

**INSTYTUT MELIORACJI I UŻYTKÓW ZIELONYCH
W FALENTACH**

**WIELKOPOLSKO-POMORSKI OŚRODEK BADAWCZY
W BYDGOSZCZY**

Bogdan Bąk

**WSKAŹNIK STANDARYZOWANEGO OPADU *SPI*
JAKO KRYTERIUM OCENY SUSZY ROLNICZEJ
NA GLEBACH O RÓŻNEJ RETENCJI UŻYTECZNEJ**

Rozprawa doktorska

Promotor:

doc. dr hab. Leszek Łabędzki

Bydgoszcz 2006

Spis treści

1. Wstęp	4
1.1. Wprowadzenie	4
1.2. Cel pracy	7
1.3. Zakres przedmiotowy i problemowy pracy	7
1.4. Hipoteza pracy	8
1.5. Zarys metodyki rozwiązywania problemów pracy	8
2. Problem w świetle literatury	9
2.1. Rodzaje susz	9
2.2. Susza meteorologiczna	13
2.3. Wskaźniki suszy meteorologicznej	15
2.4. Susza glebowa	24
2.5. Wskaźniki suszy glebowej	25
2.6. Susza rolnicza	29
2.7. Wskaźniki suszy rolniczej	33
2.8. Związki między suszą meteorologiczną i suszą rolniczą	38
3. Warunki meteorologiczne i glebowe uprawy buraka cukrowego na Kujawach	45
3.1. Charakterystyka uprawy buraka cukrowego na Kujawach	45
3.2. Warunki klimatyczne Kujaw	47
3.3. Warunki glebowe na Kujawach	51
4. Materiał badawczy	53
4.1. Parametry meteorologiczne	53
4.2. Parametry roślinne	55
4.3. Parametry glebowo-wodne	58
5. Metodyka badań	61
5.1. Wskaźnik standaryzowanego opadu <i>SPI</i> (<i>Standardized Precipitation Index</i>)	61
5.2. Wskaźniki suszy rolniczej	63
5.3. Metoda obliczania ewapotranspiracji (<i>ET</i> i <i>ET_p</i>)	65

6. Wyniki i dyskusja.....	69
6.1. Opady i ewapotranspiracja.....	69
6.1.1. Zmienność opadów.....	69
6.1.2. Zmienność ewapotranspiracji.....	74
6.2. Wskaźnik standaryzowanego opadu <i>SPI</i> jako wskaźnik suszy meteorologicznej.....	86
6.3. Wskaźniki suszy rolniczej (<i>Crop Drought Index</i>): <i>CDI</i> i <i>CDI_w</i>	98
6.3.1. Wskaźnik suszy rolniczej <i>CDI</i>	98
6.3.2. Wskaźnik suszy rolniczej <i>CDI_w</i>	107
6.3.3. Związek między wskaźnikami <i>CDI</i> i <i>CDI_w</i>	114
6.4. Relacje między suszą meteorologiczną (<i>SPI</i>) i rolniczą (<i>CDI</i> i <i>CDI_w</i>).....	117
6.4.1 Relacja <i>SPI</i> – <i>CDI</i>	117
6.4.2. Relacja <i>SPI</i> – <i>CDI_w</i>	125
6.4.3. Przegląd wybranych susz na Kujawach w latach 1954 – 2003.....	130
6.5. <i>SPI</i> jako wskaźnik suszy rolniczej.....	135
7. Podsumowanie i wnioski.....	143
8. Literatura.....	150

1. WSTĘP

1.1 WPROWADZENIE

Susza (*drought*) jest normalną, powtarzającą się cechą klimatu. Występuje zarówno na obszarach z dużymi jak i małymi opadami. Jest czasową anomalią, odchyleniem od sytuacji normalnej, w przeciwieństwie do suchości (*aridity*), będącej stałą cechą klimatu występującego na obszarze o niskich opadach. Zjawisko jest konsekwencją naturalnego zmniejszenia opadów w pewnym okresie na danym obszarze, chociaż również inne czynniki meteorologiczne (wysoka temperatura i mała wilgotność powietrza, duża prędkość wiatru) mogą potęgować nasilenie zjawiska suszy. Susza jest zjawiskiem złożonym i trudnym do jednoznacznego określenia. Pojawia się okresowo i w różnych porach roku. Podstawowymi charakterystykami suszy są: intensywność, czas trwania i zasięg przestrzenny. Określenie rozmiaru, poznanie przyczyn i czynników wpływających na jej przebieg oraz skuteczność jej przewidywania mają istotne znaczenie w przeciwdziałaniu jej skutkom.

Spośród innych ekstremalnych zjawisk pogodowych, zjawisko suszy wyróżnia kilka cech. Susza narasta stopniowo, a jej efekty kumulują się w pewnym okresie i mogą jeszcze ujawniać się po jej zakończeniu. Wyznaczenie początku i końca suszy oraz jej intensywności utrudnia brak ścisłej, uniwersalnej i powszechnie akceptowanej definicji suszy. Często zasięg przestrzenny suszy jest znacznie większy niż innych niekorzystnych zjawisk (powodzi, burz, huraganów), przez co ocena ilościowa jej skutków i przeciwdziałanie jest trudniejsza. Według oceny wielu specjalistów problem pustynnienia i występowania susz jest problemem o zasięgu globalnym i wymaga skonsolidowania wysiłków różnych agend międzynarodowych i ośrodków naukowych w celu dokładniejszego rozpoznawania narastania zjawiska i odpowiedniego przeciwdziałania. O ogólnoglobalnej randze problemu świadczy proklamowanie przez Zgromadzenie Ogólne NZ w 1994 roku (rezolucja 49/115) Światowego Dnia Walki z Pustynnieniem Gleby i Suszą, który przypada 17 czerwca [GENERAL ASSEMBLY UN, 1994] oraz "Konwencja Narodów Zjednoczonych dotycząca zwalczania pustynnienia i zjawisk posusznych (United Nations Convention to Combat Desertification and Drought – UNCCD)". Weszła ona w życie 26 grudnia 1996 r. po ratyfikacji przez 50-tego sygnatariusza. W maju 2000 r. na spotkaniu stron Konwencji w Brukseli został przygotowany staraniem krajów Europy Centralnej i Wschodniej Regionalny Załącznik Realizacyjny dla

Europy Centralnej i Wschodniej, uwzględniający specyfikę tego regionu, a ostateczny kształt Załącznik ten nabrał w grudniu 2000 r. podczas czwartej sesji Konferencji Stron Konwencji.

Letnia susza w zachodniej i częściowo w środkowej Europie w 2003 roku przypomniała społecznościom, że zjawisko to dotyka nie tylko krajów Afryki i Azji, lecz może pojawić się w innych regionach świata. Przeciwdziałanie, zapobieganie i łagodzenie skutków suszy to podstawowe zadania stojące nie tylko przed uczonymi, ale także przed politykami, instytucjami rządowymi i samorządowymi. W wielu krajach już przyjęto rządowe (stanowe, regionalne) strategie na wypadek pojawienia się suszy [DROUGHT PLANNING...; ROSSI, 2000; LOMAS, 2000; VRÂNCEANU, CANARCHE, CÂRSTEA, 2000]; w innych trwają przygotowania do przyjęcia odpowiednich uwarunkowań prawnych. Zagadnieniom suszy i związanych z nią problemom dostępu do wody poświęcono też sporo uwagi na 3-cim Światowym Forum Wody w Kioto w 2003 roku [WWF].

W krajach wysoce rozwiniętych dąży się do zintegrowanych badań nad suszą, wykorzystując do tego rozwinięte sieci pomiarowe oraz techniki radarowe i satelitarne. Pozwala to na ciągły monitoring różnych rodzajów suszy, na bieżącą ocenę stopnia intensywności i zasięgu zjawiska. Ale w wielu regionach zjawisko suszy wciąż ocenia się jeszcze głównie pod kątem suszy meteorologicznej. Czyni się to korzystając z bieżących i wieloletnich obserwacji podstawowych elementów meteorologicznych, głównie opadów i temperatury, przyjmując różne klasyfikacje intensywności suszy.

Przedmiotem wielu badań są skutki, jakie wywołuje susza meteorologiczna w glebie i na uprawach rolniczych. Brak dostatecznych opadów powoduje wystąpienie niedoboru wody glebowej dla danej rośliny, co prowadzi do obniżenia ewapotranspiracji i spadku plonów roślin uprawnych. Rośliny, w zależności od fazy wegetacji, wykształcenia systemu korzeniowego i rodzaju gleby, na których są uprawiane, a także i innych czynników środowiskowych, różnie mogą znosić stres wywołany niedoborem wody.

Związek między suszą meteorologiczną a rolniczą może być wyrażony w formie opisu wizualnych obserwacji stanu warstwy wierzchniej gleby, ale bardziej praktycznym sposobem jest obliczanie wartości odpowiednich wskaźników kwantyfikujących obie susze. Związki, między tak wyznaczonymi wartościami, mogą być następnie przedmiotem analiz za pomocą narzędzi statystycznych.

Na podstawie wartości wskaźników można dokonać oceny wartościującej (ewaluacji) zjawiska, wprowadzając odpowiednią klasyfikację. Klasy suszy określające jej intensywność są wyznaczane na podstawie kryteriów określanych np. w oparciu o częstości pojawiania

wartości wskaźnika lub prawdopodobieństwa wystąpienia danej wartości wskaźnika wraz z wartościami wyższymi lub niższymi.

W mnogości występujących w literaturze wskaźników, coraz częściej pojawia się wskaźnik standaryzowanego opadu *SPI* (*Standardized Precipitation Index*) jako wskaźnik suszy meteorologicznej [MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993, 1995; HOW TO WORK..., 1998; NDMC, 2004]. Jego użyteczność szczególnie uwidacznia się przy przestrzennym analizowaniu okresów zarówno niedoboru, jak i nadmiaru opadów. Normalizacja i standaryzacja ciągów pomiarowych opadu umożliwia obiektywną i porównywalną ocenę suszy meteorologicznej w różnych warunkach klimatycznych i przedziałach czasowych.

Przy analizowaniu okresów suszy meteorologicznej, często nasuwa się pytanie o skutki, jakie wywołuje ona w glebie i dla upraw rolniczych. Rośliny, w zależności od fazy wegetacji, wykształcenia systemu korzeniowego, rodzaju gleby, na których są uprawiane i innych czynników środowiskowych różnie mogą znosić stres wywołany niedoborem wody.

W rolnictwie przez suszę rozumie się niedobór wody w glebie, niekorzystnie wpływający na wzrost, rozwój i plonowanie roślin, w odniesieniu do miejsca (gleby), czasu (fazy fenologicznej, okresy krytyczne, okres wegetacji) i rośliny. Ujemne skutki suszy wyrażają się spadkiem wielkości i jakości plonu.

Można wyróżnić następujące parametry określające suszę rolniczą:

- stan uwilgotnienia gleby (wilgotność gleby, zapas wody glebowej),
- stan dostępności wody glebowej dla roślin (potencjał wody glebowej),
- ewapotranspiracja i jej redukcja w wyniku suszy glebowej,
- plon i jego redukcja w wyniku suszy glebowej.

