	9	29
0,31–0,40	3	10	30
0,41–0,50	4	21	9
0,51–0,60	1	22	3
0,61–0,70	0	9	5
0,71–0,80	0	8	0
0,81–0,90	0	8	0
0,91–1,00	0	3	0

Źródło: opracowanie własne

Doświadczenie 3

Przeprowadzone doświadczenie wskazuje, że emiterzy patykowe w zakresie ciśnień 0,5 – 2 bar zawiązały ilość emitowanej przez cały zestaw wody (tabela 8). Dopiero przy ciśnieniu 3 bary i wyższym ilość emitowanej wody zbliżała się do zakładanego wydatku $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Uwagę zwracają również zdecydowanie wyższe wartości współczynnika zmienności zarówno dla całej próby 100 zestawów, jak i dla średniej z powtórzeń dla pojedynczych zestawów w stosunku do rezultatów, jakie uzyskano w doświadczeniu nr 1 dla samych emiterów kropłowych. Ze względu na wymaganą dokładność i precyzję dozowania wody do wazonów nie należy stabilizować lokalizacji ujścia węża odprowadzającego wodę z emitera do wazonu za pomocą dodatkowego emitera patykowego z labiryntem. W literaturze nie znaleziono informacji o badaniach w podobnym zakresie.

Tabela 8. Wydatek zestawu kropłowników + emiter patykowy z labiryntem w zależności od ciśnienia wody w sieci zasilającej

Wydatek wody [dm ³ ·h ⁻¹]	x	Ciśnienie wody [bar]					
		0,5	1	2	3	4	5
2,15->	liczba kropłowników	100	100	99	1	1	0
2,15–2,09		0	0	0	4	7	0
2,09–2,03		0	0	0	27	46	23
2,03–1,97		0	0	0	38	15	28
1,97–1,91		0	0	0	11	11	21
1,91–1,85		0	0	0	3	1	6
1,85–1,79		0	0	0	9	2	2
1,79–1,73		0	0	0	2	8	1
1,73–1,67		0	0	0	5	5	1
<1,67		0	0	1	0	4	18
Średnia		2,761	4,132	4,929	1,985	1,983	1,891
CV dla próby		3,94	5,42	11,14	5,27	6,82	10,90
Średnie CV dla kropłownika		1,57	1,79	2,19	1,92	2,19	2,04

Źródło: opracowanie własne

3.2.1.3. Podsumowanie

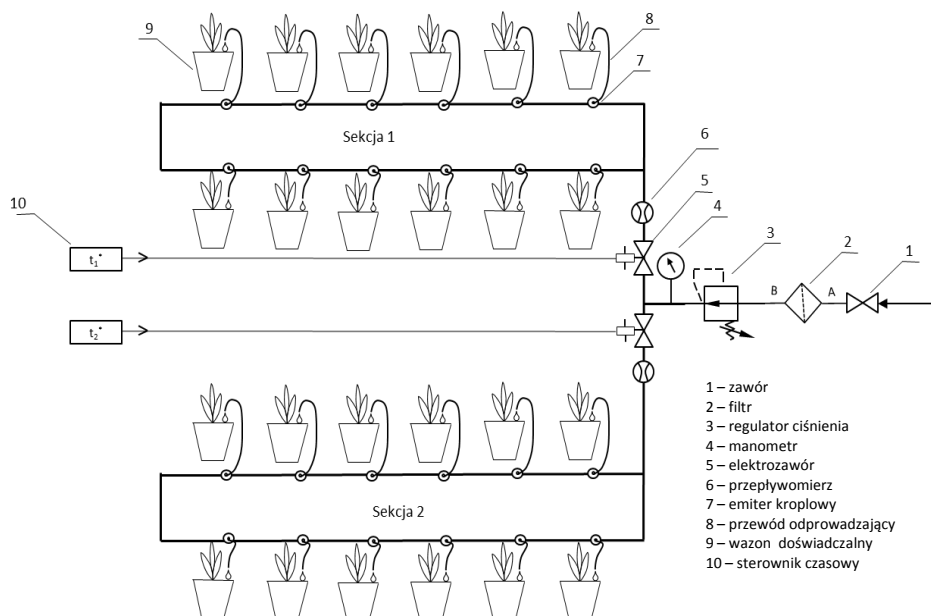
Testy laboratoryjne przeprowadzone dla wybranego typu emiterów TORO NGE uzasadniają ich zastosowanie do budowy systemu nawadniającego wykorzystywanego w doświadczeniach wazonowych. Warunki zastosowania przedmiotowych emiterów to sprawdzenie równomierności wydatku emisji wody dla każdego z nich osobno i wyselekcjonowanie tylko tych, które spełniają założone kryteria. Wskazane jest również, aby jeden wazon doświadczalny zasilany był przez więcej niż jeden emiter. Testowane emiterzy cechowały się największą

równomiernością emisji wody dla ciśnienia w przewodach zasilających o wartości 2,0 bary. Nie należy rozdzielać wody aplikowanej przez emiter na dwa wazonu. Niewskazane jest również stosowanie dodatkowych emiterów patykowych z labiryntem do lokalizacji aplikowanej wody w ustalonym punkcie wazonu.

3.2.2. System sterowania

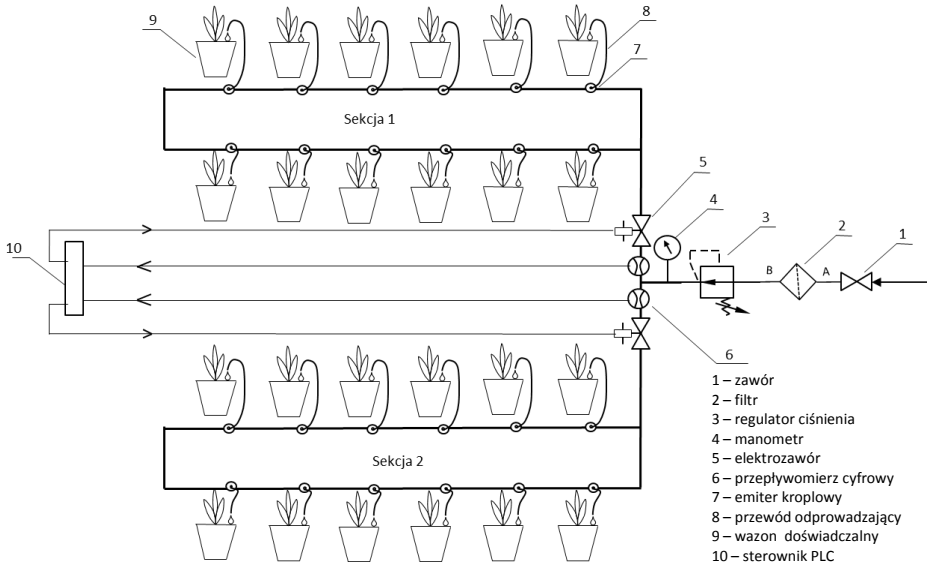
Podstawą automatyzacji regulacji wilgotności podłoża w wazonach doświadczalnych za pomocą sieci nawadniania kropłowego jest załączanie i przerywanie emisji wody zgodnie z przyjętymi założeniami doświadczalnymi czynnika wodnego. Załączanie i przerywanie emisji wody realizowane jest przez system sterowania. O zastosowaniu systemu sterowania decydują założenia metodyczne przeprowadzanego doświadczenia oraz możliwości techniczne. Niezależnie od przyjętego rozwiązania układ sterowania powinien być wyposażony w system zasilania awaryjnego, ponieważ ewentualna przerwa w zasilaniu może skutkować nie tylko utratą danych z okresu bez zasilania, lecz także spowodować odstępstwa od założeń metodycznych i niewiarygodność eksperymentu.

W przypadku doświadczeń, w których dozowana ma być konkretna objętość wody w określonym czasie, zastosowanie mogą znaleźć proste systemy sterowania, czyli regulatory czasowe załączające i odcinające napięcie elektryczne na elektrozawory. Znając wydatek wody emiterów w funkcji czasu i ich liczbę, można łatwo obliczyć czas potrzebny na dostarczenie określonej ilości wody do wazonów. Należy zaprogramować godzinę rozpoczęcia i zakończenia wydatkowania wody, które jest realizowane za pomocą sieci kropłującej. Instalacja taka nie odbiega od rozwiązań stosowanych powszechnie w ogrodnictwie (rys. 18). Zastosowanie więcej niż jednego poziomu nawadniania wymaga podzielenia sieci nawadniającej na sekcje. Każda sekcja wymaga zasilania załączanego przez oddzielny elektrozawór. W przedstawianych schematach – aby uprościć – przyjęto dwie sekcje. Należy zwrócić uwagę, że na wszystkich rysunkach (18–22) przedstawiających schematy instalacji nawadniającej ze względu na ich czytelność emiterzy kropłowe narysowano ideowo, sugerując, że pojedynczy wazon zasilany jest w wodę przez jeden emiter kropłowy. Zgodnie z wynikami prezentowanymi w punkcie 3.2.1.2.2 w celu zmniejszenia błędu doświadczalnego wskazane jest, aby pojedynczy wazon zasilany był przez trzy kropłowniki jednocześnie.



Rys. 18. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe – w oparciu o programowany czas nawadniania – znany stan techniki (opracowanie własne)

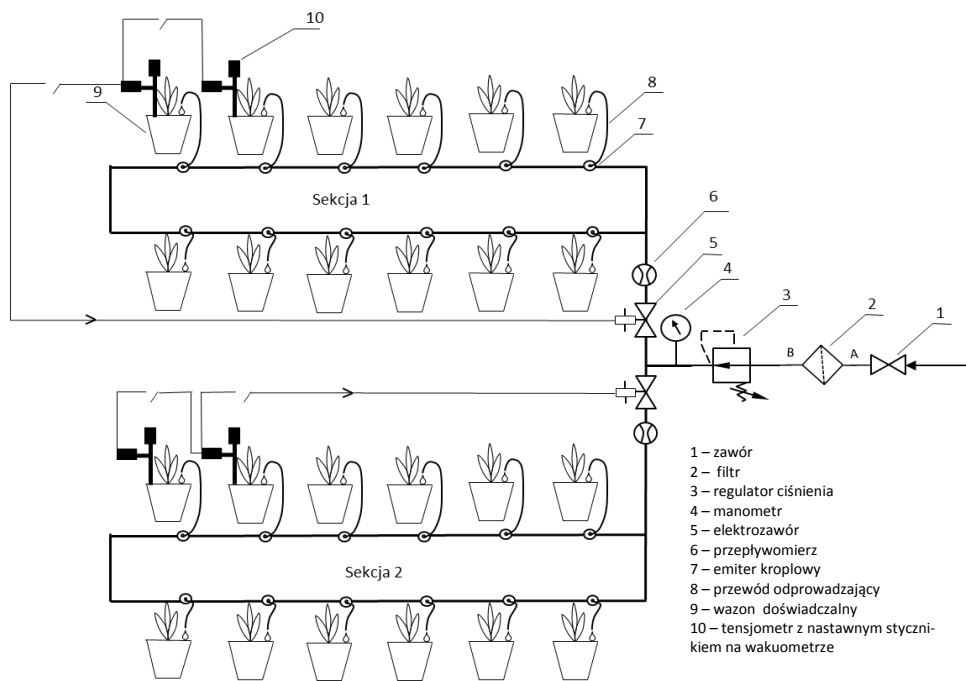
Biorąc pod uwagę jednak zmienność w czasie wydatku emiterów kroplowych (punkt 3.2.3.4), stwierdzono, że dozowanie takie jest obciążone błędem i wymaga kontroli za pośrednictwem przepływomierza. Rozwiązaniem jest zastosowanie przepływomierzy cyfrowych połączonych z odpowiednio zaprogramowanym sterownikiem. Określona ilość wody wtłoczona do przewodów zasilających rozdzielana jest przez emiterzy o ustalonym wydatku do poszczególnych wazonów. Nawet jeśli z czasem eksploatacji wydatek emiterów kroplowych ulega zmianie, to na ogół w równym stopniu dla wszystkich emiterów, a o objętości wody decyduje to, jaką dawkę kontrolowaną przez przepływomierz zaprogramowano. Wymagane są jednak sterowniki PLC (programowalny sterownik logiczny) przetwarzające zgodnie z programem informacje z urządzeń peryferyjnych, w tym przypadku przepływomierzy. Sterownik PLC musi mieć liczbę połączeń w bloku wejściowym i wyjściowym odpowiadającą liczbie przepływomierzy i elektrozaworów (rys. 19). Rozwiązanie takie w żaden sposób nie odnosi się jednak do wilgotności podłoża w wazonach, więc może znaleźć zastosowanie tylko w doświadczeniach, w których parametr ten nie jest wytyczną w ustalaniu dozowania wody do wazonów.



Rys. 19. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe – ze sterowaniem bazującym na programowanej dawce wody z odczytu przepływomierza – rozwiązanie autorskie

W przypadku doświadczeń, w których czynnik wodny regulowany jest w oparciu o wilgotność podłoża, zastosowanie mogą znaleźć rozwiązania o różnym stopniu złożoności. W każdym z nich jednak podstawą regulacji nawadniania jest pomiar wilgotności, do realizacji którego używa się określonego rodzaju sondy. W skrajnym uproszczeniu zastosowanie mogą mieć rozwiązania całkowicie analogowe, w których sonda z prostym stycznikiem po zarejestrowaniu ustalonych wartości progowych wilgotności podłoża steruje elektrozaworem. Dla takiego wariantu wykorzystać można tensjometry ze stycznikiem elektromagnetycznym (rys. 20). Nawet przy założeniu, że każda jednostka eksperymentalna (wazon) w obrębie przyjętego poziomu uwilgotnienia podłoża dla nawadnianej sekcji otrzymuje z emiterów kropłowych taką samą ilość wody, załączanie i przerywanie emisji wody nie może być realizowane na podstawie pomiarów wilgotności tylko jednego wazonu, a więc jednej sondy (tensjometru). Wynika to bowiem ze zmiennej reakcji poszczególnych roślin na kontrolowane i niekontrolowane czynniki doświadczenia. W warunkach doświadczeń z niewielką liczbą wazonów możliwe jest zastosowanie oddzielnego elektrozaworu dla każdego z nich uruchamianego na podstawie pomiaru wykonywanego dla każdego wazonu indywidualnie. Rozwiązanie takie jest jednak kosztowne. W doświadczeniach z większą liczbą wazonów w celu obniżenia kosztów można zastosować uproszczenie polegające na wyznaczeniu w każdej sekcji nawadniającej wazonów referencyjnych. W zaproponowanym rozwiązaniu sterowanie każdej sekcji oparte jest na dwóch tensjometrach, których wakuometry wyposażone są w stycznik zamykający obwód po przekroczeniu nastą-

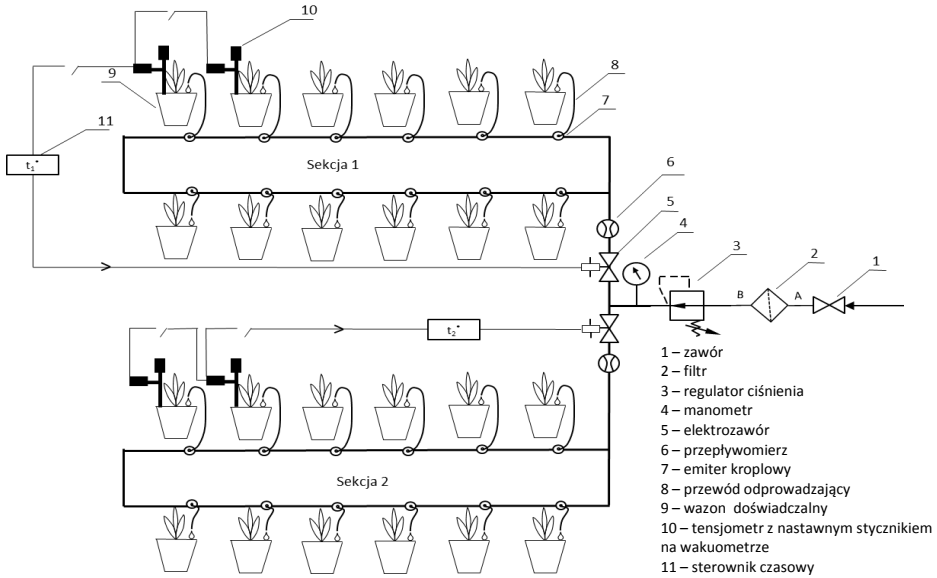
wianej wartości podciśnienia. Oba styczniki połączone są szeregowo, stąd jeśli na obu tensjometrach wartość podciśnienia przekroczy ustalony próg, obwód się zamyka i elektrozawory otwierają dopływ wody do przewodów zasilających. Po osiągnięciu zakładanej wilgotności i spadku siły ssącej choćby na jednym z tensjometrów obwód zostaje przerwany, a tym samym ustaje emisja wody do wazonów.



Rys. 20. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe – ze sterowaniem wykorzystującym pomiar wilgotności podłoża tensjometrami wyposażonymi w wakuometr z nastawnym stycznikiem – rozwiązanie autorskie

Podstawowym mankamentem takiego rozwiązania są przesterowania. Od momentu zamknięcia obwodu elektrycznego tensjometr – elektrozawór woda emitowana jest do wazonu do czasu, gdy obwód zostanie przerwany, a ma to miejsce w chwili przekroczenia wartości progowej ustawionej na wakuometrze. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że aplikowana woda rozchodzi się w podłożu z określoną prędkością. Zanim dotrze do ceramicznego spieku tensjometru (lub sond innego typu) i zmieni jego odczyt potrzebny do przesterowania nawadniania, zadana ilość wody może być większa niż wymagana dla danego wazonu (punkt 3.2.3.4, rys. 29). Efekt przesterowań jest głównie powodowany przez upływ czasu potrzebnego na wyrównanie się wilgotności podłoża w objętości wazonu, dlatego korzystnie jest stosować emiterzy o jak najmniejszej wydajności oraz częste – ale krótkie – cykle nawodnieniowe. Przesterowania wynikają również

z inercji samego tensjometru. Prostym rozwiązaniem tego problemu jest wymuszenie przerw o ustalonym interwale w aplikacji wody pomimo nieosiągniętych nastawień progowych tensjometru (punkt 3.2.3.4). Jest to powszechnie stosowana metoda regulacji bardzo różnych procesów określana jako PWM (*Pulse Width Modulation*) [Hausmair i in. 2013, Du i Robertson 2017]. Zatem zmniejszenie przesterowań w rozwiązaniach analogowych można uzyskać przez zastosowanie sterownika czasowego załączającego napięcie elektryczne w ustalonych interwałach, działającego niezależnie od pomiarów (rys. 21).

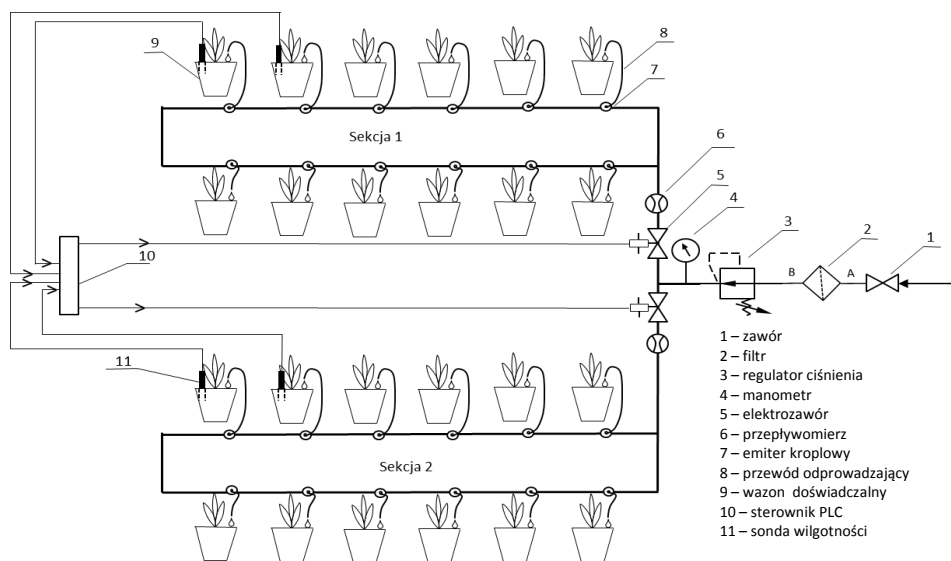


Rys. 21. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe – ze sterowaniem wykorzystującym pomiar wilgotności podłoża tensjometrami wyposażonymi w wakuometr z nastawnym stycznikiem i sterownikiem czasowym – rozwiązanie autorskie

Podstawowe zalety przedstawionego rozwiązania to niewielki koszt całej instalacji, jej prosty montaż i obsługa. Niestety system taki nie pozwala na monitorowanie wilgotności podłoża i nie daje możliwości podglądu aktualnych wyników oraz interwencji w razie awarii systemu. Kolejnym mankamentem tego rozwiązania jest problem związany z obsługą tensjometrów, ponieważ przy większych wartościach podciśnienia przestają działać prawidłowo, co ogranicza zakres minimalnej możliwej do testowania wilgotności podłoża. Stąd ten system sterowania nie nadaje się do doświadczeń, w których wilgotność podłoża ma być utrzymywana na niskim poziomie.