Dwa pierwsze parametry określają suszę glebową, dwa kolejne parametry opisują skutki suszy glebowej. Ostatecznym skutkiem suszy rolniczej jest redukcja plonu, która jest ściśle związana z redukcją ewapotranspiracji.

Kwantyfikację suszy rolniczej można przeprowadzić na podstawie wskaźników odnoszących się do wilgotności gleby lub potencjału wody w glebie, na której uprawiana jest konkretna roślina, do ewapotranspiracji bądź do plonu końcowego. Takimi wskaźnikami są na przykład redukcja ewapotranspiracji (w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej lub średniej) lub redukcja plonu (w stosunku do plonu potencjalnego, maksymalnego, średniego).

Na podstawie praw fizyki wody glebowej i fizjologii roślin, jak również bogatego materiału doświadczalnego przyjmuje się, że ewapotranspiracja w przedziale wilgotności obejmującym stany dostatecznego zaopatrzenia w wodę (lub w warunkach nieograniczonej

dostępności wody) nie zależy lub w niewielkim stopniu zależy od wilgotności gleby [BRANDYK, 1990; FEDDES, KOWALIK, ZARADNY, 1978; KOROHODA, 1985; REWUT, 1980; SALISBURY, ROSS, 1975; WIĘCKOWSKI, 1985]. Ewapotranspirację rzeczywistą w tych stanach uwilgotnienia gleby określa się mianem ewapotranspiracji potencjalnej ET_p w danych, rzeczywistych warunkach meteorologicznych. Zależy ona od fazy rozwojowej i masy nadziemnej roślin. Jest to ilość wody zużywana przez rośliny w określonym stanie rozwoju, na wydanie określonego plonu, nawożonych na określonym poziomie, w danych warunkach klimatyczno-glebowo-siedliskowych, kiedy ewapotranspiracja nie jest ograniczana wilgotnością gleby i stanem pokrywy roślinnej. Ewapotranspiracja zależy wówczas tylko od warunków atmosferycznych. Warunki wzrostu roślin ogranicza się do warunków dobrego rozwoju i dobrego zaopatrzenia w składniki pokarmowe. Przy niedostatecznych opadach następuje zmniejszanie wilgotności gleby i powstaje susza glebowa. Powoduje to zmniejszanie ewapotranspiracji. Można wobec tego przyjąć, że jest ono oznaką suszy rolniczej i pokazuje jej intensywność.

Przegląd literatury pokazał, że na świecie stosuje się wymienione wskaźniki przede wszystkim do osobnych analiz obu rodzajów susz [BOKEN, CRACKNELL, HEATCOTE, 2005; MARACCHI, 2000; NDMC, 2005], brak jest natomiast szczegółowych badań nad relacjami zachodzącymi między nimi.

1.2. CEL PRACY

Celem naukowym pracy jest ustalenie relacji między suszą meteorologiczną, opisaną wskaźnikiem *SPI* a suszą rolniczą skwantyfikowaną wielkością redukcji ewapotranspiracji w warunkach niedostatecznego uwilgotnienia gleby. Celem jest również zbadanie zmienności czasowej tych wskaźników oraz analiza przebiegu suszy rolniczej na tle suszy meteorologicznej i wyjaśnienie ich związku. Celem ostatecznym jest odpowiedź na pytanie o reprezentatywność wskaźnika suszy meteorologicznej *SPI* w odniesieniu do suszy rolniczej.

Praktycznym celem pracy jest opracowanie metody oceny intensywności suszy rolniczej z wykorzystaniem wskaźnika *SPI* na podstawie pomiarów opadów mierzonych na standardowych bądź automatycznych stacjach.

1.3. ZAKRES PRZEDMIOTOWY I PROBLEMOWY PRACY

Przedmiotem pracy jest wskaźnik standaryzowanego opadu *SPI* kwantyfikujący suszę meteorologiczną oraz dwa wskaźniki suszy rolniczej na glebach o różnej retencji użytecznej w warunkach uprawy buraka cukrowego na Kujawach. Jako wskaźniki suszy rolniczej przyjęto wielkość redukcji ewapotranspiracji spowodowanej niedoborem w glebie, w odniesieniu do ewapotranspiracji potencjalnej (wskaźnik *CDI* – *Crop Drought Index*) oraz w odniesieniu do ewapotranspiracji średniej w wieloleciu (wskaźnik *CDI_w*).

Problemami pracy są pytania:

- 1) o zmienność wskaźników *SPI* oraz *CDI* i *CDI_w*,
- 2) o związki między tymi wskaźnikami,
- 3) czy wskaźnik *SPI* opisuje i kwantyfikuje suszę rolniczą?

1.4. HIPOTEZA PRACY

Zakłada się, że wskaźnik *SPI* opisuje i kwantyfikuje suszę rolniczą w powiązaniu go z właściwościami retencyjnymi gleby i badanym okresem, zwłaszcza z fazami fenologicznymi roślin.

W pracy przyjęto hipotezę, że w warunkach dużej zmienności czasowej czynników meteorologicznych, przy oczekiwanym braku jednoznacznego i prostego związku między suszą meteorologiczną i rolniczą, istnieje potrzeba i możliwość modyfikacji *SPI* w kierunku jego zastosowania do diagnozowania i klasyfikacji suszy rolniczej. Modyfikacja ta polega na ustaleniu wartości *SPI* dla określonych klas suszy rolniczej kwantyfikowanej wskaźnikami *CDI_w* i *CDI* w odniesieniu do rodzajów gleb (ich zdolności retencyjnych) i okresów związanych z fazami fenologicznymi.

1.5. ZARYS METODYKI ROZWIĄZYWANIA PROBLEMÓW PRACY

Cel pracy zrealizowano w oparciu o obliczenia i analizę wymienionych wskaźników suszy w okresach obejmujących kolejne fazy fenologiczne i w całym okresie wegetacji buraka cukrowego w okresie 50-letnim (lata 1954-2003), z wykorzystaniem elementów meteorologicznych pomierzonych na stacji Bydgoszcz-IMUZ w tym okresie.

Badania zmienności wskaźnika *SPI* przeprowadzono dla ciągów sum opadów w okresie od początku okresu wegetacji buraka cukrowego do końca badanej fazy fenologicznej lub do końca okresu wegetacyjnego w roku bieżącym.

Wskaźniki suszy rolniczej były badane w tych samych okresach, na 4 glebach występujących na Kujawach o zróżnicowanych zapasach wody użytecznej, wynoszących w 1-metrowym profilu glebowym 103, 137, 165 i 203 mm.

W pracy zastosowano dwa narzędzia badawcze: modelowanie matematyczne i analizę statystyczną. Podstawą wnioskowania przeprowadzonego w pracy była analiza wyników uzyskanych przy użyciu tych narzędzi.

2. PROBLEM W ŚWIECIE LITERATURY

2.1. RODZAJE SUSZ

W literaturze najczęściej spotyka się następujący podział susz [BOKEN, CRACKNELL, HEATCOTE, 2005; BYCZKOWSKI, MEYER, 1999; HOW TO WORK ..., 1998;; NDMC, 2005]:

- susza meteorologiczna (klimatyczna, atmosferyczna),
- susza glebowa,
- susza rolnicza (agrometeorologiczna),
- susza hydrologiczna.

W krajach wysoce uprzemysłowionych, funkcjonuje także pojęcie suszy społeczno-ekonomicznej (*socioeconomic drought*) [BOKEN, CRACKNELL, HEATCOTE, 2005; MARACCHI, 2000].

Susza meteorologiczna jest najczęściej definiowana na podstawie stopnia suchości w stosunku do średniej sumy opadów w wieloletnim i średniego czasu jej trwania. Pojęcie suszy meteorologicznej jest niejednoznacznie rozumiane w różnych regionach klimatycznych, w odmiennych środowiskach zasobów wodnych i przez samych użytkowników. Na przykład w wielu częściach Arabii Saudyjskiej, gdzie średnia roczna suma opadów nie przekracza 100 mm, za suszę przyjmuje się dopiero 2-3 letni okres bezopadowy. Na wyspie Bali, na Morzu Jawajskim, okres ten trwa tylko jeden tydzień [BYCZKOWSKI, MEYER, 2001]. W Polsce susze meteorologiczne pojawiają się rzadko, nieregularnie i trwają przeważnie kilka miesięcy. Częściej natomiast występują okresy posuszne, trwające maksymalnie kilkadziesiąt dni i związane z dużą zmiennością opadów [MAGER i in., 1999].

Do oceny suszy meteorologicznej wykorzystuje się codzienne pomiary elementów meteorologicznych takich jak opady, temperatura, wilgotność powietrza, prędkość wiatru, ciśnienie i ewapotranspirację.

Susza glebowa jest następstwem suszy meteorologicznej. W czasie jej trwania znacząco spada wilgotność gleby, następuje obniżenie poziomu wód gruntowych, a w szczególnych przypadkach może nastąpić przesuszenie warstw gleby nawet do znacznych głębokości.

Istnieje ścisły związek między warunkami atmosferycznymi (susza meteorologiczna), a warunkami rozwoju roślin. Wyczerpanie zapasów wody łatwo dostępnej w glebie, redukcja ewapotranspiracji, więdnienie lub słaby rozwój roślin i spadek plonu, to najważniejsze objawy suszy rolniczej (agrometeorologicznej). Do jej oceny niezbędne są dane dotyczące właściwości fizyczno-wodnych gleby i zdolności retencjonowania wody, znajomość potrzeb wodnych konkretnych upraw, średnich wieloletnich wielkości uzyskiwanych plonów w danym regionie na różnych glebach.

Susza hydrologiczna, niekiedy nazywana suszą zasobów wodnych (wód powierzchniowych i wód podziemnych), jest wynikiem utrzymywania się długotrwałej suszy meteorologicznej. Ten rodzaj suszy może być niekiedy dodatkowo pogłębiony niewłaściwą gospodarką wodną. Susza hydrologiczna objawia się wyraźnym zmniejszeniem przepływu wody w ciekach, niskimi stanami wody w rzekach i zbiornikach wodnych. O ile susza meteorologiczna i glebowa mogą być całkowicie lub częściowo zlikwidowane w krótkim okresie czasu (dekada, miesiąc), o tyle susza hydrologiczna jest zjawiskiem bardziej długotrwałym i trudnym do odwrócenia, a jej oddziaływanie uwidocznia się bardzo często jeszcze w następnym sezonie hydrologicznym. Do jej oceny potrzebne są dane dotyczące zasobów i niedoborów wodnych w zlewni, które są jednocześnie elementami składowymi równania bilansu wodnego zlewni. Są nimi: opad atmosferyczny, parowanie terenowe, wielkość odpływu, zmiany zapasu wody zgromadzonej w pokrywie śnieżnej, zmiany retencji w strefie aeracji, zmiany retencji w strefie saturacji w badanym obszarze i w okresie bilansowania.

Pojęcie suszy społeczno-ekonomicznej wiąże się z zagadnieniem ograniczeń lub niemożnością dostaw określonych dóbr ekonomicznych z powodu wystąpienia suszy meteorologicznej, rolniczej i hydrologicznej. Przede wszystkim dotyczy to dostaw żywności, ziarna, paszy a także energii elektrycznej uzyskiwanej w hydroelektrowniach i elektrowniach atomowych. Susza społeczno-ekonomiczna powstaje, kiedy popyt na wodę dla działalności ekonomicznej daleko przewyższa możliwości jej dostarczenia, a ograniczenia te spowodowane są występowaniem pozostałych rodzajów suszy. Im większa jest różnica między zapotrzebowaniem na wodę, a możliwością jej dostarczenia, tym większa jest intensywność suszy społeczno-ekonomicznej. Popyt na ekonomiczne dobra powiększa się w

wyniku wzrostu populacji i rozwoju gospodarczego. Zapasy żywności można powiększyć poprzez podniesie wydajności produkcji rolniczej, zmianę technologii upraw oraz przez budowę odpowiednich elewatorów i magazynów. Ograniczenie produkcji prądu wymusza poszukiwania alternatywnych źródeł energii, które spowodują wzrost cen elektryczności. Do oceny suszy społeczno-ekonomicznej potrzeba między innymi danych dotyczących zmian populacji ludności, zwierząt, źródeł wody i sposobów jej dostarczania, konsumpcji wody do celów spożywczych i przemysłowych, jakości wody [ONRG, 2004].

W czasie długich okresów bezopadowych mogą pojawić się jednocześnie wszystkie rodzaje suszy. Taką była susza, która utrzymywała się wiosną i latem nad zachodnią Europą i północną Afryką w 2003 r. Czołówki wielu dzienników bardzo dramatycznie przedstawiały skutki suszy [JRC, 2004]:

“The warmest summer since begin of registration” (DWD 27.08.2003),

“Reduction in EU fodder production by more than 10%” (COPA/COGECA 10.10.2003),

“Economic losses of approx. € 20 billions”, “Heat wave in Europe claimed more than 20000 lives” (MunichRe, 29.12.2003),

“2003 was by far the hottest summer” (Science, Vol. 303, Issue 5663, 1499-1503, 5.03.2004),

“12 Million ton reduction, corresponding to 5.1 %, in inland water transport in 2003 compared to 2002 in Germany” (Federal Statistical Office Germany, 27.07.2004),

“Reduction of energy production in German and French power due to lack of cooling water” (SZ, 11.08.2003).

Z pojęciem suszy społeczno-ekonomicznej i jej wpływem na społeczeństwo często kojarzone są terminy *vulnerable* i *vulnerability*. W języku polskim słowa te oznaczają odpowiednio *wrażliwy*, *podatny* oraz *wrażliwość*, *podatność (na coś)*. Słowo *podatność* wywodzi się od łacińskiego słowa *vulnerare* (zranić), co oznacza wrażliwość do bycia zranionym, naruszonym [KATES za WILHELMI, WILHITE, 2002]. Istnieje wiele czynników, które powodują, że owa *wrażliwość* na suszę może mieć różne oblicza. Dla niektórych społeczności okres suszy (generalnie dotyczy to wszelkich ekstremalnych zjawisk pogodowych) to czas sprawnego przeciwdziałania i podejmowania różnorodnych przedsięwzięć łagodzących skutki suszy, a dla innych to okres bezradności, głodu, chorób i często wysokiej śmiertelności. Wrażliwość na suszę jest dokładnie skorelowana z ludzką infrastrukturą i warunkami społeczno-ekonomicznymi. Z reguły, biedne społeczeństwa bardziej odczuwają skutki suszy niż bogate. W krajach rozwijających się, podatność na suszę odnosi się do

groźby zagrożenia egzystencji ludzkiej i wyginięcia zwierząt. W gospodarkach rozwiniętych, susza oznacza znaczące straty ekonomiczne, które wpływają na ograniczenie dostępu do wielu dóbr i na koszty utrzymania obywateli.

Wrażliwość zależy od stale zmieniających się technologii, od zachowania się i od stopnia zorganizowania się społeczeństw. DOWNING i BAKKER [2000] oraz WILHITE [za WILHELM, WILHITE, 2002] twierdzą, że serie kolejnych susz mogą zmienić wrażliwość społeczeństwa od stanu bezradności i chaosu do stanu pełnego bezpieczeństwa. DOWNING i BAKKER [2000] twierdzą też, że to nie częstość i intensywność anomalii pogodowych wywołujących suszę, lecz wrażliwość na jej skutki stanowi główne ryzyko. Żeby złagodzić skutki suszy, przede wszystkim należy obniżyć tak rozumianą wrażliwość społeczeństwa. Autorzy uważają, że więcej wysiłku zostało włożone na przewidywanie i monitorowanie warunków klimatycznych, hydrologicznych i biologicznych, niż na badania podatności społeczeństw na skutki zjawisk.

BYCZKOWSKI i MEYER [2001] przytaczają definicję suszy podaną przez OGALLO [1999]: *Suszę można rozumieć jako szczególną sytuację, kiedy zapotrzebowanie na wodę przez dowolny system (szczególnie przez rolnictwo) znacznie przewyższa zdolności dostarczenia jej z naturalnych źródeł na danym obszarze.*

W tej zwięzłej definicji autor nie podaje związków przyczynowo-skutkowych suszy, lecz odnosi się do możliwości zaspokojenia potrzeb wodnych w danym środowisku. Można więc zauważyć, że jest to wyraźne odejście od poszukiwania przyczyny powstawania suszy tylko w niekorzystnych warunkach atmosferycznych. W myśl tej definicji, na przykład okres nadmiernej konsumpcji wody w stosunku do możliwości technicznych dostarczenia jej do wielkich aglomeracji lub dużych ośrodków przemysłowych, może być również uznawany za okres suszy niemeteorologicznej.

Niezmiennie istotne jest ustalenie kryteriów suszy w dostosowaniu do przyjętej definicji, która powinna uwzględniać rodzaj suszy i zakres jej skutków. WILHITE i GLANTZ [1985] poddali analizie ponad 150 definicji suszy stwierdzając, że wiele z nich definiuje to zjawisko nieadekwatnie do specyficznych oddziaływań. W większości przypadków kryteria wyznaczenia suszy są przyjmowane arbitralnie, bez związku z jej skutkami w różnych elementach środowiska i kierunkach aktywności człowieka [WILHITE, HAYES, SVOBODA, 2000].

Im bardziej złożone są kryteria wyznaczania okresu trwania suszy, tym więcej potrzeba różnorodnych danych. Oprócz podstawowych danych meteorologicznych (codziennych,

dekadowych, miesięcznych, okresu wegetacji itd.) należy uwzględnić inne dane (np. dane hydrologiczne, pomiary wielkości ewapotranspiracji, pomiary wilgotności gleby, informacje dotyczące wielkości zbiorów w wieloleciu itp.). Klimatologiczna charakterystyka regionu dostarcza tylko podstawowych informacji, która dają wstępną ocenę wrażliwości obszaru na pojawianie się suszy.

2.2. SUSZA METEOROLOGICZNA

Problem braku jednoznacznej definicji suszy pojawia się już przy analizowaniu suszy meteorologicznej. W literaturze anglojęzycznej najczęściej używanym terminem jest *drought*, rzadziej *dry spells*, co oznacza okres bezopadowy (suchy). W literaturze polskiej występują zarówno słowa *susza*, *posucha*, jak i *okres posuszny*. Wszystkie te pojęcia odnoszą się do okresu niedostatecznych opadów lub ich braku. W uproszczeniu można przyjąć, że są to pojęcia tożsame, chociaż szczegółowa metodyka wyróżniania ich w badanym okresie jest różna.

Jednym ze sposobów oceny suszy meteorologicznej jest wyznaczanie okresów posusznych. Szeroki przegląd sposobów określania tych charakterystycznych okresów suszy meteorologicznej przedstawia MARACCI [2000], a jako kryterium przyjęto ilość dni bezopadowych lub z niewielkimi opadami. Według autora, w USA, już na początku XX wieku za początek suszy meteorologicznej przyjmowano 10 dniowy okres z opadami nieprzekraczającymi 5 mm. W następnych dziesięcioleciach kryteria suszy meteorologicznej ulegały modyfikacjom, a w latach 30-tych wprowadzono pierwsze wskaźniki suszy oparte na względnym odchyleniu od wartości średniej, czyli procentowym stosunku zmierzonej ilości opadu do wartości średniej wieloletniej.

W polskiej literaturze, zwłaszcza w latach 60, 70 i 80-tych, problem zdefiniowania okresu posuszego był istotnym zagadnieniem oceny susz w Polsce [BAC, KOŹMIŃSKI, ROJEK, 1993; CZAPLAK, 1996; KASPERSKA-WOŁOWICZ, ŁABĘDZKI, BĄK, 2003; KONOPKO, 1988; KOŹMIŃSKI, 1986; SCHMUCK, 1969;]. Posuchy atmosferyczne, spośród zjawisk atmosferycznych szkodliwych dla rolnictwa, wyrządzają największe szkody. Są one niebezpieczne zwłaszcza, gdy występują w okresach krytycznych pod względem zapotrzebowania roślin uprawnych na wodę. W klimatycznych warunkach Polski wyróżnia się trzy okresy o zwiększonej częstotliwości występowania posuch atmosferycznych:

- wczesnowiosenny (na przełomie marca i kwietnia),

- późnowiosenny (na przełomie maja i czerwca),
- jesienny (na przełomie września i października).

Posucha trwająca dłużej niż 15 dni z reguły hamuje rozwój roślin uprawnych lub powoduje zmniejszenie ich plonu. Czasowy rozkład częstości pojawienia się posuchy jest charakterystyczny dla każdego regionu [KOŹMIŃSKI za BAC, 1982].

Jednym z kryteriów oceny intensywności posuchy atmosferycznej jest metoda ciągów dni bezopadowych, według której wyróżnia się posuchę (9-17 dni bez opadu), umiarkowaną posuchę (18-28 dni) oraz długotrwałą posuchę (ponad 28 dni) [SCHMUCK, 1969]. Autor przyjął, że w ciągu 9-dniowego okresu bezopadowego nie występują jeszcze szkody w uprawach. Okres posuchy kończy się w dniu z opadem równym lub większym od 1 mm lub kiedy w dwa kolejne dni łączna suma opadów jest równa lub większa od 1 mm. Z badań KOŹMIŃSKIEGO [1986] wynika, że okresy bezopadowe, trwające ponad 15 dni, w czasie największego zapotrzebowania na wodę z reguły powodowały u większości roślin uprawnych zmniejszenie plonu poniżej średniej wartości wieloletniej.