Obecne rozwiązania punktowego pomiaru wilgotności gleby pozwalają na zastosowanie technologii cyfrowej, co daje szerokie możliwości monitoringu i sterowania. Pozwala to również na stosowanie technik bezprzewodowych i bieżący podgląd danych, łącznie z uzyskiwaniem bezpośrednich powiadomień

w sytuacjach awarii poszczególnych elementów systemu. System nawadniania doświadczeń wazonowych opierający się na rozwiązaniach cyfrowych przedstawiono na schemacie (rys. 22). Emisja wody z kroplowników jest efektem uruchomienia elektrozaworu na każdą sekcję osobno przez odpowiednio zaprogramowany sterownik PLC w oparciu o wyniki uzyskane z sond (rys. 22) umieszczonych w wazonach referencyjnych. Wszystkie wazony w sekcji nawadniane są taką samą dawką wody ustaloną na podstawie wyników z dwóch lub większej liczby sond. Kryterium rozpoczęcia i zakończenia emisji wody może być średnia z pomiarów wilgotności, ale oprócz wartości średniej powinny być brane pod uwagę wartości skrajne. Ustalenie wartości progowych trzech parametrów, tj. średniej, max. i min. wartości z sond umieszczonych w wazonach referencyjnych, uzależnione jest od założeń metodycznych doświadczenia. Zastosowanie sterownika PLC pozwala również wykorzystywać stosowne modele matematyczne zapobiegające przesterowaniom lub proste stałe interwały – podobnie jak opisano to wyżej. Niezależnie od przyjętego sposobu zapobiegania przesterowaniom sprowadza się to do tego, że w trakcie nawadniania cykle emisji wody są częste, ale krótkie. Stąd szczególnie ważne jest, żeby właściwie dobrać emiterzy tak, aby wyposażone były one w *Stop-Drip* i tak zaprojektować sieć nawadniającą, aby na całej długości przewodów zasilających ciśnienie wody były jednakowe.



Rys. 22. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe – ze sterowaniem wykorzystującym pomiar wilgotności podłoża i oprogramowanie sterownika PLC – rozwiązanie autorskie

W celu prawidłowego działania systemu sterowania i zmniejszenia przesterowań, ale również w celu osiągnięcia wysokiej wiarygodności danych z doświadczeń wazonowych należy wybrać taki sposób aplikowania wody do wa-

zonów, który pozwoli zminimalizować różnice wilgotności podłoża w całej objętości wazonu. Konstrukcje wazonów doświadczalnych są bardzo różne, ale najczęstsze zastosowanie mają takie, które umożliwiają nawadnianie podsiąkowe od dna. Zastosowanie więcej niż jednego emitera pozwala na zwiększenie liczby punktów, z których rozprzestrzenia się woda na całą objętość wazonu. Stąd można nawadniać wazon za pomocą metody podsiąkowej od dna oraz jednocześnie od powierzchni.

3.2.3. Studium wariantów

Studium obejmuje trzy warianty doświadczeń, jest elementem cyklu badań realizowanych w latach 2005–2015 pod osłoną foliową w Stacji Badawczej Wydziału Rolnictwa i Biotechnologii w Mochelku (53°13'N; 17°51'E). We wszystkich doświadczeniach testowano wpływ czynnika – wilgotności podłoża, regulowanej za pomocą autorskich rozwiązań systemu nawadniającego.

3.2.3.1. Założenia ogólne doświadczeń dla wariantów

Wariant 1

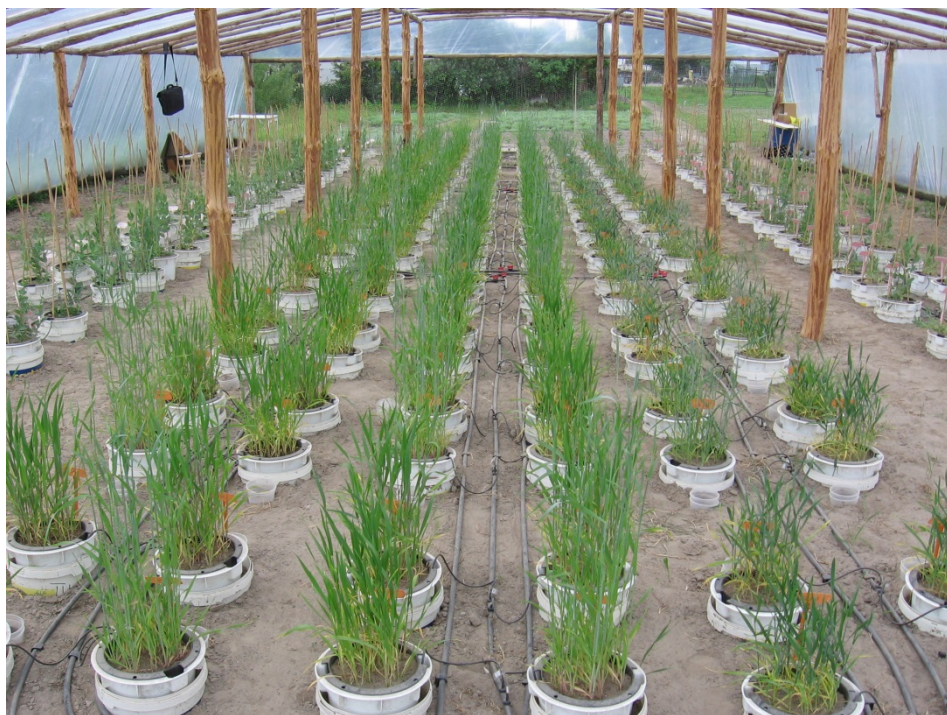
Doświadczenie wazonowe zrealizowano z użyciem homogenicznych podłoży glebowych o składzie granulometrycznym piasku gliniastego lekkiego. Wazonami doświadczalnymi były pojemniki z tworzywa sztucznego o średnicy 28 cm (powierzchnia 0,062 m²) i o głębokości 22 cm. Każdy wazon zawierał 14 kg podłoża. Woda do podłoża aplikowana była przez umieszczoną w osi wazonu perforowaną plastikową rurkę sięgającą do dna (fot. 2).



Fot. 2. Widok ogólny na doświadczenie wazonowe – wariant 1 (fot. autor)

Wariant 2

Doświadczenie wazonowe zrealizowano z użyciem homogenicznych podłoży glebowych o składzie granulometrycznym piasku gliniastego lekkiego. Wykorzystano dwuczęściowe wazony doświadczalne typu Kocha o średnicy wewnętrznej 22 cm (powierzchnia 0,038 m²) i o głębokości 24 cm. Nawodnienie odbywało się przez podsiąk kapilarny od dna. Każdy wazon zawierał 8 kg podłoża (fot. 3).



Fot. 3. Widok ogólny na doświadczenie wazonowe – wariant 2 (fot. autor)

Wariant 3

Doświadczenie wazonowe w wariacie trzecim było metodycznie zbieżne z doświadczeniem w wariacie drugim. Wariant drugi i trzeci różniły się obiektami doświadczalnymi i technicznym rozwiązaniem systemu nawadniającego.

3.2.3.2. Obiekty doświadczalne

Wariant 1

Doświadczenie dwuczynnikowe:

A – siewy czyste i mieszanki owsa z łubinem żółtym (obsada roślin):

Owies 10 szt.·wazon⁻¹

Owies 20 szt.·wazon⁻¹

Owies 30 szt.·wazon⁻¹

Łubin 5 szt.·wazon⁻¹

Owies 10 + łubin 5 szt.·wazon⁻¹

Owies 20 + łubin 5 szt.·wazon⁻¹

Owies 30 + łubin 5 szt.·wazon⁻¹

B – poziom wilgotności podłoża wazonów sekcji referencyjnej: niski, umiarkowany, wysoki.

W przypadku wilgotności podłoża ściśle określony został tylko poziom wysoki i odpowiadał on 80% ppw. (połowej pojemności wodnej). Wilgotność podłoża dla poziomów umiarkowanego i niskiego wynikała ze zmniejszonej odpowiednio dwu- i trzykrotnie ilości wody dozowanej dla obiektów z poziomem wilgotności wysokim (80% ppw).

Obiekty doświadczalne były kombinacjami poziomów wszystkich czynników. Łącznie było 21 obiektów w 6 powtórzeniach (126 jednostek eksperymentalnych).

Wariant 2

Doświadczenie dwuczynnikowe:

A – gatunki roślin: pszenica jara, pszenżyto jare, żyto jare

B – wilgotność podłoża:

początkowa	końcowa	nr sekcji
L	L	1
L	M	2
L	H	3
M	M	4
M	L	5
M	H	6
H	H	7
H	M	8
H	L	9

- L (low) – odpowiada warunkom posuszonym – średnia wilgotność podłoża jednostek eksperymentalnych w sekcji referencyjnej = 6% (v/v)
- M (medium) – odpowiada warunkom uznawanym za optymalne – średnia wilgotność podłoża jednostek w sekcji referencyjnej = 16% (v/v)
- H (high) – odpowiada warunkom wysokiego uwilgotnienia – średnia wilgotność podłoża jednostek w sekcji referencyjnej = 26% (v/v)

W trakcie wegetacji – w fazie Zadoks 49 pszenżyta – nastąpiła zmiana poziomu wilgotności.

Obiekty doświadczalne, łącznie 27, są kombinacjami poziomów wszystkich czynników. Obiekty z pszenicą jarą testowano w 6 powtórzeniach, z pszenżytem i żytem jarym – w 5 powtórzeniach. Daje to łącznie 144 jednostki eksperymentalne. Nieortogonalność przy tak ustalonych obiektach wynikała z możliwości przestrzennego rozlokowania jednostek doświadczalnych. Do analiz statystycznych dla wszystkich obiektów przyjęto pięć replikacji.

Wariant 3

Doświadczenie dwuczynnikowe, roślina testowana – pszenica jara:

A – nawożenie N i aplikacja bioregulatorów:

- N1 Kontrola
- N2 Kontrola
- N1 + CCC (Chlorek chlorocholiny)
- N2 + CCC
- N1 + Atonik SL
- N2 + Atonik SL
- N1 + CCC + Atonik SL
- N2 + CCC + Atonik SL

N1 – dawka azotu 0,25 g·wazon⁻¹ przedsiewnie w postaci saletry amonowej, wymieszana z glebą

N2 – dawka azotu 0,25 g·wazon⁻¹ przedsiewnie w postaci saletry amonowej, wymieszana z glebą + dawka azotu 0,3 g·wazon⁻¹ podawana na dno wazonu w I dekadzie maja.

CCC w dawce 0,0025 ml·wazon⁻¹, Zadoks 31

Atonik SL w trzech dawkach po 0,015 ml·wazon⁻¹, Zadoks 31, 39, 51

B – okres utrzymania wilgotności podłoża sekcji referencyjnej (dd – dzień, mm – miesiąc):

10.04–15.05 **M** – 15.05–15.06 **L** – 15.06–29.07 **L**

10.04–15.05 **M** – 15.05–15.06 **L** – 15.06–29.07 **M**

10.04–15.05 M – 15.05–15.06 M – 15.06–29.07 L

10.04–29.07 M

- L (low) – odpowiada warunkom posuszonym – średnia wilgotność podłoża jednostek w sekcji referencyjnej $W_o = 6\%$ (v/v) (wilgotności objętościowej)
- M (medium) – odpowiada warunkom uznawanym za optymalne – średnia wilgotność podłoża jednostek w sekcji referencyjnej $W_o = 16\%$ (v/v)

Od momentu siewu pszenicy jarej (10 kwietnia) do 15 maja we wszystkich wazonach utrzymywano wilgotność podłoża na poziomie M. Pierwsza zmiana poziomu wilgotności stosownie do poziomów czynnika w trakcie wegetacji miała miejsce 15 maja – a druga – 15 czerwca.

Obiekty doświadczalne, łącznie 32 w 6 replikacjach, są kombinacjami poziomów wszystkich czynników. Daje to łącznie 192 jednostki eksperymentalne.

3.2.3.3. Rozwiązania techniczne systemów nawadniających

Wariant 1

W prezentowanym rozwiązaniu instalacja nawadniająca wykorzystywana w doświadczeniu wazonowym (rys. 23) składała się z:

- systemu zasilania w wodę (poz. 1–5),
- systemu zasilania elektrycznego (poz. 6),
- systemu sterującego (poz. 7–9),
- sieci zasilającej wazony w wodę (poz. 10–12).

Woda użyta w doświadczeniu pochodziła z miejscowego ujęcia wody stacji doświadczalnej. System zasilania w wodę składał się z zaworów, filtra, przepływomierza, regulatora ciśnienia i manometru. W sieci nawadniającej utrzymywano ciśnienie wody na poziomie 2 barów.

System zasilania elektrycznego składał się z akumulatora 12 V i ładowarki podłączonych na stałe do lokalnej sieci elektrycznej. Zapewniało to stałe podtrzymywanie napięcia w systemie sterującym.

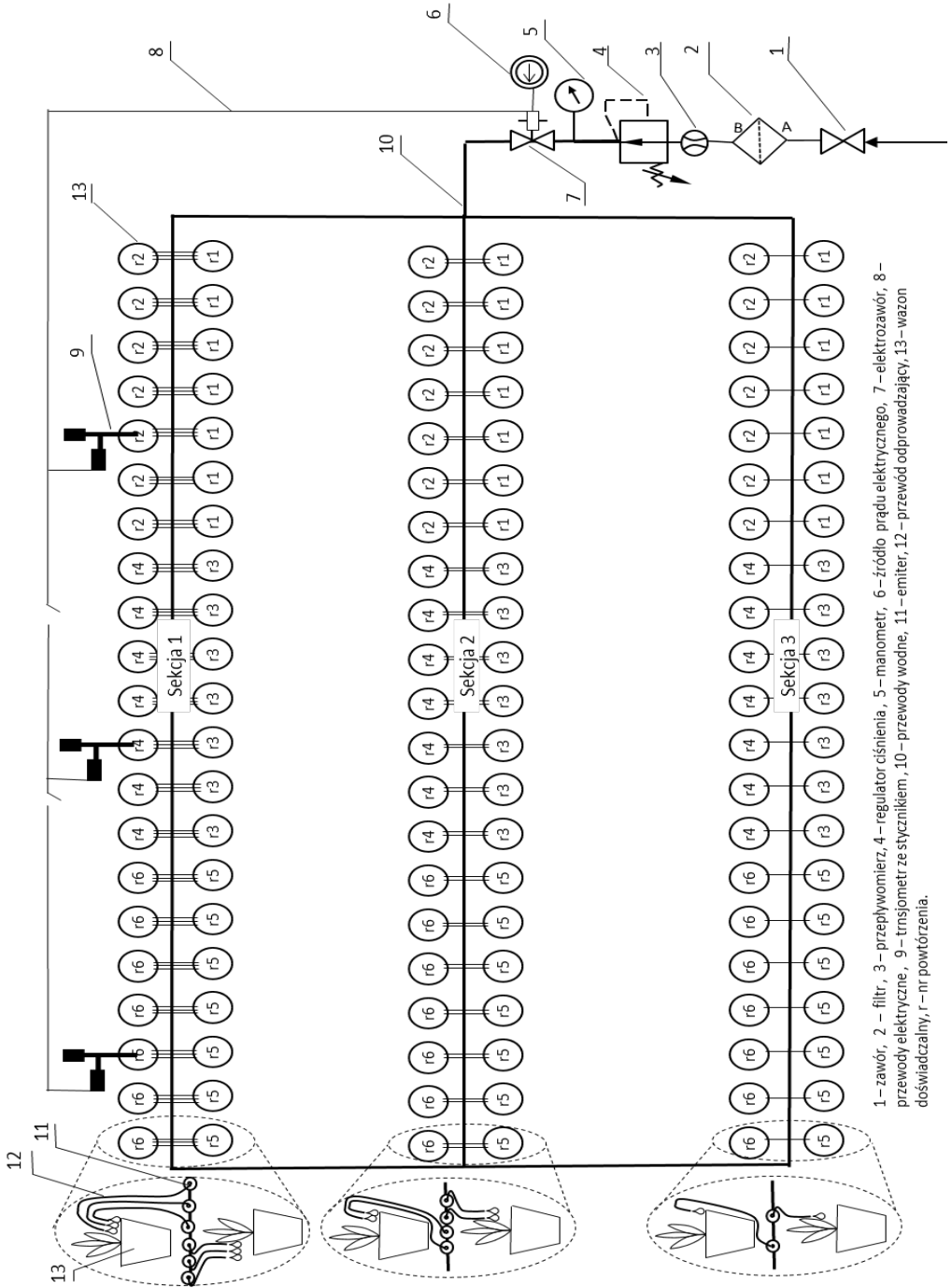
System sterujący stanowiły trzy tensjometry (Irrometer model RA)¹⁰, przewody elektryczne i elektrozawór. Wakuometry tensjometrów miały nastawne styki elektromagnetyczne (IRROMETER PAT.3569062) pozwalające na zadanie progowej wartości podciśnienia zamykającego obwód elektryczny. Tensjometry umieszczono w wazonach referencyjnych, które stanowiły trzy powtórzenia (r2, r4, r6) obiektu: owies 10 + łubin 5 szt. wazon⁻¹, wilgotność podłoża wysoka (80% ppw.). Dno ceramiki tensjometrów umieszczone było 10 cm nad dnem wazonu. Wartość progową stycznika ustalono na -30 kPa, czyli nieco wyższą niż wartość stwierdzoną dla poziomu wilgotności odpowiadającej

¹⁰ www.irrometer.com/pdf/supportmaterial/ADG2006.pdf.

80% ppw. (-25 kPa) ze względu na przesterowania nieuniknione w takim systemie sterownia. Aby zabezpieczyć wazony przed aplikacją zbyt dużej dawki wody przy (ewentualnej) awarii styczników, zastosowano trzy tensjometry, których styczniki połączone były szeregowo i nastawione na taką samą wartość podciśnienia. Powodowało to, że we wszystkich wazonach referencyjnych siła ssąca podłoża musiała osiągnąć wartość -30 kPa i dopiero wtedy elektrozawór załączał nawadnianie. Zmniejszenie siły ssącej chociażby w jednym z trzech wazonów referencyjnych skutkowało przerwaniem obwodu elektrycznego i elektrozawór zatrzymywał aplikację wody.

Sieć zasilająca wazony w wodę składała się z przewodów zasilających, emiterów i przewodów odprowadzających wodę z emiterów do wazonów. Przewodami zasilającymi były standardowe elastyczne rury o średnicy 15 mm stosowane w tego typu instalacjach. Przewody stanowiły obwód zamknięty podzielony na trzy sekcje odpowiednio do ustalonych trzech poziomów wilgotności podłoża w wazonach. Aplikację wody do wazonów zapewniały przetestowane wcześniej (punkt 3.2.1.2.1) emitery firmy TORO NGE o wydajności $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, od których woda odprowadzana była do wazonów przez gumowy przewód o średnicy 5 mm i o długości 60 cm. Wazony z wysokim poziomem wilgotności zasilane były przez trzy emitery każdy, tj. trzy emitery stanowiły jeden punkt emisji. Ujścia wężyków doprowadzających wodę z emitera do wazonu umieszczone były w sięgającej do dna perforowanej rurce zlokalizowanej w pionowej osi wazonu. Dla każdego z wazonów z umiarkowanym uwilgotnieniem podłoża punkt emisji stanowiły dwa emitery, a dla wazonów z niskim poziomem wilgotności punktem emisji był jeden emiter.

Układ doświadczalny odpowiadał połowemu układowi *split-plot* w sześciu replikacjach. Obok każdego z wazonów umieszczono pojemniki z tworzywa sztucznego o pojemności $0,5 \text{ dm}^3$ (fot. 2), które służyły do sprawdzania równomierności wydatkowanej przez emitery wody w trakcie wegetacji. Na czas testowania emiterów wyjmowano wężyki z wazonów i umieszczano w przedmiotowych pojemnikach. Ręcznie zamykano obwód elektryczny na 4 minuty (czas wynikał z wydajności punktu emisyjnego i z pojemności naczynia kontrolnego) i za pomocą cylindra miarowego określano ilość wody aplikowanej przez każdy punkt emisji. Przepływomierz pozwalał monitorować ilości wody zużytej w doświadczeniu i umożliwiawał przeliczanie jej ilości aplikowanej do wazonów.



Rys. 23. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe w wariancie nr 1 (rozwiązanie autorskie)

Wariant 2

W prezentowanym rozwiązaniu instalacja nawadniająca wykorzystywana w doświadczeniu wazonowym (rys. 24) składała się z:

- systemu zasilania w wodę (poz. 1–5),
- systemu zasilania elektrycznego (poz. 6),
- systemu sterującego (poz. 7–10),
- sieci zasilającej wazony w wodę (poz. 11–17).

System zasilania w wodę i podtrzymania napięcia był taki sam jak w wariantcie 1.

System sterujący własnego pomysłu autora został wykonany w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie. System stanowiło 8 sond TDR (rys. 24, poz. 9) (fot. 6) połączonych przewodowo z ośmiokanałowym miernikiem wilgotności TDR (fot. 5). Przewody sond długości 9 m umieszczono w elastycznych rurach ochronnych. Odczyty wilgotności, temperatury i zasolenia podłoża wykonywane były w odstępach 120 s i rejestrowane przez MIDL (*Multi Interface Data Logger*). Sterownik PLC typu ADAM 5510 (*PC-based Programmable Controller*)¹¹ został zaprogramowany tak, aby na podstawie średniej oraz wartości min. i max. ze wskazanych sond załączać i wyłączać wskazane elektrozawory instalacji nawadniającej (poz. 7, fot. 4).

Sondy umieszczono w wazonach referencyjnych:

- L – 3 sondy (po jednej w wazonach z pszenicą, pszenżytem i żytem),
- M – 2 sondy (po jednej w wazonach z pszenicą i żytem),
- H – 3 sondy (po jednej w wazonach z pszenicą, pszenżytem i żytem),

w których przez cały okres wegetacji utrzymywana była wilgotność na ustalonym poziomie. Ustawienia parametrów wilgotności (v/v) zadanych θ dla sterownika PLC były następujące:

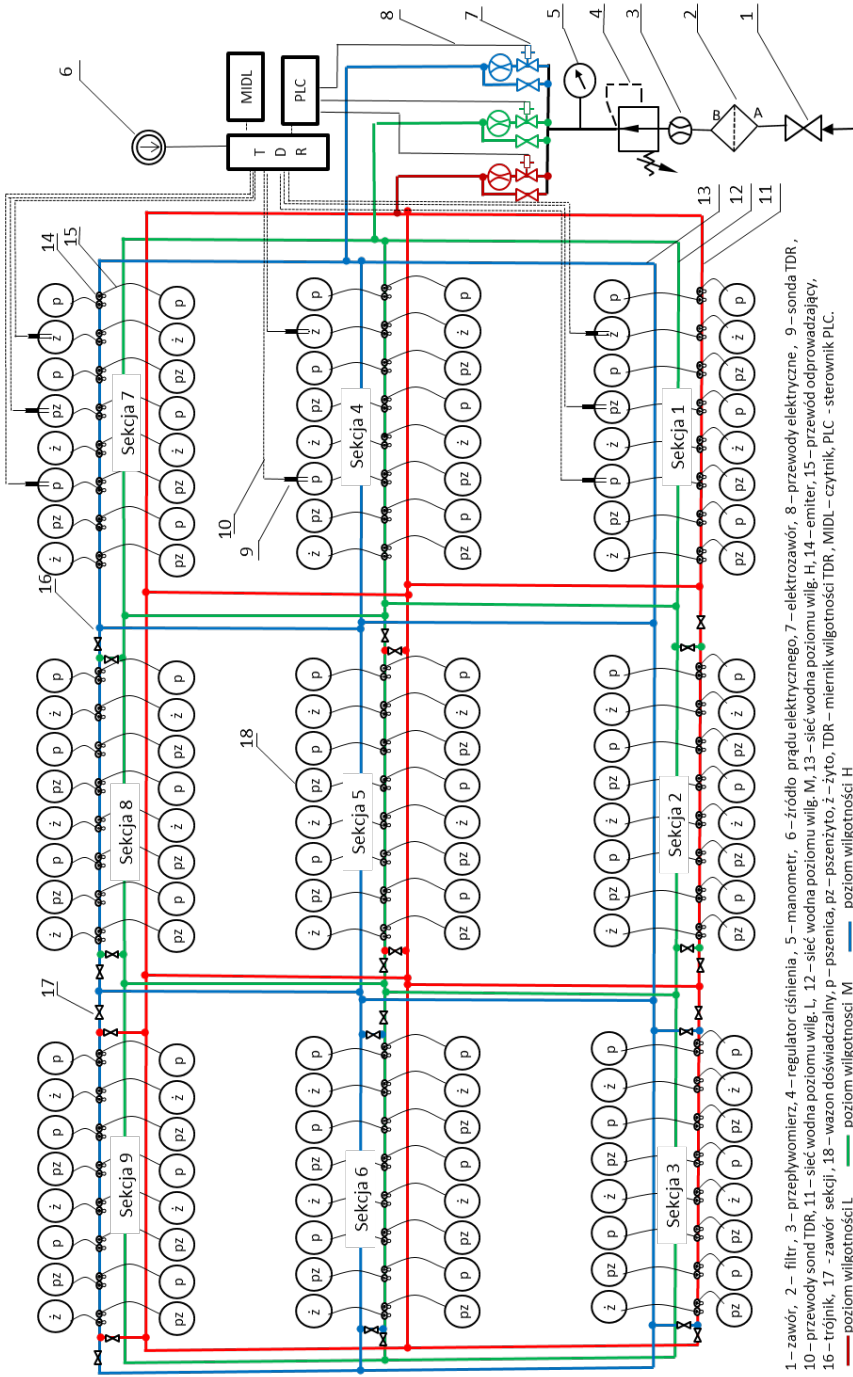
$$L - \bar{x} = 6\%\theta, x_{min.} = 2\%\theta, x_{max.} = 10\%\theta$$

$$M - \bar{x} = 16\%\theta, x_{min.} = 12\%\theta, x_{max.} = 20\%\theta$$

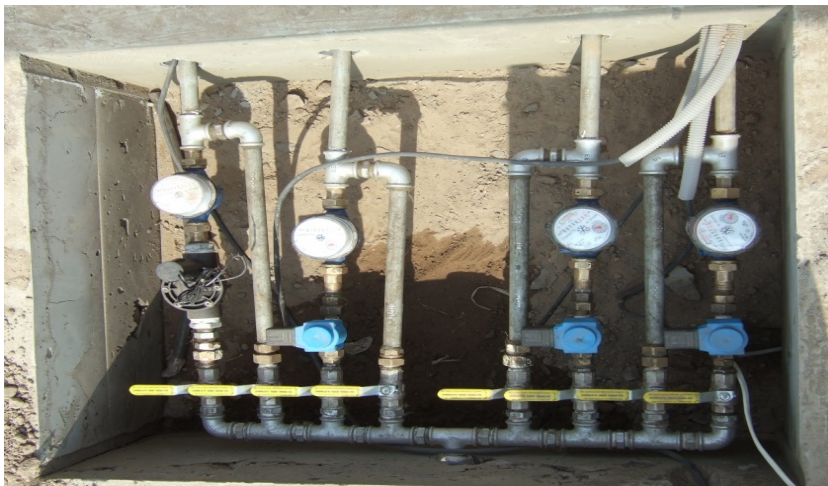
$$H - \bar{x} = 26\%\theta, x_{min.} = 22\%\theta, x_{max.} = 30\%\theta$$

Program załączał elektrozawór, a tym samym emisję wody, gdy na jednej z sond wilgotność podłoża dla danego poziomu spadła poniżej wartości $x_{min.}$ lub poniżej \bar{x} , natomiast wyłączał emisję wody, gdy przekroczona została wartość \bar{x} lub na jednej z sond wartość $x_{max.}$

¹¹ www.advantech.com/products/modular-i-o-system-adam-5000-series/sub_1-368qr0.



Rys. 24. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe w wariancie nr 2 (rozwiązanie autorskie)



Fot. 4. Zestaw elektrozasorów i przepływomierzy sieci nawadniającej (fot. autor)



Fot. 5. TDR, MIDL i sterownik PLC (fot. autor)



Fot. 6. Wazon referencyjny z sondą TDR (fot. autor)

Sieć zasilająca wazony w wodę składała się z przewodów zasilających, emiterów i przewodów odprowadzających wodę z emiterów do wazonów. Przewodami zasilającymi były standardowe elastyczne rury o średnicy 15 mm stosowane w tego typu instalacjach. Przewody stanowiły obwód zamknięty podzielony na dziewięć sekcji – odpowiednio do ustalonych dziewięciu kombinacji poziomów wilgotności podłoża w wazonach. Wazon referencyjne dla poziomu wilgotności podłoża L były zlokalizowane w sekcji nr 1, dla poziomu M – w sekcji nr 4 i dla poziomu H – w sekcji nr 7. W sekcjach 1, 2 i 3 wilgotność podłoża od momentu wschodów utrzymywana była na poziomie L. W fazie wegetacyjnej Zadoks 49 za pomocą stosownych zaworów (rys. 24, poz. 17) sekcję 2 przełączono na zasilanie w wodę dla poziomu wilgotności podłoża M, a sekcję 3 – dla poziomu wilgotności podłoża H. Podobnie przełączano zasilanie w wodę dla pozostałych obiektów. Każdy wazon zasilany był przez jeden emiter. Aplikację wody do wazonów zapewniały przetestowane i wyselekcjonowane w laboratorium emitery firmy TORO o wydajności $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, od których woda odprowadzana była do wazonów przez gumowy przewód o średnicy 5 mm i o długości 60 cm.

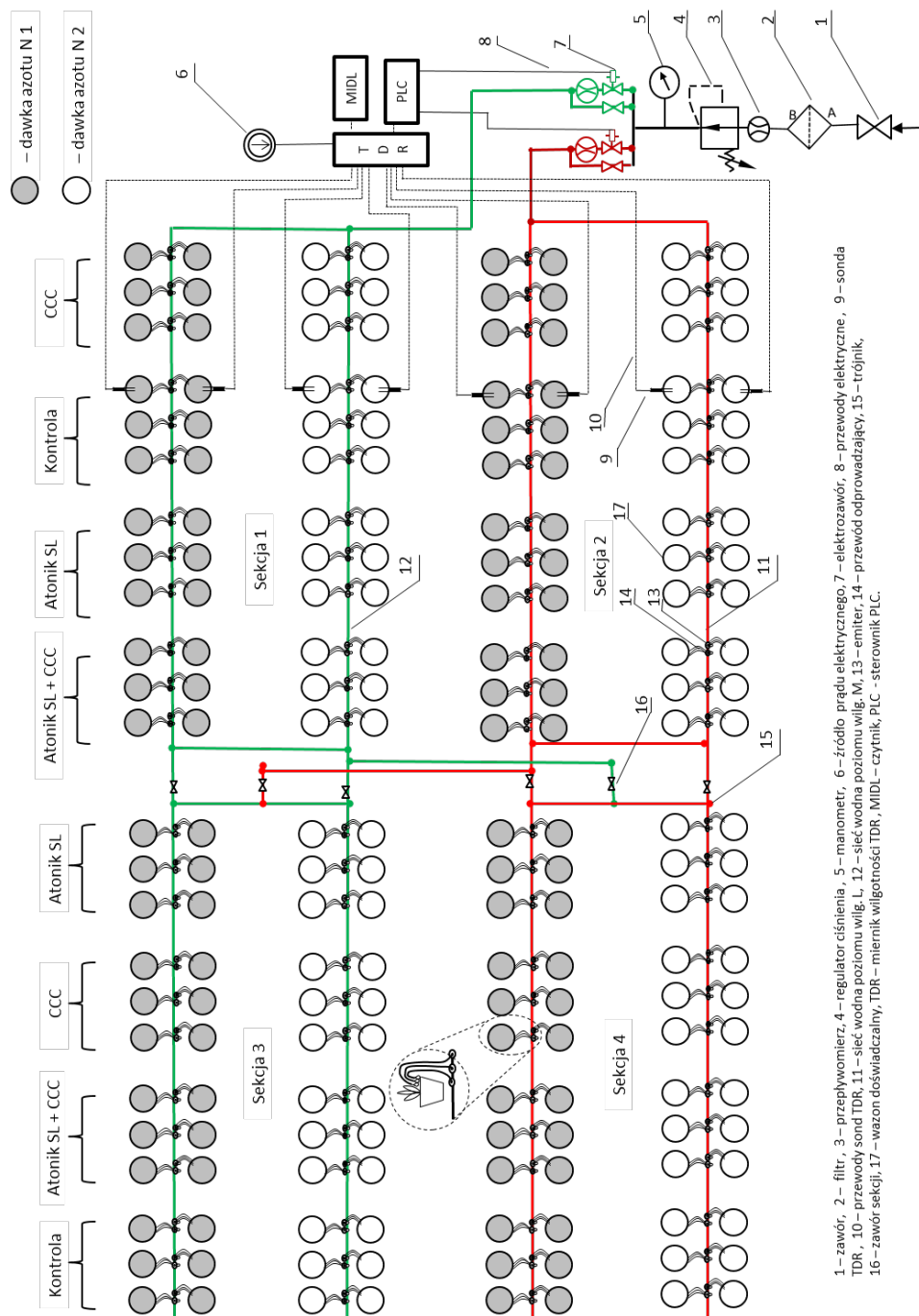
Układ doświadczalny odpowiadał nieortogonalnemu połowemu układowi *split-plot*. Obok każdego z wazonów umieszczono plastikowe pojemniki o pojemności $0,5 \text{ dm}^3$ (fot. 6), które służyły do sprawdzania równomierności wydawkowanej przez emitery wody w trakcie wegetacji. Na czas testowania emiterów wyjmowano wężyki z wazonów i umieszczano w przedmiotowych pojemnikach. Ręcznie przełączano zawory (fot. 4) na obieg obchodzący elektrozawory na 10 minut (czas wynikał z wydajności pojedynczego kroplownika i z pojemności naczynia kontrolnego) i za pomocą cylindra miarowego określano ilość wody aplikowanej przez każdy punkt emisji. Dla każdego z elektrozaworów zamontowano przepływomierz. Zainstalowano również przepływomierz ogólny na całą instalację. Stosowne różnice odczytu przepływomierzy umożliwiały monitorowanie ilości wody zużytej w doświadczeniu i umożliwiały przeliczanie jej ilości aplikowanej do wazonów.

Wariant 3

W prezentowanym rozwiązaniu instalacja nawadniająca wykorzystywana w doświadczeniu wazonowym (rys. 25) składała się z:

- systemu zasilania w wodę (poz. 1–5),
- systemu zasilania elektrycznego (poz. 6),
- systemu sterującego (poz. 7–10),
- sieci zasilającej wazony w wodę (poz. 11–16).

Zasadniczo wariant trzeci był bardzo podobny do wariantu drugiego. Poza oczywistymi różnicami w budowie sieci nawadniającej, wynikającymi z testowania innych obiektów doświadczalnych, tym co odróżniało wariant trzeci, było zastosowanie jako punktu emisji trzech emiterów. Zatem każdy wazon doświadczalny zasilany był jednocześnie przez trzy emitery.



Rys. 25. Schemat instalacji nawadniającej – doświadczenie wazonowe w wariancie nr 3 (rozwiązanie autorskie)

Sondy umieszczono w wazonach referencyjnych:

- L – 4 sondy (dwie w obiektach kontrolnych i z dawką azotu N1 oraz dwie w obiektach kontrolnych i z dawką azotu N2),
- M – 4 sondy (dwie w obiektach kontrolnych i z dawką azotu N1 oraz dwie w obiektach kontrolnych i z dawką azotu N2),

w których przez cały okres wegetacji utrzymywana była wilgotność objętościowa na ustalonym poziomie. Ustawienia parametrów wilgotności (v/v) zadanych θ dla sterownika PLC były następujące:

$$L - \bar{x} = 6\%\theta, x_{min.} = 2\%\theta, x_{max.} = 10\%\theta$$

$$M - \bar{x} = 16\%\theta, x_{min.} = 12\%\theta, x_{max.} = 20\%\theta$$

Załączanie elektrozaworu uruchamiane było zgodnie z tymi samymi założeniami jak w wariancie nr 2.

Wazony referencyjne dla poziomu wilgotności podłoża M były zlokalizowane w sekcji nr 1, dla poziomu L – w sekcji nr 2. We wszystkich sekcjach wilgotność podłoża od momentu wschodów utrzymywana była na poziomie M. Po wschodach wilgotność podłoża zróżnicowano zgodnie z poziomami czynnika. W fazie wegetacyjnej Zadoks 49 za pomocą stosownych zaworów (rys. 25, poz. 16) sekcję 3 przełączono na zasilanie w wodę dla poziomu wilgotności podłoża L, a sekcję 4 – dla poziomu wilgotności podłoża M.

Układ doświadczalny odpowiadał połowemu układowi *split-block* w sześciu replikacjach. Wydatek emiterów testowano tak samo jak w wariancie 2, z tą różnicą, że ze względu na większą wydajność punktów emisji czas aplikacji wody wynosił 4 minuty.

3.2.3.4. Analiza zmienności aplikacji wody

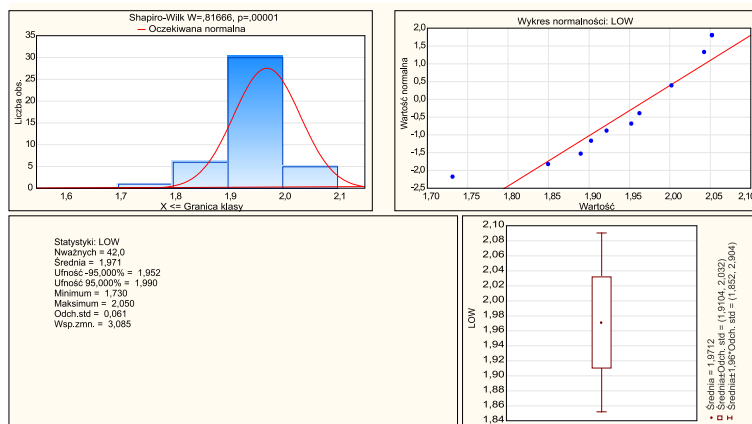
Wariant 1

Budując sieć nawadniającą doświadczenia wazonowego realizowanego w tym wariancie, użyto emiterów firmy TORO o wydatku $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ wody, przy czym nie testowano ich przed montażem. Zgodnie z wcześniej przedstawionymi założeniami w wariancie pierwszym dla każdego z poziomów wilgotności przeznaczono po 42 wazony doświadczalne. Wazony z poziomem wilgotności L zasilane były w wodę przez punkt emisyjny złożony z jednego emitera, z poziomem wilgotności M – z dwóch emiterów, a H – z trzech emiterów.