Metoda wyznaczania okresów bezdeszczowych umożliwia ustalenie początku, końca i czasu trwania każdej posuchy, lecz nie uwzględnia warunków wilgotności gleby w okresie poprzedzającym posuchę oraz zjawiska parowania. Niedoskonałością tej metody jest brak oceny intensywności suszy i brak jednoznacznej definicji, ile dni bez opadu może powodować szkody lub zahamowanie wzrostu roślin uprawnych. KOŹMIŃSKI [1983] przyjął, że w okresie wegetacyjnym dzień z opadem równym lub większym od 1,5 mm lub dwa kolejne dni o łącznej sumie równej i większej od 1,5 mm przerywają ciąg bezopadowy trwający 11-15 dni, a dzień z opadem równym i większym od 2 mm lub dwa kolejne dni opadem równym i większym od 2 mm przerywają okres bezopadowy trwający dłużej niż 15 dni.

Według KONOPKO [1988] okres posuszny to okres, w którym występują dni bez opadu atmosferycznego lub z opadem bardzo niskim nieprzekraczającym 0,5 mm na dobę. Wydzieliła ona okresy posuszne trwające 10-20 dni, 20-30 dni i ponad 30 dni oraz przyjęła, że dzień (lub dwa kolejne dni), w którym suma opadów wyniesie 5 mm kończy posuchę, ponieważ opad ten jest wystarczający do zwilżenia rośliny i górnej warstwy gleby oraz zmniejszy niedosyt wilgotności powietrza nad łanem roślinnym w ciągu jednego lub dwóch kolejnych dni.

CZAPLAK [1996] wydzieliła ciągi bezopadowe trwające dłużej niż 15 dni w ciągu całego roku i dłużej niż 15 dni w okresie wegetacyjnym oraz przyjęła, że ciąg bezopadowy nie przerywa pojedynczy lub dwa kolejne dni z opadem mniejszym od 1 mm, natomiast

przerywają go trzy kolejne dni z opadem (nawet z opadem śladowym - mniejszym od 0,05 mm). Kolejną modyfikację zastosowali KASPERSKA-WOŁOWICZ, ŁABĘDZKI i BĄK [2003], na podstawie założeń opracowanych przez KOŹMIŃSKIEGO [1983]. Za okres posuszny przyjęli taki, który rozpoczyna się dniem bez opadu atmosferycznego, a w trakcie jego trwania występują dni bez opadów lub pojedyncze dni z opadem nieprzekraczającym 1,5 mm na dobę. Wydzielając okresy posuszne trwające 11-15 dni, 16-20 dni i ponad 20 dni przyjmuje się, że dzień lub dwa kolejne dni, w których suma opadu przekroczy 1,5 mm przerywają okres posuszny trwający 11-15 dni, zaś dzień lub dwa kolejne dni, w których suma opadu przekroczy 2 mm przerywają okres posuszny trwający dłużej niż 15 dni.

Według SCHMUCKA [1969] najbardziej narażony na posuchę jest pas środkowej, nizinnej części Polski, gdzie średnia roczna różnica parowania i opadów ($E-P$) wynosi 200-300 mm, a po uwzględnieniu opadu atmosferycznego, skorygowanego na podstawie współczynników CHOMICZA [1976], różnica ta w półroczu letnim w tym regionie wynosi 50-100 mm [ŁYKOWSKI, 1986]. Regionami najbardziej deficytowymi pod względem opadów atmosferycznych w Polsce są Nizina Wielkopolska i Kujawy. W tych regionach roczne sumy opadów nie przekraczają 550 mm, a lokalnie nawet 500 mm. W najbardziej suchych latach na Kujawach opady w ciągu roku wynoszą około 300 mm [WOŚ, 1994].

Wadą takiego sposobu określania suszy meteorologicznej jest niejednoznaczność określania ciągów dni bezopadowych, bo wybór kryterium zależy od założenia przyjętego przez autora i celu jego badań. Metoda ta nie uwzględnia również skutków, jakie wywołuje okres bezopadowy. Faktem bezspornym jest, że stanowi on istotne zagrożenie dla roślin płytko korzeniących i w szczególnych przypadkach może doprowadzić do znacznej redukcji plonów. Bez względu jednak na sposób ustalania kryteriów wydzielania okresów posusznych, umożliwiają one określenie liczby dni bez opadu lub z opadem śladowym i ich częstość w okresie wegetacyjnym roślin lub w całym roku.

2.3. WSKAŹNIKI SUSZY METEOROLOGICZNEJ

Bardziej praktycznym sposobem oceny suszy jest korzystanie ze wskaźników. Generalnie, co wynika z definicji, są to wielkości niemianowane, chociaż w niektórych pracach autorzy posługują się wielkościami mianowanymi np. za wskaźnik przyjmują czas trwania suszy (posuchy, okresu posusznego) wyrażony ilością dni. Również często za wskaźnik mianowany

przyjmuje się sumę opadów w danym okresie lub absolutne odchylenie od wartości średniej, będące różnicą między zmierzonym opadem i wartością średnią wieloletnią.

W literaturze można znaleźć wiele wskaźników suszy [BOKEN, CRACKNELL, HEATCOTE, 2005; BYCZKOWSKI, MEYER, 1999, 2001; GUTTMAN, 1998; HOW TO WORK ..., 1998; MARACCHI, 2000]. Opis i metodykę obliczeń najczęściej stosowanych na świecie wskaźników suszy meteorologicznej, a także glebowej i rolniczej można odnaleźć na stronach internetowych Narodowego Centrum Zapobiegania Suszy (USA) [NDMC, 2005]. Większość z nich została stworzona w drugiej połowie XX wieku, co ma związek z doskonaleniem technik pomiarowych, unifikacją metod pomiarowych, dostępnością do baz danych.

Najprostsze, niemianowane wskaźniki suszy meteorologicznej są obliczane na podstawie pomierzonych sum opadów. Najczęściej jest to względne odchylenie od wartości średniej, zwane też wskaźnikiem względnego opadu (procentowy stosunek zmierzonej ilości opadu do wartości średniej wieloletniej,) prawdopodobieństwo nieprzekroczenia zmierzonej ilości opadu, oznaczające, że zmierzony opad występuje wraz z mniejszym z podanym prawdopodobieństwem czy wskaźnik standaryzowanego opadu *SPI*. Bardziej skomplikowane wskaźniki uwzględniają szereg innych czynników, wpływających na intensywność suszy i są obliczane na przykład na podstawie:

- opadu i temperatury powietrza (np. wskaźnik Sielianinowa, wskaźnik suchości De Martonne),
- opadu i ewapotranspiracji wskaźnikowej (np. klimatyczny bilans wodny, wskaźnik Stenza),
- opadu, ewapotranspiracji roślin i zapasów wody glebowej (np. wskaźnik Palmera *PDSI*),
- opadu, ewapotranspiracji roślin, zapasów wody glebowej i głębokości wody gruntowej (np. wskaźnik Palfai'a).

Prostym i często spotykanym w literaturze oraz na stronach internetowych jest wskaźnik względnego opadu *RPI* (*Relative Precipitation Index*) [BAK, ŁABĘDZKI, 2002; BYCZKOWSKI, MEYER, 1999]. W literaturze amerykańskiej jest on znany jako *Percent of Normal* [NDMC, 2005]. Wskaźnik ten jest wyrażonym w procentach stosunkiem sumy opadu P w danym okresie do wartości średniej wieloletniej $\bar{P}$ w tym samym okresie:

$$RPI = \frac{P}{\bar{P}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Wskaźnik jest on stosowany w analizach meteorologicznych, agrometeorologicznych i zagadnieniach wodno-melioracyjnych do oceny nadmiaru bądź niedoboru opadu. W literaturze polskiej najczęściej cytowana jest klasyfikacja Kaczorowskiej [KACZOROWSKA, 1962; TOMASZEWSKA, 1994], która zaproponowała ocenę warunków wilgotnościowych w stosunku do miesięcznej sumy opadów i do rocznej (wielomiesięcznej) sumy opadów. Wyróżniła ona 7 klas sum opadowych, a w odniesieniu do opadów mniejszych od wartości średniej – trzy klasy (tab. 2.1). Wskaźnik ten nie nadaje się do porównań oceny suszy w różnych środowiskach opadowych, gdyż odnosi opad do wartości średniej. Powinno się więc nim porównywać jednorodne ciągi opadowe, o podobnych wartościach średnich. Przy dużym zróżnicowaniu średnich wielkości opadów (np. 500 mm i 1000 mm) i tej samej wartości *RPI* (np. 50%), ocenę niedoboru opadów można dokonać dopiero w odniesieniu do skutków suszy.

Tabela 2.1. Klasy suszy według wskaźnika względnego opadu *RPI* według Kaczorowskiej [KACZOROWSKA, 1962; TOMASZEWSKA, 1994]

Rodzaj okresu	Symbol	<i>RPI</i> w	
		miesiącu	roku, kwartale
Skrajnie suchy	<i>ss</i>	0 ÷ 24,9%	0 ÷ 49,9%
Bardzo suchy	<i>bs</i>	25,0 ÷ 49,9%	50,0 ÷ 74,9%
Suchy	<i>s</i>	50,0 ÷ 74,9%	75,0 ÷ 89,9%
Przeciętny	<i>p</i>	75,0 ÷ 125,9%	90,0 ÷ 110,9%

W oparciu o średnie sumy opadów przy różnym prawdopodobieństwie nieprzekroczenia Marcilonek [1980] wydzielił trzy okresy stopnia suchości (tab. 2.2) [MARCILONEK, KOSTRZEWA, PŁYWACZYK, 1980]. Prawdopodobieństwo nieprzekroczenia (dystrybuanta) $F(x_o) = p(x \leq x_o)$ określonej sumy opadów x_o oznacza, że zmierzony opad wraz z mniejszymi występuje z podanym prawdopodobieństwem p . Prawdopodobieństwo to określa częstotliwość pojawiania się takich opadów. Mniejsze prawdopodobieństwo nieprzekroczenia i odpowiadający mu opad charakteryzuje bardziej suchy okres (bardziej intensywną suszę).

Tabela 2.2. Klasy suszy według prawdopodobieństwa nieprzekroczenia p
[MARCILONEK, KOSTRZEWA, PŁYWACZYK, 1980]

Rodzaj okresu	Symbol	p
Suchy	s	$< 0,2$
Średnio suchy	$śs$	$0,2 \div 0,4$
Normalny	n	$0,4 \div 0,6$

Bardziej złożonym sposobem oceny suszy meteorologicznej jest obliczenie wskaźnika klimatycznego bilansu wodnego $P - E$, który jest różnicą między sumą opadów atmosferycznych P oraz parowania potencjalnego E [ŁYKOWSKI, 1986; MAGER i in., 1999] bądź wskaźnikowego E_o [ROJEK, 1987; ROJEK, WIERCIOCH, 1995]. Stwierdzono, że niedobory opadu w centralnej części kraju, w półroczu letnim zaznaczają się wyraźniej niż w okresie rocznym. W warunkach Polski, na podstawie przeprowadzonych prób, przyjęto wartość klimatycznego bilansu wodnego równą -200 mm/rok, poniżej której deficyt opadu wskazuje na wystąpienie intensywnej suszy meteorologicznej [MAGER i in., 1999]. Zarówno metoda klimatycznego bilansu wodnego jak i klasyfikacja Marcilonka są przydatne przede wszystkim do oceny susz meteorologicznych w dłuższym okresie czasu na przykład w okresie wegetacyjnym.