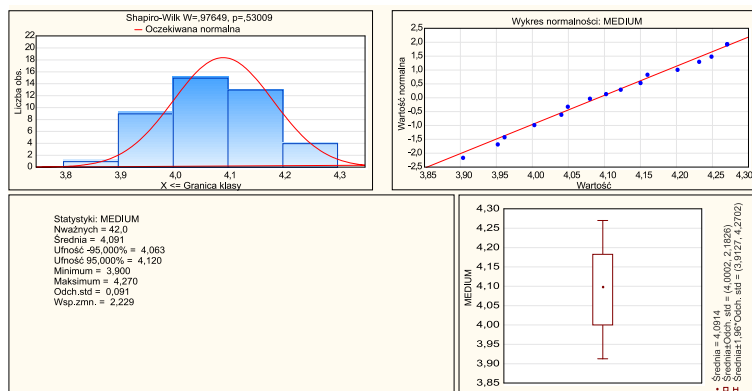
Po dwóch tygodniach eksploatacji systemu przeprowadzono test wydatku emiterów. Okazało się, że estymowany dla poziomu wilgotności L (z dokładnością 0,001, $n = 42$, $\alpha = 0,05$) przedział nie pokrywa się z wartością oczekiwaną, a średnia wydatku wody dla próby jest niższa od zakładanej $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ o 1,44% (rys. 26). Rozkład lewostronnie skośny wskazuje, że więcej niż połowa punktów emisyjnych cechowała się mniejszą od średniej objętością aplikowanej wody. Współczynnik zmienności był na poziomie 3,09%. Również dla poziomu wilgotności podłoża M estymowany przedział (z dokładnością 0,001) nie po-

krywał się z wartością oczekiwaną – $4 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. W tym przypadku jednak średnia z próby była większa od zakładanej o 2,29% (rys. 27). Stwierdzono jednak niższy współczynnik zmienności, tj. 2,23%. Objętość aplikowanej wody dla punktów emisji poziomego wilgotności podłoża H również była wyższa od oczekiwanej, a średnia z próby przekraczała tę wartość o 2,13% (rys. 28). Współczynnik zmienności cechował się jednak w tym przypadku najmniejszą wartością na poziomie 2,05%.

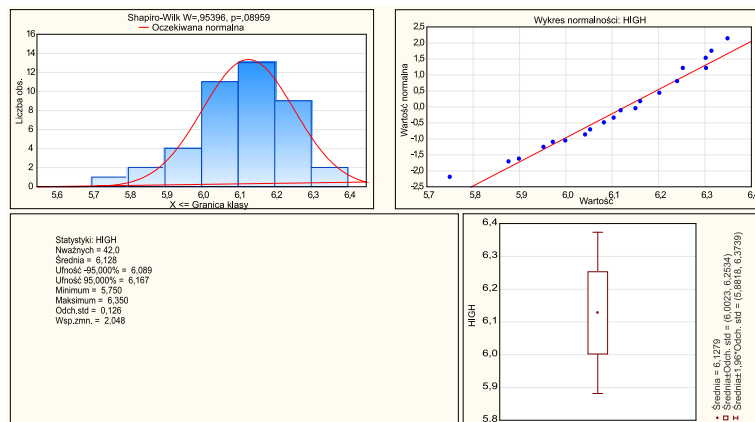
Uzyskane wyniki empiryczne potwierdzają przeprowadzoną symulację matematyczną (tabela 6), z której wynika, że wraz z rosnącą liczbą emiterów w punkcie emisji maleje zmienność wydatkowanej wody, zwiększa się zatem jej precyzja.



Rys. 26. Podstawowe miary opisowe objętości wody aplikowanej przez punkty emisji dla poziomu wilgotności podłoża L (opracowanie własne)



Rys. 27. Podstawowe miary opisowe objętości wody aplikowanej przez punkty emisji dla poziomu wilgotności podłoża M (opracowanie własne)



Rys. 28. Podstawowe miary opisowe objętości wody aplikowanej przez punkty emisji dla poziomu wilgotności podłoża H (opracowanie własne)

Wariant 2

Na podstawie testów laboratoryjnych przeprowadzonych w warunkach ciśnienia o wartości 2 barów wyselekcjonowano z zakupionej partii 500 emiterów 144 sztuki. Średnia ilość wydatkowanej wody pojedynczego emitera dla czterech powtórzeń mieściła się w przedziale $1,91\text{--}2,09\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ i $\text{CV} < 2\%$. Emiterzy spełniające kryterium dokładności i precyzji aplikacji wody przeznaczono do budowy sieci nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym zrealizowane według wariantu nr 2. Każdy wazon doświadczalny zasilany był przez jeden emiter oznaczony etykietą z numerem (fot. 6). W trakcie trwania doświadczenia systematycznie sprawdzano wydatek każdego z kroplowników (tabela 9). Stwierdzono, że średni wydatek wody dla badanego okresu spadał wraz z upływem czasu eksploatacji instalacji nawadniającej, a średnia dla całego okresu wyniosła $2,07\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Na ogół współczynnik zmienności dla ilości wydatkowanej wody w czasie się nie zmieniał. Miały jednak miejsce dwie awarie emiterów (zdiagnozowane 11 i 21 maja), co skutkowało ewidentnym wzrostem zmienności w tych terminach odpowiednio do 4,92 i 4,71%. Średni współczynnik zmienności wydatku obliczony ze współczynników zmienności uzyskanej dla każdego ze 144 kroplowników osobno (z 12 terminów oznaczeń) wyniósł 5,85%. Maksymalna wartość CV ilości wody wydatkowanej w trakcie realizacji doświadczenia jaką uzyskano dla jednego z kroplowników, wyniosła 18,94%. Uzyskano ją 11 maja w przypadku jednego emitera (nr 97), który miał skrajnie zaniżony wydatek wody. Powtórny pomiar wykonany w tym samym terminie potwierdził wadliwe działanie. Do obliczeń przyjęto wynik uśredniony, tj. $1,08\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Wadliwy emiter wymieniono. Okazało się, że w przypadku tego samego stanowiska w pomiarach 21 maja kolejny emiter dozował zawyżoną ilość wody $2,88\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ i wymieniono go po raz kolejny. Minimalny współczynnik zmienności dla pojedynczego emitera w badanym okresie wyniósł 3,9%. Zawodność działania emiterów wskazuje, że konieczne jest systematyczne monitorowanie poprawności ich działania. Wystąpienie podobnych awarii w przypadku braku monitoringu może wypaczyć wyniki całego doświadczenia.

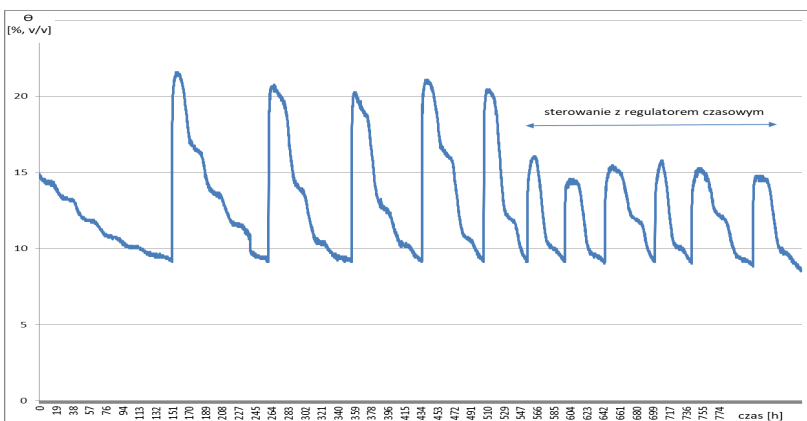
Tabela. 9. Wydatek kroplowników w doświadczeniu wazonowym (wariant nr 2)

Wydatek wody [dm ³ ·h ⁻¹]	x	Data pomiaru (dd_mm)												Średnia	CV				
		20_04	23_04	27_04	27_04	07_05	11_05	14_05	18_05	21_05	25_06	28_05	04_06			11_06			
2,3→		3	4	3	3	5	2	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	x
2,26-2,30		7	11	3	2	11	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	x
2,21-2,25		14	27	24	21	35	17	21	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	x
2,16-2,20		60	66	66	48	65	54	48	31	6	1	0	0	0	0	0	0	0	x
2,11-2,15		29	34	29	34	21	38	34	25	15	1	0	0	0	0	0	0	0	x
2,06-2,10		25	1	17	35	7	27	35	61	55	1	2	0	0	0	0	0	0	x
2,01-2,05		6	1	2	1	0	1	1	18	54	10	7	2	4	4	4	4	4	x
1,96-2,00		0	0	0	0	0	0	0	2	6	40	30	11	32	11	32	11	32	x
1,91-1,95		0	0	0	0	0	0	0	1	3	66	54	33	48	33	48	33	48	x
1,86-1,90		0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	41	76	50	76	50	76	50	x
1,81-1,85		0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	21	8	21	8	21	8	x
<1,81		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	x
Średnia		2,16	2,18	2,17	2,15	2,19	2,15	2,15	2,11	2,08	1,95	1,93	1,90	1,92	1,90	1,92	1,90	1,92	2,07
CV		2,64	2,57	2,44	2,67	2,46	4,92	2,67	2,76	4,71	2,66	2,65	2,37	2,75	2,37	2,75	2,37	2,75	2,23
max.		2,37	2,34	2,37	2,37	2,40	2,40	2,37	2,34	2,88	2,16	2,07	2,05	2,11	2,05	2,11	2,05	2,11	2,26
min.		2,04	2,04	2,04	2,04	2,10	1,08	2,04	1,95	1,92	1,84	1,82	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,97
																			5,85
																			x
																			18,94
																			3,90

Źródło: opracowanie własne.

W podrozdziale 3.2.2 zasygnalizowano problem przesterowań związany z różnicą czasu pomiędzy początkiem emisji wody a zmianą odczytu wilgotności podłoża przez sondę. Zastosowanie sterownika PLC w opisywanym wariancie pozwala wprowadzić stosowny algorytm minimalizujący efekt przesterowań. Przetestowano jednak rozwiązanie proponowane w podrozdziale 3.2.2, polegające na wymuszeniu przerw o ustalonym interwale w aplikacji wody, pomimo że wartości progowe wyłączenia emisji wody w wazonach referencyjnych nie zostały osiągnięte. Rozwiązanie to jest łatwe do realizacji nawet w prostych analogowych systemach sterowania, takich np. jak w wariancie nr 1. Podłoże stanowił piasek gliniasty lekki, a woda aplikowana była podsiąkowo od dna wazonu. Efekt działania takiego rozwiązania przedstawiono za pomocą wyników zarejestrowanej wilgotności, uzyskanych z sondy TDR umieszczonej w wazonie referencyjnym dla sekcji, wobec której przyjęto założenie programowe, że średnia wilgotność podłoża ma oscylować w granicach 12% wilgotności objętościowej z ekstremami $\pm 4\%$. W ten sposób regulowano wilgotność przez pierwsze pięć cykli nawodnieniowych. Po piątym cyklu nawodnieniowym zmodyfikowano instalację sterującą, montując między sterownikiem PLC a elektrozaworem sterownik czasowy. Zadany czas rozłączania i zamykania obwodu elektrycznego obejmował na okresy 5-minutowe.

Przez pierwsze pięć cykli nawodnieniowych wilgotność objętościowa podłoża wahała się w zakresie 9–22% (rys. 29), co świadczy o bardzo dużych przesterowaniach. Wahania wilgotności w takim zakresie znacznie zmniejszają wiarygodność uzyskiwanych wyników, jeśli celem doświadczenia jest poznanie jej wpływu na reakcję roślin. Zastosowanie wymuszonych 5-minutowych interwałów w trakcie emisji wody do wazonów znacznie zmniejszyło, ale nie wyeliminowało w stopniu zadowalającym przesterowań. Rozwiązanie takie skutkowało wahaniami wilgotności podłoża w przedziale 9–17%.



Rys. 29. Wilgotność podłoża [% (v/v)] w doświadczeniu wazonowym w trakcie wegetacji pszenicy jarej w zależności od sposobu sterowania emisją wody

Wariant 3

Na podstawie testów laboratoryjnych przeprowadzonych w warunkach ciśnienia o wartości 2,0 barów wyselekcjonowano z zakupionej partii liczącej 2000 sztuk 576 emiterów. Średnia ilość wydatkowanej wody jednego emitera dla czterech powtórzeń mieściła się w przedziale $1,91\text{--}2,09\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ i $\text{CV} < 2\%$. Emitery spełniające kryterium dokładności i precyzji aplikacji wody przeznaczono do budowy sieci nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym zrealizowanym według wariantu nr 3. Każdy wazon doświadczalny zasilany był przez trzy emitery równocześnie, które stanowiły jeden punkt emisji. Punktów było tyle samo co wazonów, czyli 192. Selekcja kroplowników do instalacji przebiegała zgodnie z dotychczas stosowaną procedurą. W trakcie realizacji przeprowadzano systematycznie kontrolę wydatku kroplowników (tabela 10). Podobnie jak w przypadku wyników wariantu nr 2 również w komentowanym doświadczeniu średni wydatek punktów emisyjnych spadał wraz z upływem czasu w okresie trwania doświadczenia z $6,48$ do $6,18\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Stwierdzono jednak, że CV dla każdego z terminów oznaczeń było mniejsze, gdy zastosowano trzy kroplowniki jako punkt emisyjny, niż w przypadku, gdy użyto jednego kroplownika. Również procentowe różnice między wartościami max. a min. dla danego terminu oznaczeń były na ogół mniejsze niż w przypadku wariantu nr 2. Stwierdzono, że średni wydatek wody dla punktu emisyjnego średnio dla terminów oznaczeń wyniósł $6,33\text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ przy bardzo niskim współczynniku zmienności na poziomie zaledwie 0,79. Również średnia dla współczynników zmienności wyliczonych dla każdego kroplownika osobno była niewielka (2,26%) i zdecydowanie niższa niż w przypadku wariantu 1.

Zaobserwowane w badaniach własnych zmniejszanie się wydatku emiterów kroplowych w trakcie wegetacji wynikać może z szeregu przyczyn związanych ze stopniowym zmniejszaniem się przekroju wewnętrznych kapilar na skutek ich zapychania. Na ogół emitery, które eksploatuje się w warunkach niskiego natężenia przepływu są bardziej narażone na to zjawisko [Ravina i in. 1992]. Problem zależy w znacznym stopniu od jakości wody wprowadzanej do przewodów zasilających. Sedymentacja osadów na kapilarach emiterów kroplowych jest wynikiem obecności nieodseparowanych przez filtry zanieczyszczeń i zasolenia wody. Podatność emiterów na to zjawisko zależy od ich konstrukcji [Awady i in. 2008, Riberio i in. 2010, 2012, Shinde i in. 2012]. Cała instalacja, a zwłaszcza systemy oczyszczania wody wymagają systematycznej kontroli i konserwacji [Reinders 2011, Ramana Rao i in. 2012]. Aby zapewnić warunki ścisłych doświadczeń wazonowych, należałoby zatem używać wody pozbawionej nie tylko zanieczyszczeń mechanicznych czy biologicznych, lecz także soli mineralnych. Wymaga to kosztownych instalacji filtrów osmózowych o dostosowanej do potrzeb wydajności. Takich rozwiązań nie testowano.

Tabela. 10. Wydatek wody punktów emisyjnych w doświadczeniu wazonowym (wariant nr 3)

Wydatek wody [dm ³ ·h ⁻¹]	x	Data pomiaru (dd mm)										Średnia	CV		
		22-04	29-04	06-05	13-05	27-05	03-06	10-06	17-06	24-06	24-06				
7,00->		1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	x
6,9-7,00		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x
6,81-6,90		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	x
6,71-6,80		7	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	x
6,61-6,70		22	13	3	0	0	1	3	0	0	2	0	2	0	x
6,51-6,60		53	39	19	1	2	3	10	0	0	0	0	0	0	x
6,41-6,50		52	72	60	34	19	31	21	3	6	6	3	6	9	x
6,31-6,40		41	54	76	90	94	82	49	17	21	17	49	17	128	x
6,21-6,30		14	11	23	53	60	62	67	70	43	70	67	43	53	x
6,11-6,20		2	2	6	12	9	9	28	67	72	67	28	67	2	x
6,01-6,10		0	0	1	2	3	1	9	27	38	27	9	27	0	x
5,90-6,00		0	0	3	0	4	3	1	8	10	8	1	10	0	x
<5,90		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Średnia		6,48	6,45	6,39	6,33	6,30	6,33	6,31	6,20	6,18	6,20	6,31	6,20	6,33	2,26
CV		2,02	1,61	1,82	1,34	1,96	1,52	2,43	1,65	1,95	1,65	2,43	1,65	0,79	x
max.		7,07	6,72	6,74	6,56	6,59	6,61	7,20	6,45	6,69	6,45	7,20	6,45	6,44	6,41
min.		6,18	6,19	5,91	6,01	5,23	5,95	5,98	5,92	5,95	5,92	5,98	5,92	6,19	0,78

Źródło: opracowanie własne

3.2.3.5. Wnioski

1. Odpowiednie zaprojektowanie sieci nawadniającej umożliwia aplikację wody do wazonów doświadczalnych stosownie do ustalonych poziomów wilgotności podłoża.
2. Im większa liczba emiterów w punktach emisji zasilających wazony, tym większą precyzją wydatku wody do jednostek eksperymentalnych cechuje się instalacja nawadniająca.
3. Malejąca z czasem eksploatacji instalacji nawadniającej objętość aplikowanej przez emitery wody ogranicza możliwości stosowania systemów sterowania opartych na sterownikach czasowych i wymaga rzeczywistego pomiaru wilgotności podłoża jako podstawy sterowania.
4. Regulacja wilgotności podłoża w wazonach doświadczalnych przez system nawadniający może być zrealizowana na podstawie pomiarów tego parametru w wazonach referencyjnych. Wiąże się to z uśrednieniem do danych referencyjnych ilości aplikowanej na wszystkie obiekty wody.
5. Zastosowanie do regulacji wilgotności podłoża w wazonach doświadczalnych mogą mieć zarówno proste systemy sterowania oparte na tensjometrach ze stycznikami, jak i te oparte na złożonych systemach elektronicznych. Utrzymanie zakładanej wilgotności podłoża wymaga indywidualnego dla każdej instalacji rozwiązania problemu przesterowań.

4. PODSUMOWANIE

W światowej literaturze jest wiele informacji na temat wody w glebie i sposobu jej oznaczania. W opracowaniu dokonano przeglądu i usystematyzowano obecnie stosowane sposoby pomiaru zawartości wody w glebie. Podjęta analiza wiedzy przedmiotowej wskazuje, że pomimo wielu technik i bardzo szerokiego spektrum dostępnych urządzeń pomiarowych brak jest rozwiązań mogących mieć szersze zastosowania w praktyce polowej produkcji roślinnej. Ani pomiary punktowe, ani przestrzenne nie odzwierciedlają dynamiki przestrzennej zmienności wilgotności gleby w skali pola w trakcie wegetacji roślin, co ogranicza ich użytkowe zastosowanie. W zakresie możliwości mapowania wilgotności gleby pojawia się wiele nowych informacji, a niektóre koncepcje wychodzą naprzeciw potrzebom produkcyjnym, wciąż jednak brak jest możliwości uzasadnionego ekonomicznie ich zastosowania praktycznego. Należy uznać więc, że jest to niezbadany dostatecznie przez naukę obszar wiedzy rolniczej.

Przedstawione w opracowaniu metody pomiaru zawartości wody w glebie mają natomiast szerokie zastosowanie w badaniach naukowych, w tym również w doświadczalnictwie rolniczym. Wykazano jednak niebagatelny problem rzucający cień na wiarygodność interpretacji uzyskiwanych wyników, a tym samym – trafność wnioskowania wielu badań. Literatura światowa nie podejmuje problemu rozdzielenia wody w abiotycznej części gleby i wody związanej siłami biologicznymi, co mogłoby pomóc we wnioskowaniu o jej dynamice w glebie. Dotychczas woda oznaczana była w glebie jedynie jako związana siłami fizycznymi i chemicznymi, bez uwzględnienia tego, że znaczną jej część wiążą organizmy żywe. W przedmiotowej monografii wykazano jednak, że woda zawarta w korzeniach roślin może w warunkach niskiej wilgotności gleby stanowić duży odsetek, nawet kilkadziesiąt procent całej wody zawartej w glebie. Problem wynika z tego, że stosowane obecnie urządzenia pomiarowe nie są selektywne względem wody aktywnie związanej przez organizmy żywe.

Doświadczenia wazonowe umożliwiają poznanie wielu zjawisk, których nie można zweryfikować w doświadczalnictwie polowym. Dotychczas jednym z większych problemów realizacji takich badań był i ciągle jest brak możliwości zautomatyzowanego utrzymania wilgotności podłoża na zakładanym poziomie. Obecnie stosowana w tym zakresie technika nie uwzględnia w dostatecznym stopniu problemów związanych z wymaganiami dokładności i precyzji aplikacji wody, stanowiących niekontrolowane źródło błędów, co implikuje niewiarygodność generowanych wniosków. Przedstawione w prezentowanym opracowaniu rozwiązania techniczne pozwalają na zaprojektowanie systemu automatycznego nawadniania wazonów cechującego się precyzją i dokładnością na poziomie, który jest wystarczający do wykorzystania go do celów doświadczalnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alamry A.S., van der Meijde M., Noomen M., Addink E.A., van Benthem R., de Jong Steven M., 2017. Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical resistivity tomography in Mediterranean soils. *Catena*, 157, 388–396. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.001.
- [2] Al-Khadali M., Johanson J.T., O'Brien A., Mattia F., Balenzano A., 2018. GNSS-R time-series soil moisture retrievals from vegetated surfaces. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing IGARSS*, 2035–2038. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518620.
- [3] Amer A.M., 2009. Moisture adsorption capacity and surface area as deduced from water vapor pressure isotherms in relation to hygroscopic water of soils. *Biologia*, 64, 516–521.
<https://link.springer.com/article/10.2478/s11756-009-0073-z>.
- [4] Amer A.M., 2015. Water vapor adsorption and soil wetting. Chapter 1. In: *Wetting and Wettability*, 1–14. DOI: 10.5772/60953.
- [5] Anderson M.P., 2005. Heat as a groundwater tracer. *Ground Water*, 6, 951–968. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00052.
- [6] Archie G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid indetermining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers*, 146, 54–62.
https://personal.ems.psu.edu/~radovic/EME590_Archie_1942.pdf.
- [7] Ardekani M.R.M., 2013. Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping. *Geoderma*, 200–201, 55–66. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.02.010.
- [8] ASTM, 1979. Standard method of laboratory determination of moisture content of soil: Procedure D2216-71, 290–291. In *Annual book of ASTM standards*. Am. Soc. Test. Mater., Philadelphia, PA. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2216-71.htm>.
- [9] Awady M.N.EL., Berry A.M.EL., Genaid M.A.I., Zayton A.M., 2008. Hydraulic properties effect of filter media on emitter clogging problems. *Irrigation and drainage, Misr J. Ag. Eng.*, 25(3), 824–836.
<http://www.mjae.eg.net/pdf/2008/july/12.pdf>.
- [10] Baas R., Slootweg C., 2004. On-line acquisition of plant related and environmental parameters (plant monitoring) in gerbera: Determining plant responses. *Acta Hort.*, 654, 139–146. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.654.14.
- [11] Baatz R., Bogena H., Hendricks Franssen H.J., Huisman J.A., Montzka C., Vereecken H., 2015. An empirical vegetation correction for soil water con-

- tent quantification using cosmic ray probes. *Water Resour. Res.*, 51. DOI: 10.1002/2014WR016443.
- [12] Bagnall D.K., Gutierrez P.M.C., Yimam Y.T., Morgan C.L.S., Neely H.L., Ackerson J.P., 2018. Effect of air- and water-filled voids on neutron moisture meter measurements of clay soil. *Vadose Zone J.*, 17(1). DOI: 10.2136/vzj2018.07.0137.
- [13] Balaghi S., Ghal-Eh N., Mohammadi A., Vega-Carrillo H.R., 2018. A neutron scattering soil moisture measurement system with a linear response. *Applied Radiation & Isotopes*, 142, 167–172. DOI: 10.1016/j.apradiso.2018.10.002.
- [14] Baldoncini M., Alberti M., Bottardi C., Chiarelli E., Raptis K.G.C., Strati V., Mantovani F., 2019. Biomass water content effect on soil moisture assessment via proximal gamma-ray spectroscopy. *Geoderma*, 335, 69–77. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.08.012.
- [15] Baranowski R., 1971. Polowe metody oznaczania wilgotności gleby. *Roczniki Gleboznawcze*, XXII (1), 169–188. http://ssa.ptg.sggw.pl/files/artykuly/1971_22/1971_tom_22_nr_1/tom_22_nr_1_169-188.pdf.
- [16] Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V., Hasenauer S., Scipal K., Bonekamp H., Figa J., Anderson C., 2007. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A advanced scatterometer (ASCAT), *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20401. DOI:10.1029/2007GL031088.
- [17] Behzad M., Farasati M., Boroomand-Nasab S., 2010. Performance evaluation of several types of pressure compensating emitters. *Res. Crops*, 11, 125–132. https://www.researchgate.net/publication/289178459_Performance_evaluation_of_several_types_of_pressure_compensating_emitters.
- [18] Belcher D.J., Cuykendall T.R., Sack H.S., 1950. The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma-ray scattering. *Tech. Dev. Rep.*, 127. *Civ. Aeron. Admin., Tech. Dev. Eval. Centre.* Washington. DC., 1–20. https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=ry1BAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA7&ots=Q8Xt8n7UJs&sig=Te3tz_4sZqZoCtf-1SiVcthaJBg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- [19] Bertermann D., Schwarz H., 2017. Laboratory device to analyse the impact of soil properties on electrical and thermal conductivity. *Int. Agrophys.*, 31, 157–166. DOI:10.1515/intag-2016-0048.
- [20] Bianchi A., Masseroni D., Thalheimer M., Olivera de Medici L., Facchi A., 2017. Field irrigation management through soil waterpotential measurements: a review. *Italian J. Agromet.*, 2, 25–38. DOI: 10.19199/2017.2.2038-5625.025.
- [21] Bittelli M., 2010. Measuring soil water potential for water management in agriculture: A Review. *Sustainability*, 2, 1226–1251. DOI:10.3390/su2051226.

- [22] Bogena H.R., Huisman J.A., Gütner A., Hübner C., Kusche J., Jonard F., Vey S., Vereecken H., 2015. Emerging methods for noninvasive sensing of soil moisture dynamics from field to catchment scale: a review. *Advanced Review*, 2, 635–647. DOI: 10.1002/wat2.1097.
- [23] Bogena H.R., Huisman J.A., Oberdörster C., Vereecken H., 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *J. Hydrology*, 344, 32–42. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.06.032.
- [24] Bouyoucos G.J., Mick A.H., 1939. A method for obtaining a continuous measurement of soil moisture under field conditions. *Sci.*, 89, 252–252. DOI: 10.1126/science.89.2307.252-b.
- [25] Bouyoucos G.J., Mick A.H., 1940. An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions. *Michigan Technical Bulletin*, 172, ss. 38. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19410300026>.
- [26] Bouyoucos G.J., Mick A.H., 1948. A comparison of electric resistance units for making a continuous measurement of soil moisture under field conditions. *Plant Physiol.*, 23(4), 532–543. DOI: 10.1104/pp.23.4.532
- [27] Briggs L.J., 1899. Electrical instruments for determining the moisture, temperature, and soluble salt content of soils. *USDA Div. Soils Bull.*, 10, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. https://archive.org/stream/electricalinstru15brig/electricalinstru15brig_djvu.txt.
- [28] Bristow K.L., 2002. Thermal conductivity. [W:] J.H. Dane, G.C. Topp (ed.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods*, 1209–1226. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. DOI: 10.2136/sssabookser5.4.c50.
- [29] Bristow K.L., Campbell G.S., Calissendorff K., 1993. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 930–934. DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700040008x.
- [30] Bristow K.L., Kluitenberg G.J., Goding C.J., Fitzgerald T.S., 2001. A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity. *Comput. Electron. Agric.*, 31, 265–280. DOI: 10.1016/S0168-1699(00)00186-1.
- [31] Brocca L., Ciabatta L., Massari C., Camici S., Tarpanelli A., 2017. Soil moisture for hydrological applications: Open questions and new opportunities. *Water.*, 9, 140. DOI: 10.3390/w9020140.
- [32] Buursink M., Lane J., Clement W., Knoll M., 2002. Use of vertical radar profiling to estimate porosity at two New England sites and comparison with neutron log porosity. *Mat. Konf: Application of geophysics to engineering and environmental problems*, Las Vegas, February 10–14. DOI: 10.4133/1.2927127.

- [33] Campbell G.S., Calissendorff C., Williams J.H., 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 291–293. DOI: 10.2136/sssaj1991.03615995005500010052x.
- [34] Cardenas-Lailhacar B., Dukes M.D., 2010. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. *Agricultural Water Management*, 97(5), 666–672. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.12.009 .
- [35] Cassel D.K., Klute A., 1986. Water potential: Tensiometry. [W:] A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd Ed. ASA-SSSA, 563–594. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/pdfs/sssabookseries/methodsofsoilan1/frontmatter>.
- [36] Chanasyk D.S., Naeth M.A., 1996. Field measurement of soil moisture using neutron probes. *Can. J. Soil Sci. Canada*, 317–323. DOI: 10.4141/cjss96-038.
- [37] Chandler D.G., Seyfried M.S., McNamara J.P., Hwang K., 2017. Inference of soil hydrologic parameters from electronic soil moisture records. *Front. Earth Sci.*, 5. DOI: 10.3389/feart.2017.00025.
- [38] Channuie J., Sinkaew P., Lekchaum S., Kanjana K., 2017. In-house development of neutron moisture gauge for field measurement. *SIAM PHYSICS CONGRESS J. Physics Conf. Series*, 901. DOI: 10.1088/1742-6596/901/1/012148.
- [39] Chen C., Ren T., Hu K., Li B., Wang Y., 2013. Estimation of soil clay content using hygroscopic water content at an arbitrary humidity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 78, 119–124. DOI: 10.2136/sssaj2013.06.0247.
- [40] Chen W.T., Yeh Y.H.F., Liu T.Y., Lin T.T., 2016. An automated and continuous plant weight measurement system for plant factory. *Front. Plant Sci.*, 7, 392. DOI: 10.3389/fpls.2016.00392.
- [41] Chow L., Xing Z., Rees H.W., Meng F., Monteith J., 2009. Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in new brunswick, maritime region, Canada. *Sensors*, 9, 9398–9413. DOI: 10.3390/s91109398.
- [42] Chrisman B., Zreda M., 2013. Quantifying mesoscale soil moisture with the cosmic-ray rover. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 5097–5108. DOI: 10.5194/hess-17-5097-2013.
- [43] Christensen E.R., 1974. Use of the gamma density gauge in combination with the neutron moisture probe. Symposium on Isotope and Radiation Techniques in Studies of Soil Physics, Irrigation and Drainage in Relation to Crop Production. Vienna, Austria. 10Oct. 1973. Int. Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 27–44. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/05/124/5124683.pdf.

- [44] Ciocca F., Lunati I., Van de Giesen N., Parlange M.B., 2012. Heated optical fiber for distributed soil-moisture measurements: A lysimeter experiment. *Vadose Zone J.*, 11. DOI: 10.2136/vzj2011.0199.
- [45] Collow T.W., Robock A., Basara J.B., Illston B.G., 2012. Evaluation of SMOS retrievals of soil moisture over the central United States with currently available in situ observations. *J. Geophys. Res.*, 117, D09113. DOI:10.1029/2011JD017095.
- [46] Crow W.T., Berg A.A., Cosh M.H., Loew A., Mohanty B.P., Panciera R., Rosnay P., Ryu D., Walker J.P., 2012. Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products, *Rev. Geophys.*, 50, RG2002. DOI:10.1029/2011RG000372.
- [47] Crow W.T., Wood E.F., 1999. Multi-scale dynamics of soil moisture variability observed during SGP '97. *Geophys. Res. Lett.*, 26(23), 3485–3488. DOI:10.1029/1999GL010880.
- [48] Cybulak M., Sokołowska Z., Boguta P., 2016. Hygroscopic moisture content of podzolic soil with biochar. *Acta Agroph.*, 23(4), 533–543. <http://www.acta-agrophysica.org/Hygroscopic-moisture-content-of-podzolic-soil-with-biochar,105017,0,2.html>.
- [49] D’Odorico P., Laio F., Porporato A., Rodriguez-Iturbe I., 2003. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles: II. A case study. *Adv. Water Resour.*, 26, 59–7. DOI: 10.1016/S0309-1708(02)00095-7.
- [50] Davis J.L., Annan A.P., 1977. Electromagnetic detection of soil moisture: progress report. *Can. J. Remote Sens.*, 3, 76–86. DOI: 10.1080/07038992.1977.10854959.
- [51] Dawidowski J.B., Błażejczak D., 2011. Wyznaczanie wilgotności gleby w jej warstwie podskórnej na podstawie pomiaru siły ssącej. *Inżynieria Rolnicza*, 8(133), 75–80.
- [52] De Moraes-França M.B., Moraes F.J.O., Carvalhaes-Dias P., Duarte C.L., Dias J.A.S., 2019. A multiprobe heat pulse sensor for soil moisture measurement based on PCB technology. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 68(2), 606–613. DOI: 10.1109/TIM.2018.2843605.
- [53] De Vries D.A., 1963. Thermal properties of soils. [W:] W.R. van Wijk (ed.), *Physics of plant environment*. North Holland Publishing, Amsterdam, The Netherlands, 210–235. DOI: 10.1002/qj.49709038628.
- [54] Debye P., 1929. Polar molecules. *Chemical Catalog*, New York. DOI:10.1002/jctb.5000484320.
- [55] Desilets D., Zreda M., 2013. Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and Monte Carlo simulations. *Water Resour. Res.*, 49, 3566–3575. DOI: 10.1002/wrcr.20187.

- [56] Desilets D., Zreda M., Ferre T., 2010. Nature's neutron probe: Landsurface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resour. Res.*, 46, W11505. DOI:10.1029/2009WR008726.
- [57] Dierke C., Werban U., 2013. Relationships between gamma-ray data and soil properties at an agricultural test site. *Geoderma*, 199, 90–98. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.10.017.
- [58] Dorigo W.A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T., 2011. The International Soil Moisture Network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(5), 1675–1698. DOI:10.5194/hessd-8-1609-2011.
- [59] Du R., Robertson P., 2017. Cost-effective grid-connected inverter for a micro combined heat and power system. *IEEE Trans. Indus. Elec.*, 64(7). DOI:10.1109./TIE.2017.2677340.
- [60] Dudek J., Babik J., Dyśło J., 2007. Technologia kropłowego nawadniania warzyw korzeniowych uprawianych na redlinach. *J. Res. App. Agric. Eng.*, 3(52), 32–36. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAR0-0031-0043>.
- [61] Earnest C.M., 1991a. Thermal analysis of selected illite and smectite clay minerals: Part I. Illite clay minerals. [W:] W. Smykatz-Kloss, S.S.J. Warne (ed.), *Thermal analysis in the geosciences*, Vol. 38, Springer-Verlag, Berlin, 270–286. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBFb0010271.pdf>
- [62] Earnest C.M., 1991b. Thermal analysis of selected illite and smectite clay minerals: Part II. Smectite clay minerals. [W:] W. Smykatz-Kloss, S.S.J. Warne (ed.), *Thermal analysis in the geosciences*, Vol. 38, Springer-Verlag, Berlin, 288–312. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBFb0010272.pdf>.
- [63] Emilio A.C.J., 2003. Plant-pot and system for cultivating and automatically irrigating plants. ES2189661 (A1).
- [64] Entekhabi D., Njoku E.G., Houser P., Spencer M., Doiron T., Kim Y.J., Smith J., Girard R., Belair S., Crow W., Jackson T.J., Kerr Y.H., Kimball J.S., Koster R., McDonald K.C., O'Neill P.E., Pultz T., Running S.W., Shi J.C., Wood E., van Zyl J., 2004. The hydrosphere state (Hydros) satellite mission: An earth system pathfinder for global mapping of soil moisture and land freeze/thaw. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42, 2184–2195. http://prhouser.com/houser_files/TGARSHydros.pdf.
- [65] Escorihuela M., Chanzy A., Wigneron J., Kerr Y., 2010. Effective soil moisture sampling depth of L-band radiometry: A case study, *Remote Sens. Environ.*, 114, 995–1001. DOI:10.1016/j.rse.2009.12.011.
- [66] Estevez R., Jones S.B., 2009. Frequency domain soil moisture determination using bilinear analysis with an open-ended dielectric probe. *Asae. frymulti. Com.*, 300(9). DOI:10.13031/2013.27297.

- [67] Fellner-Feldegg H., 1968. The Measurement of dielectrics in the time domain. *J. Phys. Chem.*, 73(3), 616–623. <https://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/j100723a023>.
- [68] Forte E., Pipan M., 2017. Review of multi-offset GPR applications: Data acquisition, processing and analysis. *Signal Proc.*, 132, 210–220. DOI:10.1016/j.sigpro.2016.04.011.
- [69] Franz T.E., Wang T., Avery W., Finkenbinder C., Brocca L., 2015. Combined analysis of soil moisture measurements from roving and fixed cosmic-ray neutron probes for multi-scale real-time monitoring. *Geophys. Res. Lett.*, 3389–3396. DOI:10.1002/2015GL063963.
- [70] Franz T.E., Zreda M., Rosolem R., Ferre T.P.A., 2013. A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 453–460. DOI: 10.5194/hessd-9-10303-2012.
- [71] Friedman S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Comput. Electron. Agric.*, 46(13), 45–70. DOI:10.1016/j.compag.2004.11.001.
- [72] Galagedara L.W., Parkin G.W., Redman J.D., Endres A.L., 2003. Assessment of soil moisture content measured by borehole GPR and TDR under transient irrigation and drainage. *J. Env. Eng. Geoph.*, 8(2), 77–86. DOI: 10.4133/JEEG8.2.77.
- [73] Galagedara L.W., Parkin G.W., Redman J.D., von Bertoldi P., Endres A.L., 2005. Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *J. Hydrol.*, 301, 182–197. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.06.031.
- [74] Gamage D.N.V., Biswas A., Strachan I.B., Adamchuk V.I., 2018. Soil water measurement using actively heated fiber optics at field scale. *Sensors.*, 18, 1116. DOI:10.3390/s18041116.
- [75] Gardner C.M.K., Catriona L.K., Robinson D.A., Blyth K., Cooper J.D., 2001. Soil water content. [W:] K.A. Smith, C.E. Mullins (ed.), *Soil and environmental analysis: Physical methods*, 2nd ed., Marcel Dekker, New York, 1–64. <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/Soil-and-Environmental-Analysis.pdf>.
- [76] Gąsior J., Koniuczek J., Hajduk E., Właściniowski S., Nazarowicz M., Białak M., 2013. Metody badań właściwości fizycznych gleb. *Acta Carpathica*, 6, 43. <http://www.wbr.ur.edu.pl/nauka/acta-carpathica/archiwum>.
- [77] Gee G.W., Dorson M.E., 1981. Soil water content by microwave drying: A routine procedure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1234–1237. DOI:10.2136/sssaj1981.03615995004500060045x.
- [78] Gil-Rodríguez M., Rodríguez-Sinobas L., Benítez-Buelga J., Sánchez-Calvo R., 2013. Application of active heat pulse method with fiber optic temperature

- sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters. *Agric. Water Manag.*, 120, 72–78. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.10.012.
- [79] Givi J., Prasher S.O., Patel R., 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point, *Agric. Water Manage.*, 70(2), 83–96. DOI: 10.1016/j.agwat.2004.06.009.
- [80] Głas D., 2015. Redukcja zakłóceń interferencyjnych w detektorach radiowych obserwatorium Pierre Auger. *Uniw. Łódzki, Rozprawy*, ss. 123. <http://dspace.uni.lodz.pl:8080/xmlui/bitstream/handle/11089/16000/Dariusz%20G%C5%82as%20Redukcja%20zak%C5%82%C3%B3ce%C5%84%20interferencyjnych%20w%20detektorach%20radiowych%20Obserwatorium%20Pierre%20Auger.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [81] Gong J., Yang G., Liang L., Ding X., Ye Y., Gan Y., Chen G., 2015. Automatic measurement and irrigation system and method for pot experiment. CN103477956 (A).
- [82] Greifeneder F., Notarnicola C., Bertoldi G., Niedrist G., Wagner W., 2016. From point to pixel scale: An upscaling approach for in situ soil moisture measurements. *Vadose Zone J.*, 15(6). DOI:10.2136/vzj2015.03.0048
- [83] Grote K., Anger C. Kelly B. Hubbard S. Rubin Y., 2010. Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR groundwave techniques. *J. Envir. Eng. Geoph.*, 15(3), 93–110. DOI:10.2113/JEEG15.3.93.
- [84] Grote K., Hubbard S., Rubin Y., 2003. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water Resou. Res.*, 39(11), SBH5-1–SBH5-13. DOI:10.1029/2003wr002045.
- [85] Guderle M., Hildebrandt A., 2015. Using measured soil water contents to estimate evapotranspiration and root water uptake profiles – a comparative study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 409–425. DOI:10.5194/hess-19-409-2015.
- [86] Guo L., Li T., Chen P., Yu P., Peng X., Yang D., 2019. A method for microscopic unsaturated soil-water interaction analysis based on DDA. *Comp. Geotech.*, 108, 143–151. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.12.002.
- [87] Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., El-Rayes M.A., Wu L.K., 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil: Part I. Empirical models and experimental observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 23, 25–34. DOI: 10.1109/TGRS.1985.289497.
- [88] Hausmair K., Chi S., Singeri P., Vogel C., 2013. Aliasing-Free Digital Pulse-Width Modulation for Burst-Mode RF Transmitters. *IEEE Trans. Circ. Sys.*, 60(2). DOI: 10.1109/TCSI.2012.2215776.
- [89] Haverkamp R., Vauclin M, Vachaud G., 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: I. Local standpoint. *Soil Sci.*, 137(3), 135–140. https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1984/03000/ERROR_ANALYSIS_IN_ESTIMATING_SOIL_WATER_CONTENT.2.aspx.