Wykorzystując te same parametry, tzn. sumy opadów P i parowania potencjalnego E , można posługiwać się dwoma kolejnymi wskaźnikami suszy meteorologicznej. Pierwszy z nich to wskaźnik suchości E/P , który posłużył do zbadania przestrzennych rozkładów miesięcznych wskaźnika E/P w Polsce w okresie wegetacyjnym w wieloleciu 1956-1965 [OLECHNOWICZ-BOBROWSKA, 1979]. Korzystając z tego wskaźnika, DRUPKA [1976] na podstawie izolinii stosunku parowania potencjalnego do sumy opadów atmosferycznych E/P , wydzielił dla okresu wegetacyjnego (IV-IX) w Polsce cztery strefy klimatyczne zróżnicowanej celowości stosowania nawodnień deszczownianych w rolnictwie.

W USA [USGS, 2005], w Rumunii [DUMITRU, MUNTANEU, 2000] oraz w krajach afrykańskich [POVERTY MAPPING, 2005] wskaźnikiem suszy jest stosunek P/EP (*Precipitation Evapotranspiration Balance*); w Rumunii występuje on pod nazwą (*Aridity Index*). Wskaźnik ten wyraża potencjalną zdolność dostępu roślin do wody. Na podstawie jego wartości stworzono klasyfikację służącą do wydzielenia stref agroklimatycznych (*Agroclimatic Zones*) (tab. 2.3), przy czym przyjmuje się, że wartości $P/EP < 0,5$ świadczą o ograniczonych możliwościach dostępu roślin do wody [POVERTY MAPPING, 2005]. Wskaźnik

pokazuje stosunki wilgotnościowe występujące na danym terenie i pomaga w doborze właściwych roślin do uprawy [KULANDAIVELU, JAYACHANDRAN, 1994].

Tabela 2.3. Podział na strefy agroklimatyczne [POVERTY MAPPING, 2004]

P/PE	Strefa agroklimatyczna
$< 0,05$	Ekstremalnie sucha (<i>Hyper-arid</i>)
0,05 to 0,20	Sucha (<i>Arid</i>)
0,20 to 0,50	Umiarkowanie sucha (<i>Semi-arid</i>)
0,50 to 0,65	Lekko sucha (<i>Dry sub-humid</i>)
0,65 to 1	Średnio wilgotna (<i>Moist sub-humid</i>)
> 1	Wilgotna (<i>Humid</i>)

Do popularnych w literaturze wskaźników suszy meteorologicznej należą również:

- wskaźnik hydrotermiczny Sielianinowa [BYCZKOWSKI, MEYER, 1999]

$$K = \frac{P}{0,1 \sum t} \quad (2.2)$$

gdzie:

P – suma opadów miesięcznych, mm;

t – suma dodatnich temperatur w miesiącu, °C.

- wskaźnik suchości De Martonne [BYCZKOWSKI, MEYER, 1999]

$$A = \frac{P}{T+10} \quad (2.3)$$

gdzie:

P – suma opadów rocznych, mm;

T – średnia roczna temperatura, °C;

W USA [IEM, 2005] i w niektórych krajach, do ocen intensywności suszy w okresach tygodniowych, stosuje się wskaźnik suchości AI (*Aridity Index*) określony wzorem:

$$AI = P' - T' = \frac{P - \bar{P}}{\sigma_p} - \frac{T - \bar{T}}{\sigma_t} \quad (2.4)$$

gdzie:

P', T' – standaryzowane wartości sum opadów i temperatury maksymalnej;

$\bar{P}, \bar{T}$ – średnie sumy opadów i temperatury maksymalnej w wieloleciu;

P, T – sumy opadów i temperatury maksymalnej;

σ_p, σ_t – średnie odchylenie standardowe sum opadów i temperatury maksymalnej w wieloleciu.

Wartości ujemne wskaźnika świadczą o okresie ciepłym i suchym, a dodatnie o chłodnym i wilgotnym. Warunki atmosferyczne, przy których wskaźnik ma ujemne wartości, są mniej sprzyjające rozwojowi roślin i mają negatywny wpływ na osiągnięte plony [MILLER i in., 2003].

Na Węgrzech i w krajach bałkańskich stosuje się klimatyczny wskaźnik suchości Pálfai'a (PAI) [PÁLFAI, 2002]. Podstawową wartość wskaźnika oblicza się według wzoru:

$$PAI_o = \frac{t_{IV-VIII}}{P_{X-VIII}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

gdzie:

PAI_o – wartość wskaźnika, °C/100 mm;

$t_{IV-VIII}$ – średnia temperatura w okresie IV-VIII, °C;

P_{X-VIII} – suma opadów w okresie X-VIII, z uwzględnieniem ich miesięcznych współczynników wagowych, które wynoszą w poszczególnych miesiącach: 0,1 – październik, 0,4 – listopad, 0,5 – od grudnia do kwietnia, 0,8 – maj, 1,2 – czerwiec, 1,6 – lipiec, 0,9 – sierpień.

W 1995 roku Pálfai swój wskaźnik klimatyczny przekształcił we wskaźnik klimatyczno-glebowy poprzez wprowadzenie do równania trzech współczynników:

- współczynnika temperaturowego k_t ;
- współczynnika opadowego k_p ;
- współczynnika poziomu wody gruntowej k_{gw} .

Uwzględnienie powyższych współczynników jest szczególnie istotne na obszarach nizinnych. Autor sugeruje też, aby dane dotyczące poziomu wód gruntowych pochodziły z 2-3 najbliższych studni, znajdujących się w pobliżu punktu pomiarowego lub stacji meteorologicznej. Ostateczna postać wskaźnika *PAI* jest następująca:

$$PAI = k_t k_p k_{gw} PAI_o \quad (2.6)$$

Ocenę stopnia suchości (suszy) przeprowadza się na podstawie kryteriów przyjętych w tabeli 2.4.

Tabela 2.4. Klasyfikacja suchości według wskaźnika *PAI*
[CANARACHE, DUMITRU, 2000]

<i>PAI</i>	Okres
0 – 4	Brak suszy
4 – 6	Susza umiarkowana
6 – 12	Susza silna
> 14	Susza ekstremalna

Wartości wskaźnika *PAI*, obliczone na podstawie danych z 73 stacji meteorologicznych w wieloleciu 1931-1998, posłużyły do wykonania map zagrożenia suszą na obszarze Węgier.

Wskaźnik standaryzowanego opadu *SPI* (*Standardized Precipitation Index*) został zaproponowany przez MCKEE [MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993] i aktualnie jest stosowany do operacyjnego monitorowania suszy w USA przez Narodowe Centrum Zapobiegania Suszy [NDMC, 2004]. Wskaźnik *SPI* może być obliczany w różnych skalach czasowych; dla okresu 1 – 3 miesięcy służy do oceny krótkotrwałych lub sezonowych susz, dla 12 miesięcy – susz wielomiesięcznych (średnioterminowych), 48 i więcej miesięcy – susz kilkuletnich (długoterminowych) [GUTTMAN, 1998]. Podejmowane są też próby stosowania tego wskaźnika dla oceny i intensywności suszy w krótszych okresach czasu [BAK, ŁABĘDZKI, 2004]. W literaturze coraz częściej spotyka się informacje o kolejnych próbach monitorowania suszy za pomocą *SPI* w wielu krajach dotkniętych suszą, m.in. w Meksyku, Brazylii, na Węgrzech czy w Argentynie [BRUNINI i in., 2005; RODRÍGUEZ-PINEDA i in, 2005; SZALAI, SZINELL, 2000; ZANVETTOR, RAVELO, 2002]. W Polsce, pierwsze badania z wykorzystaniem wskaźnika *SPI* przeprowadził ŁABĘDZKI [2000] do oceny zagrożenia suszą w regionie bydgosko-kujawskim.

Standaryzacja w sensie statystycznym oznacza sprowadzenie rozkładu prawdopodobieństwa badanej wielkości do standaryzowanego rozkładu normalnego. W przypadku wskaźnika *SPI* standaryzacji są poddane znormalizowane ciągi homogeniczne opadów. Opad atmosferyczny jako zjawisko meteorologiczne jest zmienną losową o dolnym ograniczeniu i na ogół dodatniej asymetrii i nie podlega rozkładowi normalnemu. Najczęściej sumy okresowe opadu (dekadowe, miesięczne, roczne) podlegają rozkładowi gamma [GUTTMAN 1999; KACZMAREK, 1970] i dlatego przeprowadza się normalizację ciągu pomiarowego opadu stosując funkcję przekształcającą $f(P)$. Sugerowane w literaturze [OZGA-ZIELIŃSKA, BRZEZIŃSKI, 1994] i sprawdzone w praktyce funkcje normalizacyjne [ŁABĘDZKI, 2000; BĄK, ŁABĘDZKI, 2004], dające dobre dopasowanie do rozkładu normalnego to:

dla sum miesięcznych - $\sqrt[3]{P}$, $\ln P$,

dla sum dekadowych - $\sqrt[3]{P}$, $\sqrt[3]{(P+10)}$, $\ln P$, $\ln (P+c)$.

Zdaniem AGNEW [1999] w wyniku standaryzacji nienormalizowanych ciągów opadowych nie otrzymuje się wartości *SPI*, lecz są to standaryzowane anomalie opadów (*Standardized Rainfall Anomaly*). Dopiero normalizacja ciągów pomiarowych nadaje właściwy sens standaryzacji i pozwala na prawidłowe obliczenie wartości *SPI*. Zgodność rozkładu zmiennej przekształconej funkcją $f(P)$ z rozkładem normalnym jest badana za pomocą testów statystycznych np. testu zgodności χ^2 lub testu normalności Lillieforsa zawartych w pakiecie *Statistica ver.6.0* [KOBUS, PIETRZYKOWSKI, ZIELIŃSKI, 2001].

Obliczenia wartości wskaźnika *SPI* dokonuje się na podstawie, co najmniej 30-letniego homogenicznego ciągu opadów według wzoru:

$$SPI = \frac{f(P) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (2.7)$$

gdzie:

$f(P)$ – przekształcona suma opadów, mm;

$\hat{\mu}$ - średnia wartość znormalizowanego ciągu opadów, mm;

$\hat{\sigma}$ - średnie odchylenie standardowe znormalizowanego ciągu opadów, mm.

Obliczony ciąg wartości wskaźnika *SPI* może przedstawiać zarówno okresy nadmiaru i niedoborów opadów. Powszechnie stosuje się zaproponowaną przez McKee [MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993], a następnie zmodyfikowaną przez ICID [HOW TO WORK..., 1998] i National Drought Mitigation Center [NDMC, 2004] klasyfikację okresów w oparciu o wielkość odchylenia standardowego w różnych przedziałach czasowych (tab. 2.5).