- [90] Hawkins A.J., 1993. Electrical sensor for sensing moisture in soils. U.S. Patent 5, 179, 347. Date issued: 12 Jan. <https://patentimages.storage.googleapis.com/69/fa/aa/d7b731c9ef98e2/US5179347.pdf>.
- [91] Hedwing D.G., 2002. Pot plant watering system comprises water pot in which frame is placed which supports plant pot above water level and is made from capillary active, material so that water is fed to base of plant pot. DE10112057 (A1).
- [92] Heimovaara T.J., 1993. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(6), 1410–1417. DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700060003x.
- [93] Helman D., Lensky I.M., Bonfil D.J., 2019. Early prediction of wheat grain yield production from root-zone soil water content at heading using Crop RS-Met. *Field Crops Research*, 232, 11–23. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.12.003.
- [94] Hendrick L.D., Edge R.D., 1966. Cosmic-ray neutrons near the Earth. *Physic. Rev. Ser. II*, 145, 1023–1025. DOI: 10.1103/PhysRev.145.1023.
- [95] Hess V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlungsbeisieben Freiballonfahrten. *Physikal.*, 13, 1084–1091. <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/HessArticle.pdf>.
- [96] Hills D.J., Tajrishy M.A., Tchobanoglous G., 2000. The influence of filtration on ultraviolet disinfection of secondary effluent for microirrigation. *Transactions of The Asae*, 43(6), 1499–1505. DOI: 10.13031/2013.3049.
- [97] Hong W.T., Jung Y.S., Kamg S., Lee J.S., 2016. Estimation of soil-water characteristic curves in multiple-cycles using membrane and TDR system. *Materials*, 9(12), 1–15. DOI:10.3390/ma9121019.
- [98] Hornbuckle B.K., England A.W., 2004. Radiometric sensitivity to soil moisture at 1.4 GHz through a corn crop at maximum biomass. *Water Resour. Res.*, 40, 1–12. DOI:10.1029/2003WR002931.
- [99] Hoseini Y., Albaji M., 2016. Calibration of gypsum blocks for measuring saline soils moisture. *Comm. Soil Sci. and Plant Anal.*, 47(22), 2528–2537. DOI: 10.1080/00103624.2016.1254793.
- [100] <https://cordis.europa.eu/project/rcn/193835/reporting/en>.
- [101] <http://statistica.io>.
- [102] <http://www.igik.edu.pl/pl/geodezja-i-geodynamika-sieci-permanentne-gnss>.
- [103] Hubbell J.M., Sisson J.B., 2003. Soil water potential measurement by tensiometers. [W:] B.A. Stewart, T.A. Howell (eds.), *Encycl. Water Sci.* Marcel Dekker, New York, NY, 904–907. https://www.researchgate.net/publication/255944843_Soil_Water_Potential_Measurement_by_Tensiometers_-_Encyclopedia_Publication.

- [104] Huisman J.A., Sperl C., Bouten W., Verstraten J.M., 2001. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *J. Hydrol.*, 254, 48–58. DOI:10.1016/S0022-1694(01)00336-5.
- [105] Inoue Y., Watanabe T., Kitamura K., 2001. Prototype time-domain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to ‘on the move’ measurements. *Agric. Water Manage.*, 50, 41–5. DOI: 10.1016/S0378-3774(01)00091-9.
- [106] Irmak S., Haman D.Z., 2001. Performance of the WaterMark Granular matrix sensor in sandy soils. *Applied Eng. Agric.*, 17, 787–795. DOI: 10.13031/2013.6848.
- [107] ISO 11465.1993. Soil quality — Determination of dry matter and water content on a mass basis — Gravimetric method.
- [108] Jackson T.J., 2002. Remote sensing of soil moisture: implications for groundwater recharge. *Hydrogeol. J.*, 10, 40–51. DOI: 10.1007/s10040-001-0168-2.
- [109] Jackson T.J., O’Neill P.E., Swift C.T. 1997. Passive microwave observation of diurnal surface soil moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35, 1210–1222. DOI: 10.1109/36.628788.
- [110] Jackson T.J., Schmugge T.J., 1991. Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote Sens. Environ.*, 36, 203–212. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90057-D.
- [111] Jagdhuber T., Fersch B., Schröen M., Jäger M., Voormansik K., Lopez-Martinez C., 2018. Field-scale assessment of multi-sensor soil moisture retrieval under grassland. 38th IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 6111–6114. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517560
- [112] Jean C., 2003. Plant pot and soil watering system. WO03055294 (A1).
- [113] Jean C., 2008. Plant pot and soil watering system. US2008263948 (A1).
- [114] Jeznach J., 2009. Aktualne trendy w rozwoju mikronawodnień. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 6, 83–94. <http://weenawodnienia.pl/artykuly/mikronawodnienia%20artykul%20jeznach.pdf>.
- [115] Jonard F., Weihermüller L., Jadoon K.Z, Schwank M., Vereecken H., Lambot S., 2011. Mapping field-scale soil moisture with L-band radiometer and ground-penetrating radar over bare soil. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 49, 2863–2875. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2114890.
- [116] Jones S.B., Robinson D.A., Friedman S.P., 2006. Development of a sub-surface open-ended TDR probe for on-the-go mapping of water content. *Proceedings TDR 2006, 3rd Int. Symp. and workshop on time domain reflectometry for innovative soils applications*, Purdue University, West Lafayette, IN. 17–20 Sept. 2006.

https://www.researchgate.net/publication/228881511_Development_of_a_subsurface_open-ended_TDR_probe_for_on-the-go_mapping_of_water_content.

- [117] Jones S.B., Or D., 2004. Frequency domain analysis for extending time domain reflectometry water content measurement in highly saline soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68(5), 1568–1577. DOI: 10.2136/sssaj2004.1568.
- [118] Jonson R., Bigham M., Lockhart Y., Mansouri-Ruiz I., 2016. Automated drip watering system. WO2016187025A1.
- [119] Jorapur N., Palaparthi V.S., Sarik S., John J., Baghini M.S., Ananthasuresh G.K., 2015. A low-power, low-cost soil-moisture sensor using dual-probe heat-pulse technique. *Sensors and Actuators A: Physical*, (233), 108–117. DOI: 10.1016/j.sna.2015.06.026.
- [120] Joseph A.T., Van der Velde R., O'Neill P.E., Choudhury B.J., Lang R.H., Kim E.J., Gish T., 2010. L-Band brightness temperature observations over a corn canopy during the entire growth cycle. *Sensors.*, 10, 6980–7001. DOI: 10.3390/s100706980.
- [121] Kamai T., Kluitenberg G. J., W. Hopmans J., 2009. Design and numerical analysis of a button heat pulse probe for soil water content measurement. *Vadose Zone J.*, 8(1), 167–173. DOI: 10.2136/vzj2008.0106.
- [122] Kang S., van Iersel M.W., Kim J., 2019. Plant root growth affects FDR soil moisture sensor calibration. *Sci. Horticulture*, 252, 208–211. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.03.050
- [123] Karmeli D., 1977. Classification and flow regime analysis of drippers. *J. Agric. Eng. Res.*, 22(2), 165–173. DOI: 10.1016/0021-8634(77)90060-9.
- [124] Katsoulas, N., Peponakis K., Ferentinos, K.P., Kittas C., 2015. Calibration of a growth model for tomato seedlings (TOMSEED) based on heuristic optimisation. *Biosyst. Eng.*, 140, 34–47. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.09.004.
- [125] Katz S, Dosoretz C, Chen Y, Tarchitzky J., 2014. Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater. *Irrig. Sci.*, 32, 459–469. DOI: 10.1007/s00271-014-0442-4.
- [126] Katzberg S., Torres O., Grant M., Masters D., 2006. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: Results from SMEX02, *Remote Sens. Environ.*, 100, 17–28. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080015510.pdf>.
- [127] Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J.P., Delwart S., Cabot F.O., Boutin J., Escorihuela M.J., Font J., Reul N., Gruhier C., 2010. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle, *Proc. IEEE*, 98(5), 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- [128] Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.P., Martinuzzi J.M., Font J., Berger M., 2001. Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean

- salinity (SMOS) mission. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 1729–1735. DOI: 10.1109/36.942551.
- [129] Kim J., Kang W., Ahn T., Shin J., Son J.E., 2016. Precise, real-time measurement of the fresh weight of lettuce with growth stage in a plant factory using a nutrient film technique. *Hortic. Sci. Technol.* 34, 77–83. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163122622>.
- [130] Kim S., Huang H.T., Liao T.H., 2018. Inversion of physical models using L-band airborne SAR data for soil moisture estimates at field scale. 38th IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 6115–6118. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519540.
- [131] Kirnak H., Doğan E., Demir S., Yalçın S., 2004. Determination of hydraulic performance of drip irrigation emitters used in irrigation system in the Harran Plain. *Turk. J. Agric. Ror.*, 28, 223–230. <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-04-28-4/tar-28-4-2-0311-3.pdf>.
- [132] Kiseleva O, Hübner C, Brandelik A, Kalthoff N, Kohler M, Königer F, Kottmeier C., 2014. A new approach to investigate soil moisture dynamics by radio waves. *TERENO Int. Conf.*, Tucson, Arizona, 3–35. DOI: 10.1002/nsg.12009.
- [133] Kluitenberg G.J., 2002. Heat capacity and specific heat. [W:] J.H. Dane, G.C. Topp (ed.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods*, SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI, 1201–1208. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/articles/sssabookseries/methodsofsoilan4/1201>.
- [134] Kluitenberg G.J. Ham J.M. Bristow K.L., 1993. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1444–1451. DOI: 10.2136/sssaj1993.03615995005700060008x.
- [135] Kluitenberg G.J., Bristow K.L., Das B.S., 1995. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil heat capacity, diffusivity and conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 719–726. DOI: 10.2136/sssaj1995.03615995005900030013x.
- [136] Kodama M., Kudo S. Kosuge T., 1985. Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement. *Soil Sci.*, 140, 237–242. https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1985/10000/APPLICATION_OF_ATMOSPHERIC_NEUTRONS_TO_SOIL.1.aspx.
- [137] Kojima Y., Shigeta R., Miyamoto N., Shirahama Y., Nishioka K., Mizoguchi M., Kawahara Y., 2016. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor. *Sensors*, 16, 1292. DOI: 10.3390/s16081292.

- [138] Kurum M., Lang R.H., O'Neill P.E., Joseph A.T., Jackson T.J., Cosh M.H., 2011. A first-order radiative transfer model for microwave radiometry of forest canopies at L-band. *IEEE J Geosci. Remote Sens. Lett.*, 49(9), 3167–3179. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2091139.
- [139] Kutilek M., 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.*, 79, 175–184. DOI: 10.1016/j.still.2004.07.006.
- [140] Lamm F.R., Camp C.R., 2007. Subsurface drip irrigation. [W:] F.R. Lamm, J.E. Ayars, F.S. Nakayama (ed), *Microirrigation for crop production – design, operation and management*, 13. Elsevier Publications, Amsterdam, 473–551. <https://www.elsevier.com/books/microirrigation-for-crop-production/lamm/978-0-444-50607-8>.
- [141] Lipton V.T., Artetxe A., Beunza A., Majada L., 2001. Irrigation control on substrates with the Laptometron, a new tensiometr. *Acta Hort.*, 559, 655–662. DOI: 10.17660/ActaHortic.2001.559.96.
- [142] Larson K.M., Bilich A., Axelrad P., 2007. Improving the precision of high-rate GPS, *J. Geophys. Res.*, 112, B05422. DOI:10.1029/2006JB004367.
- [143] Larson K.M., Small E.E., Gutmann E.D., Bilich A.L., Braun J.J., Zavorotny V.U., 2008b. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophys. Res. Lett.*, 35 L24405. DOI:10.1029/2008GL03601.
- [144] Larson K.M., Braun J.J., Small E.E., Zavorotny V.U., Gutmann E.D., Bilich A.L., 2010. GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. *IEEE j Sel Topics Appl Earth Observ Remote Sens.*, 3, 91–99. DOI: 10.1109/JSTARS.2009.2033612.
- [145] Larson K.M., Small E.E., Gutmann E.D., Bilich A.L., Axelrad P., Braun J.J., 2008. Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS Solut.*, 12, 173–177. DOI: 10.1007/s10291-007-0076-6.
- [146] Laymon C.A., Crosson W.L., Jackson T.J., Manu A., Tsegaye T.D., 2001. Ground-based passive microwave remote sensing observations of soil moisture at S-band and L-band with insight into measurement accuracy. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, 1844–1858. DOI: 10.1109/36.951075.
- [147] Lee W.J., Son J.E., 2019. Nondestructive and continuous fresh weight measurements of bell peppers grown in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(652), 1–13. DOI:10.3390/agronomy9100652.
- [148] Leib B.G., Jabro J.D., Matthews G.R., 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Sci.*, 168(6), 396–408. DOI: 10.1097/01.ss.0000075285.87447.86.
- [149] Leng Z., Al-Qadi L., 2014. An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-

- coupled GPR systems. *NDT & E Int.*, 66, 90–98. DOI:10.1016/j.ndteint.2014.05.002.
- [150] Letey J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1, 277–294. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-4612-5046-3.pdf>.
- [151] Li F., Peng X.F., Chen X.W., Liu M.L., Xu L.W., 2018. Analysis of key issues on GNSS-R soil moisture retrieval based on different antenna pattern. *Sensors*, 18(8). DOI 10.3390/s18082498.
- [152] Liu S., Zhang., 2009. Automatic bottom-irrigatiuon system of potted plant. CN201188804 (Y).
- [153] Liu X, Chen J., Cui X, Liu Q., Cao X., Chen X., 2017. Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: a review of current methods. *Int. J. Digital Earth*. DOI: 10.1080/17538947.2017.1412520.
- [154] Liu Z., Zhang M., Chen B., Yang Y., Li C., 2015. An automatic irrigation and moisture monitoring device for crop experiment cultivated in a pot. CN204498995.
- [155] Loew A., 2008. Impact of surface heterogeneity on surface soil moisture retrievals from passive microwave data at the regional scale: The Upper Danube case. *Remote Sens. Environ.*, 112(1), 231–248. DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.009.
- [156] Loijens H.S., 1980. Determination of soil-water content from terrestrial gamma radiation measurements. *Water Resour. Res.*, 16, 565–573. DOI: 10.1029/WR016i003p00565.
- [157] Long D.S., Wraith J.M., Kegel G., 2002. A heavy-duty time domain reflectometry soil moisture probe for use in intensive field sampling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 396–401. DOI: 10.2136/sssaj2002.3960.
- [158] Lu Y., Ma D., Chen X., Zhang J. 2018. A simple method for estimating field crop evapotranspiration from pot experiments. *Water*, 10, 1–19. DOI:10.3390/w10121823 .
- [159] Lu Y., Song W., Lu J., Wang X., Tan Y., 2017. An examination of soil moisture estimation using ground penetrating radar in desert steppe. *Water*, 9(7), 1–11. DOI:10.3390/w9070521.
- [160] Łyczko W., Olszewska B., Nowicka E., 2017. Ocena wyników pomiarów wilgotności gleby wykonanych metodą suszarkowo-wagową oraz metodą TDR w dolinie Odry. *Acta Sci. Pol. Form. Circum.*, 16(2), 159–166. DOI: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.2.159>.
- [161] Mangrio A.G., Asif M., Ahmed E., Sabir M.W., Khan T., Jahangir I., 2013. Hydraulic performance evaluation of pressure compensating (PC) emitters and micro-tubing for drip irrigation system. *Sci., Tech. Dev.*, 32(4), 290–298. <https://pdfs.semanticscholar.org/6e3c/>

aae1409991fdb9a7efd65555a4c02ef41e96.pdf?_ga=2.260282441.559505887.1582528232-1415391096.1566200810.

- [162] Martínez-Ruiz A., López-Cruz I.L., Ruiz-García A., Pineda-Pineda J., Prado-Hernández J.V., 2019. HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chil. J. Agric. Res.*, 79, 89–102. DOI: 10.4067/S0718-58392019000100089
- [163] Masters D., Zavorotny V., Katzberg S., Emery W., 2000. GPS signal scattering from land for moisture content determination. *Proc. IEEE 2000 Geosci. Remote Sens. Symp.*, 7, 3090–3092. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.860346.
- [164] Mawodza T., Burca G., Casson S., Menon M., 2020. Wheat root system architecture and soil moisture distribution in an aggregated soil using neutron computed tomography. *Geoderma* 359. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.113988.
- [165] Michot D., Benderitter Y., Dorigny A., Nicoullaud B., King, D., Tabbagh A. 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, 39(5), 1138. DOI:10.1029/2002WR001581.
- [166] Minty B.R.S., 1997. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO J. Aust. Geol. Geoph.*, 17, 39–50. https://www.math.temple.edu/~cmarloff/teaching/ph4796_10/NaI/airborne.pdf.
- [167] Moran M.S., Peters-Lidard C.D., Watts J.M., McElroy S., 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canad. J. Remote Sens.*, 30(5), 805–824. DOI: 10.5589/m04-043.
- [168] Musters P.A.D., Bouten W., 2000. A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents for calibrating a root water uptake model. *J. Hydrol.*, 227, 273–286. DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00187-0.
- [169] Muxlow M.A., 2005. Automatic watering device for hanging baskets and planter boxes. US7219468B1.
- [170] Naujoks M., Weise A., Kroner C., Jahr T., 2008. Detection of small hydrological variations in gravity by repeated observations with relative gravimeters. *J. Geodesy*, 82, 543–553. DOI: 10.1007/s00190-007-0202-9.
- [171] Niu W, Liu L, Chen X., 2013. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrig. Sci.*, 31(4), 545–555. DOI: 10.1007/s00271-012-0328-2.
- [172] Njoku E.G., Entekhabi D., 1996. Passive microwave remote sensing of soil moisture. *J. Hydrol.*, 184, 101–129. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02970-2.

- [173] Njoku E.G., Jackson T.J., Lakshmi V., Chan T.K., Nghiem S.V., 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(2), 215–229. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808243.
- [174] Nobiro K., 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Comput. Electron. Agric.*, 31, 213–237. DOI: 10.1016/S0168-1699(00)00184-8.
- [175] Nosalewicz A., 2013. Wpływ zlokalizowanego nawożenia oraz stanu zagęszczenia gleby na pobieranie wody i składników mineralnych przez kukurydzę. *Acta Agroph. Monograph*, 3, 1–103.
- [176] Ojha T., Misra S., Raghuwanshi N. S., 2015. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Comput. Electron. Agric.*, 118, 66–84. DOI: 10.1016/j.compag.2015.08.011.
- [177] Oliva R., Daganzo-Eusebio E., Kerr Y.H, Mecklenburg S., Nieto S., Richaume P., Gruhier C., 2012. SMOS radio frequency interference scenario: Status and actions taken to improve the RFI environment in the 1400–1427 MHz passive band. *Geosci. Remote Sens.*, 50(5-1), 1427–1439. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2182775.
- [178] Oliveira FC, Lavanholi R, Camargo AP, Frizzzone JA, Ait Mouheb N, Tomas S, Molle B., 2017. Influence of concentration and type of clay particles on dripper clogging. *J. Irrig. Drain Syst. Eng.*, 6, 184. DOI: 10.4172/2168-9768.1000184.
- [179] Olszewska B., Nowicka E., 2015. Comparison of gravimetric method and TDR method applied to medium alluvial soils of the valley of the Oder river in the region of Brzeg Dolny in the period of 2010–2014. *J. Ecol. Engin.*, 16(4), 44–48. DOI: 10.12911/22998993/59346.
- [180] Paluszek J., 2011. Kryteria oceny jakości fizycznej gleb uprawnych Polski. *Acta Agroph. Monograph*, 2. http://www.old.acta-agrophysica.org/artykuly/acta_agrophysica/ActaAgr_191_2011_1_1_139.pdf.
- [181] Parakash K., Sridharan M.E., Sudheendra B.E., 2014. Hygroscopic moisture content: determination and correlations. *Envir. Geotech.* DOI: 10.1680/envgeo.1400008.
- [182] Pardé M., Wigneron J.P., Chanzy A., Waldteufel P., Kerr Y., Huet S., 2003. Retrieving surface soil moisture over a wheat field: comparison of different methods. *Remote Sens. Environ.*, 87, 334–344. DOI: 10.1016/j.rse.2003.08.002.
- [183] Peng J., Loew A., Merlin O., Verhoest N.E.C., 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of geophysics*, 55(2), 341–366. DOI: 10.1002/2016RG000543.
- [184] Peterson J., 2001. Pre-inversion corrections and analysis of radar tomographic data. *J. Envir. Eng. Geoph.*, 6(1), 1–18. DOI:10.4133/JEEG6.1.1.

- [185] Petropoulos G.P., Ireland G., Barrett B., 2015. Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products and future trends. *Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C*, 83–84, 36–56. DOI: 10.1016/j.pce.2015.02.009.
- [186] Pfeiffer J., Champollion C., Favreau G., Cappelaere B., Hinderer J., Boucher M., Nazoumou Y., Oï M., Mouyen M., Henri C., Lemoigne N., Deroussi S., Dematry J., Boulain N., Benarrosh N., Robert O., 2013. Evaluating surface and subsurface water storage variations at small time and space scales from relative gravity measurements in semiarid Niger. *Water Resour. Res.*, 49, 3276–3291. DOI:10.1002/wrcr.20235.
- [187] PN-EN 13635 – Nawodnienia – Systemy nawodnień umiejscowionych – Terminologia oraz dane dostarczane przez producenta (2003).
- [188] PN-R-01000 – Nawodnienia – Nawodnienia umiejscowione – Terminologia (1997).
- [189] Poltoradnev M., Ingwersen J., Streck T., 2015. Calibration and application of aquaflex TDT soil water probes to measure the soil water dynamics of agricultural topsoil in southwest germany. *J. Irrig. Drainage Engg.*, 141(6). DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000838.
- [190] Portal G., Vall-llossera M., Piles M., Camps A., Chaparro D., Pablos M., Rossato L., Aabouch K., 2018. Microwave and optical data fusion for global mapping of soil moisture at high resolution. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing IGARSS*, 341–344. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518129.
- [191] Qian J, Horn H, Tarchitzky J, Chen Y, Katz S, Wagner M., 2017. Water quality and daily temperature cycle affect biofilm formation in drip irrigation devices revealed by optical coherence tomography. *Biofouling*, 33(3), 211–221. DOI:10.1080/08927014.2017.1285017.
- [192] Rafel B.G., 2006. System of Plant Pots for Flower Stands. WO2004089064.
- [193] Ramana Rao K.W., Agrawal V., Patel G.P., Keshri R., Chourasila L., 2012. Effect of flushing frequency and filtration in emitters clogging. *Int. J. Agric. Eng.*, 5(2), 284–287. <https://pdfs.semanticscholar.org/f560/d8d70ee15877334024e1bc8863d4e1fb9854.pdf>.
- [194] Rataj M., 1993. Teledetekcja mikrofalowa – Podstawy I pomiar wilgotności gleb. *Fotointerpretacja w geografii*, 23, 93–106. http://geoinformatics.uw.edu.pl/wp-content/uploads/sites/26/2014/03/TS_v23_93-106.pdf.
- [195] Ravina I., Paz E., Sofer Z., Marcu A., Schischa A., Sagi G. 1992. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrig. Sci.*, 13(3), 129–139. DOI: 10.1007/BF00191055.

- [196] Reinders F.B., 2011. Irrigation methods for efficient water application: 40 years of South African research excellence. *Water SA.*, 30(5), 765–770. DOI: 10.4314/wsa.v37i5.13.
- [197] Ren T., Noborio K., Horton R., 1999. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 450–457. DOI:10.2136/sssaj1999.03615995006300030005x.
- [198] Ribeiro P.A.A., Coelho R.D., Teixeira M.B., 2010 Clogging of conventional driplines under the application of potassium chloride (white and red) with two water qualities. *Eng. Agríc.*, 30(2), 279–287. DOI: 10.1590/S0100-69162010000200010.
- [199] Ribeiro P.A.A., Teixeira M.B., Coelho R.D., Franco E.M., Silva N.F., Carvalho L.C.C., Alves M.E.B., 2012. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. *Irriga*, 1, 368–379. DOI: 10.15809/irriga.2012v1n01p368.
- [200] Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W., Hornbuckle B.K., Jones S.B., 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone J.*, 7, 358–389. DOI:10.2136/vzj2007.0143.
- [201] Romano S., Santini A., 2002. Water retention and storage. [W:] J.H. Dane, G.C. Topp (eds), *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society America, 721–738. DOI: 10.2136/sssabookser5.4.c26.
- [202] Roth C.H., Malicki M.A., Plagge R., 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Soil Sci.*, 43, 1–13. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x.
- [203] Roth K., Schulin R., Flühler H., Attinger W. 1990. Calibration of timedomain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, 26(10), 2267–2273. DOI: 10.1029/WR026i010p02267.
- [204] Rucker D.F., Ferré T.P.A., 2003. Near-surface water content estimation with borehole ground penetrating radar using critically refracted waves. *Vadose Zone Journal*, 2(2), 247–252. DOI:10.2113/2.2.247.
- [205] Rucker D.F., Ferré T.P.A., 2004. Correcting water content measurement errors associated with critically refracted first arrivals on zero offset profiling borehole ground penetrating radar profiles. *Vadose Zone J.*, 13(1), 278–287. DOI:10.2113/3.1.278.
- [206] Rucker D.F., Ferré T.P.A., 2005. Automated water content reconstruction of zero-offset borehole ground penetrating radar data using simulated annealing. *J. Hydrol.*, 309, 1–16. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.11.008.

- [207] Rutkowski K., Kollárová K., Krajčo J., Plačko I., 2007. Ocena zmienności przestrzennej wilgotności gleby na podstawie map konduktywności elektrycznej. Część II. Inż. Rol., 8(96), 225-232. [https://ir.ptir.org/artykuly/pl/94/IR\(94\)_1873_pl.pdf](https://ir.ptir.org/artykuly/pl/94/IR(94)_1873_pl.pdf).
- [208] Sabaghy S., Walker J.P., Renzullo L.J., Jackson T.J., 2018. Spatially enhanced passive microwave derived soil moisture: Capabilities and opportunities. *Remote Sens. Envir.*, 209, 551–580. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.06.
- [209] Sanabria S.J., Lanvermann C., Michel F., Mannes D., Niemz P., 2015. Adaptive neutron radiography correlation for simultaneous imaging of moisture transport and deformation in hygroscopic materials. *Exp. Mech.*, 55(2), 403–415. DOI: 10.1007/s11340-014-9955-2.
- [210] Šařec P., Šařec O., Prošek V., Dobek T., 2008. Opis budowy nowego urządzenia do pomiaru wilgotności gleby. Inż. Rol., 11(109), 219–225.
- [211] Sayde C., Gregory C., Gil-Rodriguez M., Tufillaro N., Tyler S., van de Giesen N., English M., Cuenca R., Selker J.S., 2010. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resour. Res.*, 46. DOI: 10.1029/2009WR007846.
- [212] Scanlon B.R., 2002. Water potential: Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. W: Dane, J., Topp, C., (eds). *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, Part 4, 643–670. DOI: 10.2136/sssabookser5.4.c23.
- [213] Schneeberger, K., M. Schwank, Ch. Stamm, P. de Rosnay, Ch. Matzler, and H. Fluhler., 2004. Topsoil structure influencing soil water retrieval by microwave radiometry. *Vadose Zone J.*, 3, 1169–1179. DOI: 10.2113/3.4.1169.
- [214] Schneider M., Goss U., 2012. Prediction of the water sorption isotherm in air dry soils. *Geoderma* 170, 64–69. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.10.008.
- [215] Schwankl L., Prichard T., 1999. Drip irrigation in the home landscape. *Univ. California*, 21579, 03–29.
- [216] Segal E., Kushnir T., Mualem Y., Shani U., 2008. Water uptake and hydraulics of the root hair rhizosphere. *Vadose Zone J.*, 7, 1027–1034. DOI: 10.2136/vzj2007.0122.
- [217] Seneviratne S. I., Corti T., Davin E. L., Hirschi M., Jaeger E. B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A. J., 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.*, 99(3–4), 125–161. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- [218] Serbin G., Or. D., 2003. Near-surface soil water content measurements using horn antenna radar. *Vadose Zone J.*, 2(4), 500–510. DOI: 10.2136/vzj2003.0500.

- [219] Shah P.H., Singh D.N., 2006. Methodology for determination of hygroscopic moisture content in soils. *J. ASTM Int.*, 3(2). DOI: 10.1520/JAI13376.
- [220] Shamschery P., Wang R.Q., Tran D.V., Winter A.G., 2017. Modeling the future of irrigation: A parametric description of pressure compensating drip irrigation emitter performance. *PLOS ONE*, 12(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0175241.
- [221] Shinde D.G., Patel K.G., Solia B.M., Patil R.G., Lambade B.M., Kaswala A.R., 2012. Clogging behaviour of drippers of different discharge rates as influenced by different fertigation and irrigation water salinity levels. *J. Envir. Res. Dev.*, 7(2A). https://pdfs.semanticscholar.org/bd55/0caa048b11e498785f53c3eb2ee93b136e40.pdf?_ga=2.69971032.954305310.1582782321-1415391096.1566200810.
- [222] Shock C.C. Wang F.X., 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. *Am. Soc. Hort. Sci.*, 46(2), 178–185. DOI: 10.21273/HORTSCI.46.2.178.
- [223] Sicoli C.E.S., Aliod R., Zorilla F., Morabito J.A., 2019. Optimal design of drip irrigation submains: pressure-compensating emitters. *Rev. FCA UNCUYO*, 51(2), 154–166. https://www.researchgate.net/publication/337248604_Optimal_design_of_drip_irrigation_submains_Presure-Compensating_Emitters.
- [224] Silva B.M., Silva É.A., Oliveira G.C., Ferreira M.M., Serafim M.E., 2014. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 38, 464–475. DOI: 10.1590/S0100-06832014000200011.
- [225] Skierucha W., 2002. Badanie wpływu temperatury na przenikalność dielektryczną gleby – opis laboratoryjnego zestawu pomiarowego oraz zastosowanego oprogramowania. *Acta Agroph.*, 72, 117–124. http://www.old.acta-agrophysica.org/artykuly/acta_agrophysica/ActaAgr_122_2005_0_0_1.pdf.
- [226] Skierucha W., Wilczek A., 2007. Polowy system monitorowania wilgotności gleby. *PAK*, 53, 342–345.
- [227] Skierucha W., Wilczek A., Szyplowska A., Sławiński C., Lamorski K., 2012. A TDR-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity. *Sensors (Basel)*, 12(10), 13545–13566. DOI: 10.3390/s121013545.
- [228] Skierucha W., Malicki M.A., 2000. Ocena stosowanych modeli przenikalności dielektrycznej gleb mineralnych. *Acta Agroph.*, 34, 157–168.
- [229] Skoop J., Jawson M.D., Doran J.W., 1990. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil-water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1619–1625.

<https://pdfs.semanticscholar.org/9ad9/b121394a34a95b5700d3471adb91c8e15717.pdf>.

- [230] Slob E., Sato M., Olhoeft G., 2010. Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. *Geophysics*, 75(5), 75A103 – 75A120. DOI:10.1190/1.3480619.
- [231] Smajstrla A.G. Locascio S.J., 1996. Tensiometer controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. *Appl. Eng. Agr.*, 12, 315–319. DOI: 10.13031/2013.25654.
- [232] Spelt J., 1997. Self-watering apparatus for plant. WO1997027734A1.
- [233] Spray D.A., 2007. Plant container with watering system. US7730666 B2.
- [234] Srivastava P.K., 2017. Satellite Soil Moisture: Review of theory and applications in water resources. *Water Res. Manag.*, 31(10), 3161–3176. DOI: 10.1007/s11269-017-1722-6.
- [235] Steelman C.M., Endres A.L., 2011. Comparison of Petrophysical Relationships for Soil Moisture Estimation Using GPR Ground Waves. *Vadose Zone J.*, 10(1), 270–285. DOI: 10.2136/vzj2010.0040.
- [236] Strebel O., Renger M. Giesel, W., 1973. Soil suction measurements for evaluation of vertical water flow at greater depths with a pressure transducer tensiometer. *J. Hydrol.*, 18(3–4), 367–370. DOI: 10.1016/0022-1694(73)90058-9.
- [237] Sulthoni M.A., Anugrah B.P., Wicaksono N.A., 2016. Development of economical microcontroller-based soil moisture sensor using time domain reflectometry. *Int. Symp. Electron. Smart Dev. (ISESD) Indonesia nov 29–30*, 360–364. DOI: 10.1109/ISESD.2016.7886748
- [238] Sun Y., Ma D., Schulze-Lammers P., Schmittmann O., Rose, M., 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil Till. Res.*, 86, 209–217. DOI: 10.1016/j.still.2005.02.022
- [239] Suwara I., 2010. Rola wieloletniego nawożenia w kształtowaniu wybranych właściwości gleby lekkiej ze szczególnym uwzględnieniem stosunków wodno-powietrznych. *Wyd. SGGW, Warszawa*, ss. 98.
- [240] Szulc P., 2007. Wazon wegetacyjny. PL 64 450 Y1.
- [241] Świercz A., Słomkiewicz P.M., 2015. Konstrukcja i zastosowanie wazonu wegetacyjnego do pomiarów rozwoju roślin w warunkach zróżnicowanego zagęszczenia gleby w obrębie systemu korzeniowego. PL 218767.
- [242] Taber H.G., Lawson V., Smith B., Shogren D., 2002. Scheduling microirrigation with tensiometers or Watermarks. *Int. Water Irrig.*, 22, 22–26.
- [243] <http://mdl.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=0607033EN&q=&uid=790833102&setcookie=yes>.

- [244] Tajrishy M.A., Sills D.J., Tchobanoglous G., 1994. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120(4), 716–731. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:4(716).
- [245] Tayel M.Y., Mansour H.A., Pibars SK., 2019. The hydraulic evaluation of drip irrigation system by hydrocalc model under different dripper types and low quality water. *Plant Archives*, 19(2), 554–561. [http://plantarchives.org/SPL%20ISSUE%20SUPP%202019/97%20\(554-561\).pdf](http://plantarchives.org/SPL%20ISSUE%20SUPP%202019/97%20(554-561).pdf).
- [246] Teuling A.J., Uijlenhoet R., Hupet F., van Loon E.E., Troch P.A., 2006. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 755–767. DOI: 10.5194/hess-10-755-2006.
- [247] Thompson R.B., Gallardo M., Aguera T., Valdezand L.C., Fernande M.D., 2006. Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrig. Sci.*, 24, 185–202. DOI: 10.1007/s00271-005-0009-5.
- [248] Thompson R.B., Gallardo M., Fernande M.D., 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agric. Water Manage.*, 88, 147–158. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2006.10.007.
- [249] Thomsen A., Dröscher P., Steffensen F., Hougaard H., 2003. Mobile TDR for geo-referenced measurements of soil water content and soil electrical conductivity. *Europ. Conf. Precis. Agric.*, Berlin, Germany, 15–19 June. DOI: 10.1007/s11119-007-9041-1.
- [250] Thring L.M., Boddice D., Metje N., Curioni G., Chapman D.N., Pring, L., 2014. Factors affecting soil permittivity and proposals to obtain gravimetric water content from time domain reflectometry measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(11), 1303–1317. DOI: 10.1139/cgj-2013-0313.
- [251] Tokumoto I., Heilman J.L., Kamps R.H., 2011. Sealing neutron probe access-tubes in rocky soils using expandable polyurethane foam. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75, 1922–1925. DOI: 10.2136/sssaj2011.0032n.
- [252] Tokumoto I., Heilman J.L., McInnes K.J., Morgan C.L.S., Kamps R.H., 2012. Calibration and use of neutron moisture and gamma density probes in rocky soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76(6), 2136–2142. DOI: 10.2136/sssaj2012.0167
- [253] Topp G.C., Zegeli S., White I., 2000. Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64(4), 1244–1252. DOI: 10.2136/sssaj2000.6441244x

- [254] Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resour. Res.*, 16(3), 574–582. DOI:10.1029/WR016i003p00574.
- [255] Topp G.C., Ferré P.A., 2002. Thermo gravimetric method using convective oven-drying. [W:] J.H. Dane, G.C. Topp (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical methods*. SSSA, Madison, WI, 422–424. DOI:10.2136/sssabookser5.4.c19.
- [256] Tosti F., Slob E., 2015. Determination, by using GPR, of the volumetric water content in structures, substructures, foundations and soil. [W:] *Civil engineering applications of ground penetrating radar*, Springer International Publishing, 163-194. DOI: 10.1007/978-3-319-04813-0_7.
- [257] Turcu V.E., Jones S.B., Or D., 2005. Continuous soil carbon dioxide and oxygen measurements and estimation of gradient-based gaseous flux. *Vadose Zone J.*, 4, 1161–1169. DOI: 10.2136/vzj2004.0164.
- [258] Ueda M., Nakamura Y., 2007. Chemical basis of plant leaf movement. *Plant Cell Physiol.*, 48, 900–907. DOI: 10.1093/pcp/pcm060.
- [259] Urie W.A., 1994. Environmental factors influencing recreational trail condition, M.S. Thesis. Montana State University, Bozeman, MT, 1–86. <https://scholarworks.montana.edu/xmlui/bitstream/handle/1/7647/31762102661889.pdf?sequence=1>.
- [260] Ursulino B.S., Montenegro S.M.G.L., Coutinho A.P., Coelho V.H.R., Araujo D.C.D., Gusmao A.C.V., Neto S.M.D., Lassabatere L., Angulo-Jaramillo R., 2019. Modelling soil water dynamics from soil hydraulic parameters estimated by an alternative method in a tropical experimental Basin. *Water*, 11(5). DOI: 10.3390/w11051007.
- [261] Usowicz B., Marczewski W., Sławiński C., Łukowski M., Usowicz J.B., 2012. Wilgotność gleb na obszarze Polski z pomiarów satelitarnych. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, XXXIII, 153–161.
- [262] Valente A., Saraiva A., Ferreira N.M.F., Soares S., 2018. On the design and construction of dual-probe heat-pulse soil moisture sensor: towards an industrial solution. *III Int. Conf. Adv. Sensors, Actuators, Meter. Sensing.*, 43–48. https://www.researchgate.net/publication/324694122_On_the_Design_and_Construction_of_Dual-Probe_Heat-Pulse_Soil_Moisture_Sensor_Towards_an_Industrial_Solution.
- [263] Valente A., Soares S., Morais R., Baptista J.M., Cabral M., 2010. Button heat-pulse sensor for soil water content measurements. *First Int. Conf. Sensor Dev. Tech. App.* DOI: 10.1109/SENSORDEVICES.2010.40.
- [264] van Wesenbeeck I.J., Kachanoski R.G., 1988. Spatial and temporal distribution of soil water in the tilled layer under a corn crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 363–368. DOI: 10.2136/sssaj1988.03615995005200020011x.