Tabela 2.5. Klasyfikacja okresów według *SPI*
[HOW TO WORK..., 1998; NDMC, 2004]

Rodzaj okresu	<i>SPI</i>
Ekstremalnie suchy	$\leq -2,0$
Bardzo suchy	$-1,99 \div -1,5$
Umiarkowanie suchy	$-1,49 \div -1,0$
Normalny	$-0,99 \div 0,99$
Umiarkowanie mokry	$1,0 \div 1,49$
Bardzo mokry	$1,5 \div 1,99$
Ekstremalnie mokry	$\geq 2,0$

Przyjęte kryteria okresów pozwoliły na wydzielenie trzech klas suszy. Generalnie, im niższa wartość wskaźnika, tym większa jest intensywność suszy i mniejsze jest prawdopodobieństwo jej wystąpienia wraz z mniejszymi. Przykładowe wartości *SPI* i odpowiadające im skumulowane prawdopodobieństwo podane są w tabeli 2.6.

Tabela 2.6. Wartości *SPI* i odpowiadające im skumulowane prawdopodobieństwo

<i>SPI</i>	Skumulowane prawdopodobieństwo	<i>SPI</i>	Skumulowane prawdopodobieństwo
-3,0	0,0014	0,0	0,5000
-2,5	0,0062	+0,5	0,6915
-2,0	0,0228	+1,0	0,8413
-1,5	0,0668	+1,5	0,9332
-1,0	0,1587	+2,0	0,9772
-0,5	0,3085	+2,5	0,9938
0,0	0,5000	+3,0	0,9986

Standaryzacja jest sprowadzeniem badanych wielkości lub wskaźników do „wspólnego mianownika”. Pozwala na obiektywne porównywanie intensywności zjawiska suszy meteorologicznej i ocenę prawdopodobieństwa jej pojawiania się oraz susz bardziej intensywnych w różnych strefach opadowych. Wartości *SPI* nie zależą tylko od bieżącej sumy opadów, ale także od wartości średniej i zmienności w wieloleciu. Może więc zdarzyć się, że przy tej samej sumie opadów intensywność suszy będzie skrajnie różna. Przykłady takiego zróżnicowania oceny suszy na podstawie wartości wskaźnika *SPI*, obliczonego w okresie wegetacyjnym (IV-IX) w latach 1954 podano w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Zróżnicowanie oceny suszy meteorologicznej na podstawie wartości wskaźnika *SPI* [ŁABĘDZKI, BĄK, 2004b]

Stacja	$\bar{P}$ [mm]	σ [mm]	V [%]	Suma opadów dla górnej granicy klasy suszy [mm]		
				D3	D2	D1
Bydgoszcz	327,4	92,3	28,2	168,4	200,2	275,2
Kalisz	322,6	62,0	19,2	205,8	230,9	287,2

$\bar{P}$ - średnie sumy opadów,

σ - średnie odchylenie standardowe znormalizowanego ciągu opadów,

V - współczynnik zmienności.

Ze względu na wyjątkowe znaczenie wskaźnika *SPI* w przedstawionej pracy i uczynienie go jednym z przedmiotów pracy, dalszy jego opis jest zawarty w części metodycznej rozprawy.

2.4. SUSZA GLEBOWA

Suszę glebową można uznać jako pierwsze następstwo niedoboru opadu i suszy meteorologicznej i potocznie określa się ją jako przesuszenie gleby. Intensywność suszy w znacznym stopniu zależy od zdolności retencyjnych gleb. Proces przesuszenia następuje znacznie szybciej na glebach lekkich; na glebach ciężkich, zwłaszcza w ich głębszych warstwach, jest on wolniejszy. Intensywność suszy glebowej, w warunkach ciągle niedostatecznych opadów lub ich braku zależy również od temperatury i wilgotności powietrza, promieniowania słonecznego, zachmurzenia i prędkości wiatru. Gdy susza występuje w okresach krytycznych dla wegetacji roślin, widoczne staje się wyraźne obniżenie plonów. Długotrwałej suszy glebowej towarzyszy często susza hydrologiczna, podczas której obniżeniu ulega poziom wód podziemnych, zmniejsza się przepływ w rzekach, wysychają źródła, a nawet mniejsze ciekły wodne. Bezpośrednim skutkiem suszy jest zakłócenie naturalnego bilansu wodnego danego obszaru. Problem jednoczesnego występowania obu rodzajów susz jest szczególnie istotny na użytkach zielonych. Są to obszary w znacznej części zmeliorowane, które w tym okresie ulegają przesychaniu z powodu braku wody w rowach i kanałach melioracyjnych.

Zjawisko długotrwałej i występującej w dużej skali suszy glebowej w Polsce, obserwowano w latach 1959, 1969, 1982, 1983, 1988, 1989, 1992, 2000 [BOBIŃSKI, MAYER, 1992a, 1992b; KACA, STĄPEL, ŚNIADOWSKI, 1993; LORENC i in., 2000].

2.5. WSKAŹNIKI SUSZY GLEBOWEJ

Susza glebowa najczęściej charakteryzowana jest stanem uwilgotnienia gleby, który można skwantyfikować: wilgotnością gleby, potencjałem wody glebowej lub zapasem wody w profilu glebowym. Jako kryterium wystąpienia suszy glebowej przyjmuje się uzasadnioną (odpowiednią) wartość tych parametrów. Na przykład wskaźnikiem takim jest potencjał wody glebowej wynoszący $-0,1$ MPa, czyli $pF=3,0$ [BIENKIEWICZ, ROGUSKI, LABĘDZKI, 1983; KOWALIK, 1973] lub wilgotność krytyczna dla danej rośliny [BIENKIEWICZ, ROGUSKI, LABĘDZKI, 1983]. Spadek potencjału poniżej $-0,1$ MPa oznacza początek suszy glebowej.

Z zestawienia wskaźników suszy glebowej [MARRACCI, 2000] widać, że większość z nich pojawiła się w momencie wdrażania technik komputerowych, które pozwoliły znacznie przyspieszyć obliczenia i tworzyć modele komputerowe zjawisk zachodzących w atmosferze i w pedosferze.

O ile parametry suszy meteorologicznej są łatwo mierzone w rozległych sieciach pomiarowych narodowych służb meteorologicznych, o tyle dostęp do parametrów suszy glebowej jest znacznie trudniejszy. Przede wszystkim ilość stanowisk pomiarowych jest znacznie mniejsza i są one rzadko elementami rozległej sieci. Otrzymane wyniki charakteryzują więc lokalne siedlisko i mogą być reprezentatywne dla małych obszarów. Możliwość zdobywania bieżących informacji o wilgotności gleby na dużych obszarach, głównie jej wierzchniej (czynnej) warstwy, umożliwiły dopiero metody z wykorzystaniem teledetekcji i GIS [CIOŁKOSZ, PODLACHA, OSTROWSKI, 2004; NEO, 2005].

Coraz częściej są też stosowane symulacje komputerowe, w których za pomocą modeli matematycznych obliczane są zmiany wilgotności w glebie np. *CROPWAT* [SMITH, 1992], *CROPIRR* [LABĘDZKI, 1997], *SWATRE* [BELMANS, WESSELING, FEDDES, 1983], *SWACROP* [KABAT, VAN DEN BROEK, FEDDES, 1992, IGWMC, 2005]. W modelowaniu matematycznym uwzględnia się zarówno parametry suszy meteorologicznej jak i parametry decydujące o wilgotności gleby. Są one jednocześnie składnikami równania bilansu wody glebowej strefy korzeniowej w ogólnej postaci:

$$ZW_p + P + WG = ZW_k + ET + ODP \quad (2.8)$$

gdzie:

ZW_p , ZW_k – zapas wody w profilu glebowym o określonej miąższości na początku i na końcu okresu obliczeniowego, mm;

P – opad atmosferyczny, mm;

WG – zasilanie strefy korzeniowej droga podsiąku kapilarnego, mm;

ET – ewapotranspiracja, mm;

ODP – odpływ poniżej strefy korzeniowej, mm.

Obszerne badania nad suszą glebową w Polsce były przeprowadzone w związku z suszą wiosenną w 1992 roku [BOBIŃSKI, MEYER, 1992; CZAPLAK, 1996]. Wykorzystano między innymi opracowany w Zakładzie Agrometeorologii IMGW kompleksowy wskaźnik agrometeorologiczny [CZAPLAK, 1996; SŁOTA i in., 1992], który składał się z siedmiu wskaźników agrometeorologicznych:

- niedoboru opadów w okresie od kwietnia 1992 r. do dnia wykonania obliczeń (opad poniżej 50% wartości średniej wieloletniej);
- niedoboru opadów w okresie trzech ostatnich dekad (opad poniżej 25% wartości średniej wieloletniej);
- ciągów dni bez opadów (co najmniej 17 dni);
- klimatycznego bilansu $\Sigma(P-E_p)$, obliczonego od 1 czerwca do dnia wykonania obliczeń (poniżej - 75mm);
- liczby dni ze średnią dzienną temperaturą gleby na głębokości 5 cm powyżej 25°C, obliczonych od 1 czerwca do dnia wykonania obliczeń (w każdej dekadzie 2 dni lub więcej);
- wilgotności gleby w ostatniej dekadzie ocenianej jako niedostatecznie lub kłóskowo małą;
- wydajności studni gospodarskich w ostatniej dekadzie w przypadku, gdy niedobór wody lub całkowity jej brak występował w ponad 25% studni.

W przypadku spełnienia zadanego kryterium, każdy z tych wskaźników przyjmował wartość 1 punktu. Wzrastająca suma punktów świadczyła o postępującej intensywności suszy. Z naukowego punktu widzenia taka analiza ma dużą wartość poznawczą, ocenę suszy przeprowadzano zarówno z punktu widzenia przyczyny (susza meteorologiczna) oraz skutków (susza glebowa), natomiast w praktyce wskaźnik ten jest mało praktyczny.

Podstawowym wskaźnikiem suszy w USA, służącym do oceny wpływu warunków meteorologicznych na zmianę bilansu wodnego w glebie i stosowanym także w wielu krajach świata jest wskaźnik *PDSI (Palmer Drought Severity Index)*, zwany często wskaźnikiem Palmera [ALLEY, 1984; GUTTMAN, 1998]. Danymi wejściowymi są: opady i temperatura; do

jego obliczania wykorzystuje się, co najmniej 30-letnie ciągi pomiarowe. Palmer zastosował standaryzację wartości wskaźnika, co pozwoliło, podobnie jak w przypadku wskaźnika *SPI*, na obiektywne porównywanie okresów suszy, okresów przeciętnych warunków wilgotnościowych i okresów wilgotnych w różnych miejscach i w różnych przedziałach czasu. Intensywność suszy jest klasyfikowana za pomocą 5 klas suszy (tab. 2.8). Przyjmuje się, że wartość wskaźnika $PDSI = -0,5$ jest granicą między okresem suszy i okresem normalnym.