- [265] Veihmeyer F.J., Hendrickson A.H., 1927. Soil-moisture conditions in relation to plant growth. *Plant Physiology.*, 3, 71–82. DOI: 10.1104/pp.2.1.71 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC439946/?page=9>.
- [266] Veihmeyer F.J., Hendrickson A.H., 1949. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.*, 68, 75–94. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1949/07000/methods_of_measuring_field_capacity_and_permanent.7.aspx?Ppt=Article%7Csoilsci:1949:07000:00007%7C%7C.
- [267] Veihmeyer F.J., Hendrickson A.H., 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.*, 32, 181–193. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1931/09000/THE_MOISTURE_EQUIVALENT_AS_A_MEASURE_OF_THE_FIELD.3.aspx.
- [268] Vereecken H., Huisman J.A., Pachepsky Y., Montzka C., van der Kruk J., Bogena H., Weihermüller L., Herbst M., Martinez G., Vanderborght J., 2014. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *J. Hydrol.*, 516(SI), 76–96. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.11.061.
- [269] Wagner W., Pathe C., Doubkova M., Sabel D., Bartsch A., Hasenauer S., Blöschl G., Scipal K., Martínez-Fernández J., Löw A., 2008. Temporal stability of soil moisture and radar backscatter observed by the advanced synthetic aperture radars (ASAR), *Sensors*, 8(2), 1174–1197. DOI: 10.3390/s80201174.
- [270] Wagner W., Sabel D., Doubkova M., Bartsch A., Pathe C., 2009. The potential of Sentinel-1 for monitoring soil moisture with a high spatial resolution at global scale. *Symp. Earth Observ. Water Cycle Sci.* https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_187543.pdf.
- [271] Walczak R., Ostrowski J., Witkowska-Walczak B., Sławiński C., 2002. Hydrofizyczne charakterystyki mineralnych gleb ornych Polski. *Acta Agroph.*, 79.
- [272] Walther L., Schleppe P., 2018 Equations to compensate for the temperature effect on readings from dielectric Decagon MPS-2 and MPS-6 water potential sensors in soils. *J. Plant Mut. Soil Sci.*, 181(5), 749–759. DOI: 10.1002/jpln.201700620.
- [273] Wang Y., Xie Y., Wang J., Liu G., Li J., 2014. Automatic irrigation device for pot experiment. CN203388027 (U).
- [274] Western A.W., Blöschl G., Grayson R.B., 1998. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *J. Hydrol.*, 205, 20–37. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00142-X.
- [275] Western A.W., Grayson R.B., Blöchl G., 2002. Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. *Annu. Rev. Earth Plant Sci.*, 30, 149–180. DOI: 10.1146/annurev.earth.30.091201.140434.

- [276] Whalley W.R., 1993. Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content., *J. Soil Sci.*, 44, 1–9. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1993.tb00429.x
- [277] Whitney F.D., Gardner L.J., Briggs L.J., 1897. An electrical method of determining the moisture content of arable soils. U.S. Dept. Agr. Bur. Soils Bull., 6.
- [278] Wigneron J.P., Kerr Y., Waldteufel P., Saleh K., Escorihuela M.J., Richaume P., Ferrazzoli P., de Rosnay P., Gurney R., Calvet J.C., Grant J.P., Guglielmetti M., Hornbuckle B., Mätzler C., Pellarink T., Schwank M., 2007. L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields. *Remote Sens. Environ.*, 107, 639–655. DOI: 10.1016/j.rse.2006.10.014.
- [279] Wijewardana Y.G.N.S., Galagedara L.W., 2010. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *J. Hydrol.*, 391, 26–35. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.06.036.
- [280] Will B., Gerding M., Schultz C., Bear C., Musch T., 2012. A time domain transmission measurement system for dielectric characterizations. *Int. J. Microwave and Wireless Tech.*, 4(3), 349–355. DOI: 10.1017/S1759078712000347.
- [281] Wraith J.A., Robinson D.A., Jones S.B., Long D.S., 2005. Spatially characterizing apparent electrical conductivity and water content of surface soils with time domain reflectometry. *Comput. Electron. Agric.*, 46, 239–261. DOI: 10.1016/j.compag.2004.11.009.
- [282] Wu M., Wu J., Tan X., Huang J., Jansson P.E., Zhang W., 2019. Simulation of dynamical interactions between soil freezing/thawing and salinization for improving water management in cold/arid agricultural region. *Geoderma*, 338, 325–342. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.12.022.
- [283] Xu H.Z., Yuan Q.Q., Ki T.W., Shen H.F., Zhang L.P., Jiang H.T., 2018. Quality improvement of satellite soil moisture products by fusing with in-situ measurements and GNSS-R estimates in the western continental US. *Remote Sensing*, 10(9), 1351–1373. DOI: 10.3390/rs10091351.
- [284] Yan D., Bai Z., Rowan M., Gu L., Shumei R., Yang P., 2009. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. *J. Environ. Sci.*, 21(6), 834–841. DOI:10.1016/S1001-0742(08)62349-9.
- [285] Yi F., Astin I., 2015. Remote sensing of soil moisture using the propagation of Loran-C navigation signals. *IEEE J Geosci. Remote Sens. Lett.*, 12, 195–198. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2332055.

- [286] Yoshioka K., 1989. Soil-moisture gauge using terrestrial gamma-rays. *Nucl. Geophys*, 3, 397–401.
- [287] Zhang T., Liu S.Y., Cai G.J., 2018. Correlations between electrical resistivity and basic engineering property parameters for marine clays in Jiangsu, China. *J. Applied Geophysics*, 159, 640–648. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.10.012.
- [288] Zhao Y., Ling D.S., Wang Y.L., Huang B., Wang H.L., 2016. Study on a calibration equation for soil water content in field tests using time domain reflectometry. *J Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys and Eng)*, 17(3), 240–252. DOI: 10.1631/jzus.A1500065.
- [289] Zhengying W., Meng C., Xia L., Yiping T., Bingheng, L., 2012. Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels. *Chin. J. Mech. Eng.*, 25(8), 1–9. DOI: 10.3901/CJME.2012.04.729.
- [290] Zhou B., Li Y., Liu Y., Xu F., Pei Y., Wang Z., 2015. Effect of drip irrigation frequency on emitter clogging using reclaimed water. *Irrig. Sci.* 33, 221–234. DOI: 10.1007/s00271-015-0461-9.
- [291] Zreda M., Desilets D., Ferré T.P.A., Scott R.L., 2008. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysic. Res. Lett.*, 35, L21402. DOI: 10.1029/2008GL035655.
- [292] Zreda M., Nitrychoruk J., Chodyka M., Świerczewska-Pietras K., Zbucki Ł., 2015. Nowa metoda pomiaru wilgotności gleby z wykorzystaniem neutronów kosmogenicznych. *Przegląd Geol.*, 63(4), 239–246. https://www.researchgate.net/publication/285812944_New_method_for_measuring_soil_moisture_using_cosmogenic_neutrons_Nowa_metoda_pomiaru_wilgotnosci_gleby_z_wykorzystaniem_neutronow_kosmogenicznych.
- [293] Zreda M., Shuttleworth W.J., Zeng X., Zweck C., Desilets D., Franz T. Rosolem R., 2012. COSMOS: The COsmic-ray soil moisture observing system. *Hydrol. Earth System Sci.*, 16, 4079–4099. DOI: 10.5194/hess-16-4079-2012.
- [294] Żurbicki Z., 1974. *Metodyka doświadczeń wazonowych*. PWRiL, Warszawa.

Spis tabel, rysunków i fotografii

Rysunki

Rys. 1. Podział metod pomiaru wilgotności gleby ze względu na fizyczne właściwości metody (opracowanie własne)	10
Rys. 2. Podział metod pomiaru wilgotności gleby ze względu na przestrzenne właściwości metody (opracowanie własne)	11
Rys. 3. Wilgotność objętościowa gleby [%, v/v] w strefie korzeniowej żyta i poza strefą korzeni – kontroli (TDR).....	47
Rys. 4. Wilgotność gleby [%, v/v] w strefie korzeniowej rzepaku i poza strefą korzeni – kontroli (TDR).....	48
Rys. 5. Wilgotność gleby [%, v/v] w strefie korzeniowej żyta i poza strefą korzeni – kontroli (metoda grawimetryczna)	48
Rys. 6. Wilgotność gleby [%, v/v] w strefie korzeniowej rzepaku i poza strefą korzeni – kontroli (metoda grawimetryczna)	49
Rys. 7. Wilgotność gleby [%, v/v] wyizolowanej ze strefy korzeniowej żyta i kontroli – metoda grawimetryczna	50
Rys. 8. Wilgotność gleby [%, v/v] wyizolowanej ze strefy korzeniowej rzepaku i kontroli – metoda grawimetryczna	50
Rys. 9. Oznaczona za pomocą metody TDR wilgotność gleby [%, v/v] ze strefy korzeniowej żyta w zależności od obecności w niej korzeni.....	52
Rys. 10. Oznaczona z wykorzystaniem metody TDR wilgotność gleby [%, v/v] ze strefy korzeniowej rzepaku w zależności od obecności w niej korzeni	50
Rys. 11. Schemat instalacji do testowania wydatku emiterów	57
Rys. 12. Schemat instalacji do testowania wydatku emiterów z rozdzielaczami podwójnymi.....	58
Rys. 13. Schemat instalacji do testowania wydatku zestawu emiter z kompensacją ciśnienia + emiter patykowy z labiryntem.....	59
Rys. 14. Podstawowe statystyki łącznego wydatku wody dla kroplowników z obu stron rozdzielacza podwójnego.....	63
Rys. 15. Podstawowe statystyki średniego z powtórzeń wydatku wody dla kroplowników dla prawej strony rozdzielacza podwójnego.....	63
Rys. 16. Różnice w objętości wydatkowanej wody [$\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] pomiędzy stronami rozdzielacza dla jednego z powtórzeń.....	64
Rys. 17. Ilość wydatkowanej wody [$\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] dla poszczególnych emiterów z uwzględnioną objętością wody rozdzieloną na prawą i lewą stronę rozdzielacza	64
Rys. 18. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym opartym na programowanym czasie nawadniania – znany stan techniki	67
Rys. 19. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym ze sterowaniem opartym na programowanej dawce wody z odczytu przepływomierza – rozwiązanie autorskie	68

Rys. 20. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym ze sterowaniem opartym na pomiarze wilgotności podłoża tensjometrami wyposażonymi w wakuometr z nastawnym stycznikiem – rozwiązanie autorskie	69
Rys. 21. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym ze sterowaniem opartym na pomiarze wilgotności podłoża tensjometrami wyposażonymi w wakuometr z nastawnym stycznikiem i sterownikiem czasowym – rozwiązanie autorskie	70
Rys. 22. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym ze sterowaniem opartym na pomiarze wilgotności podłoża i na oprogramowaniu sterownika PLC – rozwiązanie autorskie	71
Rys. 23. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym w wariancie nr 1 (rozwiązanie autorskie)	78
Rys. 24. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym w wariancie nr 2 (rozwiązanie autorskie)	80
Rys. 25. Schemat instalacji nawadniającej wykorzystywanej w doświadczeniu wazonowym w wariancie nr 3 (rozwiązanie autorskie)	83
Rys. 26. Podstawowe miary opisowe objętości wody aplikowanej przez punkty emisji dla poziomu wilgotności podłoża L	85
Rys. 27. Podstawowe miary opisowe objętości wody aplikowanej przez punkty emisji dla poziomu wilgotności podłoża M	85
Rys. 28. Podstawowe miary opisowe objętości wody aplikowanej przez punkty emisji dla poziomu wilgotności podłoża H	86
Rys. 29. Wilgotność podłoża [% (v/v)] w doświadczeniu wazonowym w trakcie wegetacji pszenicy jarej w zależności od sposobu sterowania emisją wody	88

Tabele

Tabela 1. Kryteria wielocechowej organoleptycznej oceny stanu uwilgotnienia gleby	32
Tabela 2. Charakterystyka punktowych metod pomiaru wilgotności gleby	36
Tabela 3. Masa korzeni i zawartej w nich wody w odniesieniu do masy próbki gleby pobranej ze strefy korzeniowej żyta i rzepaku	51
Tabela 4. Specyfikacja techniczna wybranych emiterów kroplowych online	56
Tabela 5. Wydatek emiterów w zależności od ciśnienia wody w sieci zasilającej	60
Tabela 6. Symulacja wydatku wody dla punktów emisyjnych w zależności od liczby emiterów w punkcie	61
Tabela 7. Różnice w ilości wydatkowanej wody pomiędzy stronami rozdzielacza podwójnego	64
Tabela 8. Wydatek zestawu kroplowników + emiter patykowy z labiryntem w zależności od ciśnienia wody w sieci zasilającej	65
Tabela 9. Wydatek kroplowników w doświadczeniu wazonowym (wariant nr 2)	87
Tabela 10. Wydatek wody punktów emisyjnych w doświadczeniu wazonowym (wariant nr 3)	90

Fotografie

Fot. 1. Instalacja do testowania wydatku emiterów.....	58
Fot. 2. Widok ogólny na doświadczenie wazonowe – wariant 1	72
Fot. 3. Widok ogólny na doświadczenie wazonowe – wariant 2	73
Fot. 4. Zestaw elektrozaworów i przepływomierzy sieci nawadniającej	81
Fot. 5. TDR, MIDL i sterownik PLC	81
Fot. 6. Wazon referencyjny z sondą TDR	81

WILGOTNOŚĆ GLEBY – METODYCZNY ASPEKT BADAŃ ROLNICZYCH

Streszczenie

Zawartość wody w glebie decyduje praktycznie o wszystkich jej właściwościach fizycznych, biochemicznych i o mikrobiologicznej aktywności, ale przede wszystkim o dostępności wody dla roślin. W światowej literaturze można znaleźć nieliczne artykuły naukowe zawierające przegląd technik pomiaru wilgotności gleby, a w literaturze krajowej brakuje szerszych opracowań w tym zakresie. Użytkownicy urządzenia lub systemy pomiarowe powinni być zorientowani w kwestiach dokładności i selektywności wybranych przez siebie metod, aby uniknąć późniejszych błędów interpretacji wyników. Przytoczony postulat ma tym większe znaczenie, gdy uwzględni się okoliczność, że światowa literatura nie wyjaśnia kwestii, czy oznaczana wilgotność gleby obejmuje tylko wodę zawartą w jej abiotycznej części czy – również wodę znajdującą się w organizmach żywych. Wiele badań dotyczących interakcji roślina – woda jest realizowanych za pomocą doświadczeń wazonowych. Prowadzenie takich doświadczeń jest utrudnione nieustanną koniecznością regulowania i utrzymania zakładanej wilgotności podłoża.

Prezentowane przedmiotowe opracowanie nakierowano na rozwiązanie trzech problemów:

- usystematyzowanie wiedzy dotyczącej zarówno metod pomiaru wilgotności gleby, jak i możliwości ich zastosowania w praktyce rolniczej i w doświadczalnictwie,
- weryfikację hipotezy zakładającej, że woda zawarta w korzeniach żywych roślin może istotnie zmieniać wyniki pomiarów wilgotności gleby,
- zaprojektowanie alternatywnych – wobec obecnie stosowanych – systemów automatycznego nawadniania wazonów vegetacyjnych, cechującego się precyzją i dokładnością, których poziom jest wystarczający do rzetelnego przeprowadzania badań doświadczalnych.

Podjęta analiza literatury wskazuje, że pomimo opracowania wielu technik i zapewnienia dostępności bardzo szerokiego spektrum urządzeń do pomiaru wilgotności gleby ciągle brak ekonomicznie uzasadnionych rozwiązań mogących mieć szersze zastosowanie w polowej produkcji roślinnej. Należy uznać więc, że jest to nadal niezbadany dostatecznie przez naukę obszar wiedzy rolniczej.

Dotychczas w interpretacji wyników pomiaru wilgotności gleby nie brano pod uwagę, że oprócz wody retencjonowanej w glebie siłami fizycznymi pewną jej ilość wiążą organizmy żywe. W przedmiotowej monografii wykazano jednak, że woda zawarta w korzeniach roślin może w warunkach niskiej wilgotności gleby stanowić duży odsetek – nawet kilkadziesiąt procent – całej wody zawartej w glebie. Problem wynika z tego, że stosowane obecnie urządzenia pomiarowe nie są selektywne względem wody aktywnie związanej przez organizmy żywe.

Jeden z większych problemów realizacji badań w wazonach wegetacyjnych polega na tym, że nie ma możliwości zastosowania zautomatyzowanego regulowania wilgotności podłoża, spełniającego wymagania doświadczalnictwa. Wykorzystywane obecnie metody mogą generować zbyt dużą niekontrolowaną zmienność czynnika wodnego – w literaturze brak informacji o ich walidacji. Przedstawione w prezentowanym opracowaniu rozwiązania techniczne pozwalają na zaprojektowanie systemu automatycznego nawadniania wazonów, cechującego się precyzją i dokładnością na poziomie, który jest wystarczający do wykorzystania go do celów doświadczalnych.

SOIL MOISTURE – METHODOLOGICAL ASPECT OF AGRICULTURAL RESEARCH

Summary

Water content in soil determines practically all its physical, biochemical and microbiological properties, but most of all, the availability of water for plants. There are few scientific articles in world literature that review the techniques for measuring soil moisture, and there are no extensive studies in this field in the domestic literature. Users of measurement devices or systems should be aware of the accuracy and selectivity of their chosen methods to avoid later misinterpretation of the results. The above postulate is all the more important as world literature does not explain whether the determined soil moisture includes only water contained in its abiotic part or also water contained in living organisms. Much of the plant-water interaction research is carried out through pot experiments. Serious difficulties in conducting such experiments are the issues of regulating and maintaining the assumed substrate moisture.

This study is aimed at solving three problems:

- systematizing the knowledge of soil moisture measurement methods and the possibility of their application in agricultural practice and experiments,
- verification of the hypothesis assuming that water contained in the roots of living plants may significantly change the results of soil moisture measurements,
- designing alternative systems of automatic irrigation of pots characterized by sufficient precision and accuracy for experimental purposes.

The analysis of the literature shows that despite the many techniques and a very wide range of available devices for measuring soil moisture, there are no economically viable solutions that could be widely used in field crop production. Therefore, it should be recognized that this is still an area of agricultural knowledge that has not been researched sufficiently by science.

So far, the interpretation of soil moisture measurement results did not take into account the fact that, apart from water retained in the soil by physical forces, certain amount of it is bound by living organisms. However, the present monograph shows that water contained in the roots of plants may, in the conditions of low soil moisture, constitute a large percentage – even several dozen percent of the total water contained in the soil. The problem arises from the fact that currently used measuring devices are not selective for water actively bound by living organisms.

One of the major problems with the implementation of research in vegetation pots is the lack of the possibility of automated regulation of the substrate moisture that meets the experimental requirements. The currently used methods may generate too much uncontrolled variability of the water factor - in literature, there is no information on their validation. The technical solutions presented in the present study allow for the design of an automatic pots irrigation system characterized by precision and accuracy at a level that is sufficient for it to be used for experimental purposes.