Tabela 2.8. Klasyfikacja okresów suszy według wskaźnika *PDSI* [GUTTMAN, 1998].

<i>PDSI</i>	Okres
-0,50 ÷ -0,99	Początek suszy
-1,00 ÷ -1,99	Susza łagodna
-2,00 ÷ -2,99	Susza umiarkowana
-3,00 ÷ -3,99	Susza silna
< -3,99	Susza ekstremalna

Okres suszy został zdefiniowany jako okres w czasie, którego wilgotność gleby w danej lokalizacji sukcesywnie spada poniżej wartości średniej wieloletniej. Okres ten trwa przeważnie przez kilka następujących po sobie miesięcy lub lat [GUTTMAN, 1998].

PDSI dla danego miesiąca *t* jest określony wzorem:

$$PDSI_t = 0,897PDSI_{t-1} + Z_t / 3 \quad (2.9)$$

gdzie:

$PDSI_{t-1}$ – wartość wskaźnika *PDSI* w poprzednim miesiącu;

Z – wskaźnik anomalii wilgotności (tzw. *Z index*).

Wartość wskaźnika *Z* zależy od wartości potencjalnych i rzeczywistych takich parametrów jak: ewapotranspiracja, opad, odpływ powierzchniowy oraz od empirycznego współczynnika *K*, którego wielkość maleje ze wzrostem opadów.

Na podstawie wzoru (2.9) GUTTMAN [1998] stwierdził, że o wartości *PDSI*, czyli intensywności suszy w badanym miesiącu, w 1/3 decydują bieżące warunki opadowe i prawie w 9/10 warunki w poprzednich miesiącach. Uzasadnione jest więc stwierdzenie, że wskaźnik *PDSI* służy przede wszystkim do oceny zmian wilgotności gleby w dłuższych okresach czasu

(miesiąc, sezon, rok), bowiem Palmer przyjął założenie, że w trakcie długotrwałej suszy, miesiąc lub kilka miesięcy z wyraźnie większymi, prawie średnimi opadami, nie powoduje jej zakończenia. Przez większość autorów wskaźnik *PDSI* uznawany za wskaźnik suszy meteorologicznej, przez niektórych za wskaźnik hydrologiczny, ponieważ susza hydrologiczna jest następstwem długotrwałej suszy glebowej.

Wskaźnik Palmera jest popularny między innymi z następujących powodów:

- informuje decydentów o wielkości odchylenia badanego okresu od normy,
- pozwala na porównanie bieżącego okresu na tle historycznego tła,
- umożliwia badanie historyczne zasięgu i czasu trwania suszy [HOW TO WORK..., 1998].

W 1968 roku powstał wskaźnik *CMI* (*Crop Moisture Index*) [MARRACCI, 2000], który służy do oceny krótkoterminowych zmian wilgotności (w okresach tygodniowych, ale tylko w okresie wegetacyjnym) [NDMC, 2005]. Jest on głównie wykorzystywany na rolniczych obszarach USA, a jego obliczenia, podobnie jak wskaźnika *PDSI*, bazują na danych temperatury i opadów w wydzielonych klimatycznych regionach USA. Zmianę wilgotności ocenia się poprzez porównanie wartości wskaźnika w bieżącym i poprzednim tygodniu. Wskaźnik reaguje szybko na zmiany warunków wilgotnościowych spowodowanych na przykład krótkotrwałymi i intensywnymi opadami [HOW TO WORK..., 1998]. Aktualne i prognozowane wartości wskaźników *PDSI* i *CMI* są na bieżąco umieszczane na stronach internetowych *National Weather Service* [Nws, 2005]. MARACCHI [2000] w swoim zestawieniu wskaźników suszy zalicza *PDSI* i *CMI* do wskaźników suszy wykorzystujących parametry glebowo-wodne i roślinne.

CANARACHE i DUMITRU [2000] zmodyfikowali wskaźnik Palfai *PAI*, wprowadzając tzw. łączny współczynnik glebowy *KS*. Uwzględnia on zapas wody łatwo dostępnej, możliwości dostępu roślin do wody gruntowej, stopień zasolenia gleby i odpływ powierzchniowy. Zaproponowana modyfikacja wskaźnika uwzględniała fakt przewagi na terenie Rumunii obszarów o dużej zmienności nachylenia oraz różnorodność występujących gleb. Posługując się tak zmodyfikowaną wersją wskaźnika *PAIs* sporządzono mapy zagrożenia suszą w Rumunii.

Do szczegółowej analizy ukształtowania terenu posłużono się techniką *GIS*, a do analiz glebowych wykorzystano 21 rodzajów gleb. Po wprowadzeniu czynników glebowych i fizjograficznych, zmniejszenie się wrażliwości na występowanie suszy zauważone było głównie na obszarach z płytkim zwierciadłem wody gruntowej i w kilku przypadkach na glebach o średniej i luźnej teksturze o dużych zdolnościach retencjonowania wody łatwo

dostępnej. Uwzględnienie współczynników spowodowało zakwalifikowanie około 12% obszaru Rumunii do niższej klasy suchości, a 6% do wyższej. Wzrost wrażliwości obserwowany był na piaszczystych glebach, o małej retencji, na glebach zasolonych i na obszarach o dużym nachyleniu, który sprzyja intensywnym procesom odpływu.

W metodzie zaproponowanej przez NARASIMHANA i SRINIVASA [2002] do oceny suszy w stanie Teksas (USA) wykorzystano kompleksowy model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Zmiany wilgotności gleb analizowano w siatce kwadratowej o powierzchni 16 km². Techniki teledetekcji i GIS pozwoliły uwzględnić zmienność rodzajów gleb, ukształtowania terenu i pokrycia naturalnego (autorzy zauważają, że badania za pomocą takich wskaźników jak *PDSI* i *CMI* pozwalają na ocenę warunków wilgotnościowych na mniejszych obszarach, o powierzchni od 7000 do 100000 km²; jednocześnie zakłada się, że są to obszary jednorodne pod względem rodzajów gleb i pokrycia terenu). W modelu SWAT wykorzystuje się wskaźnik deficytu wody użytecznej w glebie *SMD* (*Soil Moisture Deficit*). Jego wartość, obliczana w skali miesiąca informuje, jak suchy jest profil glebowy, jeśli porówna się go ze średnią minimalną i średnią maksymalną wartością w wieloleciu. Zsumowana wartość wskaźnika w kolejnych miesiącach pokazuje progresję suszy. Autorzy twierdzą, że wartości *SMD* niewiele różnią się od tych uzyskanych za pomocą wskaźników suszy *PDSI* i *CMI*.

2.6. SUSZA ROLNICZA

W rolnictwie przez suszę rozumie się niedobór wody w glebie, niekorzystnie wpływający na wzrost, rozwój i plonowanie roślin, w odniesieniu do miejsca (gleby), czasu (fazy fenologiczne, okresy krytyczne, okres wegetacji) i rośliny. Ujemne skutki suszy wyrażają się spadkiem wielkości i jakości plonu. Susza rolnicza jest następstwem suszy meteorologicznej i glebowej, a jej najważniejszymi parametrami są: ewapotranspiracja i jej redukcja w wyniku suszy glebowej, oraz jako ostateczny skutek suszy - plon i jego redukcja.

Najczęściej używanym kryterium niedoboru wody glebowej jest wilgotność krytyczna i odpowiadający jej potencjał wody glebowej, czyli stan uwilgotnienia gleby, przy którym obserwuje się początek hamowania rozwoju roślin i zmniejszenie intensywności ewapotranspiracji roślin związane z ograniczeniem poboru wody przez korzenie. Gdy wilgotność jest większa od krytycznej, w glebie panują warunki dla niehamowanego wzrostu roślin, ewapotranspiracja jest potencjalna, a jej wielkość określa ilość wody, która może wyparować z łąnu roślin w danych warunkach meteorologicznych. Wilgotność mniejsza od

krytycznej gwałtownie zmniejsza intensywność procesu ewapotranspiracji. Z punktu widzenia fizjologii roślin wilgotność krytyczna jest wielkością zmienną zależną - dla danej gleby i rośliny - od fazy rozwojowej roślin, wielkości systemu korzeniowego, a zwłaszcza gęstości i czynnej powierzchni korzeni, głębokości strefy korzeniowej i rozmieszczenia w niej korzeni, potencjału wody w korzeniach i potencjału wody glebowej będącej w kontakcie z korzeniami oraz od intensywności poboru wody przez korzenie związanej z intensywnością procesu transpiracji. Gdy parowanie jest duże, wilgotność krytyczna jest wyższa, a gdy małe - niższa. Głębokość systemu korzeniowego i wielkość powierzchni czynnej korzeni decydują o rozkładzie wilgotności krytycznej w profilu glebowym. Rośliny głębiej korzeniące się mogą czerpać wodę z głębszych warstw, w związku z czym wierzchnia warstwa może znacznie przesycać, a rośliny nie wykazują jeszcze oznak zahamowania procesów fizjologicznych i nie obserwuje się zasychania czy wędnięcia. Dlatego też podając wilgotność krytyczną dla danej rośliny należy uwzględnić jej rozkład w profilu glebowym.

Według BOKENA [2005] o wielkości plonu decydują:

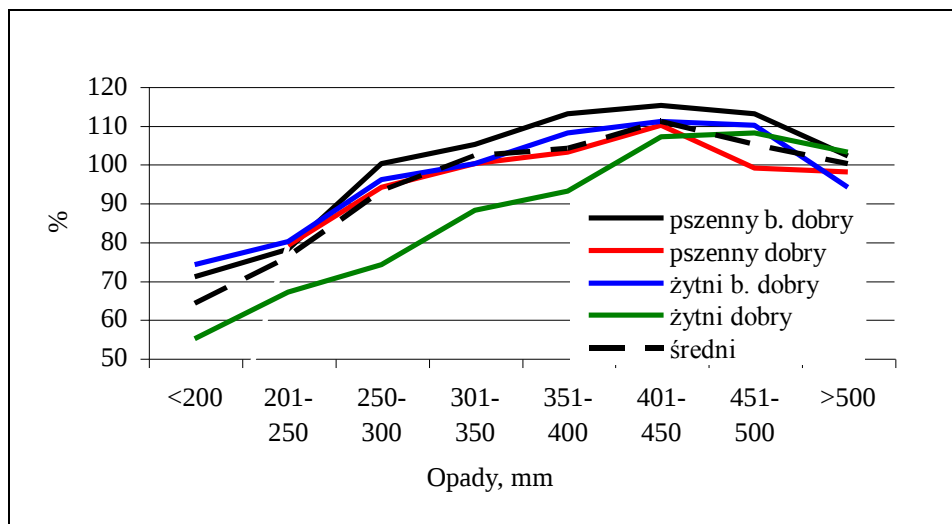
- czynniki abiotyczne, czyli fizyczne czynniki siedliska, takie jak: retencja wodna gleby, żyzność gleb, tekstura gleb, bonitacja gleb, warunki pogodowe;
- czynniki agrotechniczne do których zalicza się: orkę, głębokość gleby, gęstość siewu, data siewu, stopień zachwaszczenia, ochronę przed szkodnikami i chorobami, technikę zbioru, straty późniwe, stopień mechanizacji, nawożenie;
- czynniki poprawiające przestrzeń rolniczą: wielkość pola, stopień nachylenia gruntów ornych, drenowanie i nawadnianie, niwelowanie powierzchni pola;
- czynniki społeczno-ekonomiczne takie jak: odległość do punktów sprzedaży, gęstość zaludnienia, lokalna infrastruktura, koszty dostaw, ceny produkcji, poziom edukacji, umiejętności;
- nadzwyczajne zagrożenia: działania wojenne, powodzie, trzęsienia ziemi, gradobicia i przymrozki, susze.

Do tak określonych czynników plonotwórczych dobrze pasuje definicja suszy rolniczej podana przez MARACCHIEGO [2000]. Dla autora jest ona interakcją między warunkami klimatycznymi i innymi czynnikami (np. wzrastającą konsumpcją wody, zmianami w sposobie użytkowania ziemi lub zmniejszeniem zużycia wody), która prowadzi do znacznej redukcji plonów lub do pogorszenia jakości zbiorów. W tym sensie susza rolnicza jest szerszym pojęciem niż susza meteorologiczna, bo zależy ona od większej ilości różnych czynników. Nie wszystkie czynniki plonotwórcze mogą być systematycznie mierzone i

monitorowane, stąd ich wpływ na wydajność rolniczą przyjmowany jest jako nieistotny lub stały, zwłaszcza w regionach stabilnych ekonomicznie. W warunkach naturalnych czynniki meteorologiczne mają decydujące znaczenie w zaopatrzeniu roślin w wodę, a także wywierają często zasadniczy wpływ na jej wykorzystanie. Najbardziej znaczącą rolę odgrywają opady i temperatura. Na glebach lekkich, o głęboko położonym zwierciadle wody gruntowej, opady atmosferyczne, rosa oraz kondensacja pary wodnej w glebie są jedynymi źródłami zaopatrzenia roślin w wodę. Warunki meteorologiczne wpływają także, na ogół w stopniu decydującym, na procesy parowania i transpiracji roślin, a za pomocą wartości ewapotranspiracji potencjalnej można wyrazić wpływ warunków klimatycznych na wymagania wodne roślin. W mniejszym stopniu o suszy rolniczej decydują takie elementy meteorologiczne jak: wilgotność powietrza, promieniowanie słoneczne, zachmurzenie i prędkość wiatru.

Na prawidłowy rozwój systemu korzeniowego roślin w dużej mierze wpływają warunki termiczne i wilgotnościowe wiosną. Duża wilgotność gleby o tej porze roku, w dłuższym okresie czasu powoduje, że rośliny wykształcają płytki system korzeniowy i są mało odporne na występujące latem okresy posuchy. Z drugiej strony przesuszona gleba hamuje tempo kiełkowania, a w skrajnych przypadkach znacznie redukuje liczbę siewek. Tylko dobrze rozwinięty system korzeniowy w okresie wiosny lepiej znosi stres wodny, pojawiający się w dalszej części okresu wegetacyjnego.

W literaturze krajowej i zagranicznej można znaleźć dużo artykułów, dotyczących wpływu wysokości opadów naturalnych lub nawadniania na plonowanie roślin uprawnych. Badania przeprowadzone w Polsce i wielu krajach na różnych kontynentach wykazały, że istnieje silna zależność między ilością opadów i wielkością plonów. Wiele z tych prac koncentrowało się na ustaleniu sumy optymalnych opadów, zapewniających najwyższe plony poszczególnych gatunków w określonych rejonach. Jako przykład można podać badania DZIEŻYCA [1989] nad wspomnianą zależnością na uprawach buraka cukrowego w Polsce z uwzględnieniem rodzaju kompleksu rolniczej przydatności gleb (rys. 2.1) oraz NOWAKA [1986] w rejonie Kujaw (tab. 2.9).



Rys. 2.1. Plon buraka cukrowego w procentach plonu średniego w wieloleciu (1952-1980) w zależności od kompleksu rolniczej przydatności i ilości opadów w okresie wegetacji na podstawie DZIEŻYCA [1989]

Z rysunku widać, że w okresie największych niedoborów opadu, plony buraka cukrowego mogą być niższe w zależności od rodzaju gleby od 20 do 45%. Dla Kujaw optymalny plon na glebie średniej wynosił $45,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ przy opadach optymalnych 400-450 mm, a na glebie ciężkiej $46,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, przy takiej samej optymalnej sumie opadów jak na glebach średnich (tab. 2.9).

Tabela 2.9. Plon [$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$] buraka cukrowego w rejonie Kujaw przy opadach optymalnych [mm] [NOWAK, 1986]

Plon przy opadach optymalnych [$\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$]	Opad w okresie IV-IX [mm]							
	do 200	200 - 250	250 - 300	300 - 350	350 - 400	400 - 450	450 - 500	ponad 500
Gleby średnie								
45,3	22,7	29,4	37,1	36,2	39,9	45,3	33,5	41,2
Gleby ciężkie								
46,9	24,4	32,4	38,5	41,3	46,9	46,9	37,1	-

W zależności od sumy opadów w okresie wegetacyjnym (IV-IX) wielkość plonów zmieniała się. W skrajnych przypadkach plon spadał o 50% na glebach średnich i o 48% na glebach ciężkich. Opady powyżej optymalnych obniżały plony buraków do 10%, niezależnie od zwięzłości gleby. W oparciu o wyniki badań także na innych roślinach okopowych, NOWAK [1986] stwierdził, że niedobór opadów wyraźniej obniżał plony badanych roślin na glebach lekkich i średnich w porównaniu z ciężkimi, zaś nadmiar opadów wyraźniej obniżał plony na glebach ciężkich.

W cyklu rozwojowym rośliny można wyodrębnić okresy, zwane okresami krytycznymi, w których roślina wykazuje maksymalne zapotrzebowanie na wodę. W przypadku roślin korzeniowych np. buraków cukrowych, marchwi jest to okres silnego grubienia korzeni. Badania Zakładu Agrometeorologii IUNG w Puławach w latach 1959-1973 na glebach kompleksów pszennych 1-3 i pszenno-żytnich 4-5 wykazały, że średnie wieloletnie straty w plonie buraków cukrowych na skutek niedoboru opadów w okresie (VI-IX) w rejonie centralnej Wielkopolski wynosiły około 70 dt·ha⁻¹ [DEMIDOWICZ, DOROSZEWSKI, GÓRSKI, 1996].

Powyższe obliczenia są przykładem wpływu opadów na wielkość plonów, opartą na rzeczywistych wynikach produkcyjnych. Interesującym jest też zagadnienie modelowania i prognozowania suszy rolniczej, kwantyfikowanej redukcją ewapotranspiracji i redukcją plonu, w warunkach suszy meteorologicznej, wyrażonej wartościami wskaźników suszy.

2.7. WSKAŹNIKI SUSZY ROLNICZEJ

Wskaźniki suszy rolniczej wykorzystują przede wszystkim dane dotyczące opadów, ewapotranspiracji potencjalnej i rzeczywistej roślin, wilgotności gleby, na których są uprawiane oraz plonu. Przegląd literatury pokazuje, że oprócz najczęściej pojawiających się badań dotyczących relacji opad ↔ plon, są też badania mające na celu określenie następujących zależności:

- wskaźniki suszy meteorologicznej lub glebowej ↔ wielkość ewapotranspiracji lub plonu,
- wskaźniki suszy meteorologicznej lub glebowej ↔ redukcja ewapotranspiracji lub plonu.

IGRAS i JANKOWIAK [1998] w badaniach, jakie przeprowadzili w IUNG w Puławach potwierdzili, że plony roślin zależą od ewapotranspiracji rzeczywistej, a stosunek plonów aktualnych do potencjalnych jest skorelowany ze stosunkiem ewapotranspiracji rzeczywistej ET_r lub polowego zużycia wody PZW do ewapotranspiracji potencjalnej ET_p . Wartość wskaźnika PZW/ET_p zależała od gatunku i fazy rozwojowej rośliny oraz od deficytu wilgotności gleby. Stwierdzono, że przy mniejszych deficytach wilgotności gleby, tempo spadku wskaźnika było szybsze, niż przy większych jej niedoborach. Większą wrażliwość na niedobór wody w glebie wykazywały rośliny jare w stosunku do ozimych. Istotny wpływ wskaźnika PZW/ET_p na plon roślin stwierdzono w fazach, w których dobowe zużycie wody było największe. Były to fazy krytyczne pod względem zaopatrzenia w wodę.

W Brazylii BRUNINI i in. [2005], w badaniach nad suszą rolniczą wykorzystywali:

- wskaźnik suszy roślinnej *CDI* (*Crop Drought Index*), wyrażający wielkość redukcji ewapotranspiracji, spowodowanej niedoborem wody w glebie. Wskaźnik ten oblicza się, korzystając z zależności:

$$CDI = 1 - \frac{ET_{re}}{ET_p} \quad (2.10)$$

gdzie:

ET_{re} – ewapotranspiracja w warunkach niedoboru wody w glebie,

ET_p – ewapotranspiracja potencjalna w warunkach dostatecznego uwilgotnienia gleby (powyżej wilgotności krytycznej).

- wskaźnik *ADI* (*Agricultural Drought Index*), wyrażony wzorem:

$$ADI = \frac{ET_{max}}{P} \quad (2.11)$$

gdzie:

ET_{max} – ewapotranspiracja maksymalna,

P – opad.

Na podstawie wartości wskaźnika *ADI* klasyfikuje się warunki rozwoju roślin (tab. 2.10).

Tabela 2.10. Klasyfikacja warunków rozwoju rośliny na podstawie wskaźnika *ADI* [BRUNINI i in., 2005]

Wartość wskaźnika <i>ADI</i>	Warunki rozwoju rośliny
$0,80 < ADI \leq 1,0$	Dobre
$0,60 < ADI \leq 0,80$	Korzystne
$0,40 < ADI \leq 0,60$	Znośne
$0,20 < ADI \leq 0,40$	Niekorzystne
$ADI \leq 0,20$	Krytyczne

W Chinach [TIAN, BOKEN; 2005], używano wskaźnik *CWSI* (*Crop Water Stress Index*), wyrażony wzorem:

$$CWSI = 1 - \frac{E}{E_p} = 1,503 - 1,476 \frac{W}{W_f} \quad (2.12)$$

gdzie:

E – ewapotranspiracja rzeczywista, mm,

E_p – ewapotranspiracja potencjalna, mm,

W – ilość wody w warstwie korzeniowej, cm,

W_f – ilość wody dostępnej w stanie polowej pojemności wodnej, cm.

Stwierdzono wysoki stopień korelacji ($R = 0,9$) między wskaźnikiem $CWSI$ i stosunkiem W/W_f . Ocenę warunków wilgotnościowych gleby można więc przeprowadzić na podstawie wartości wskaźnika $CWSI$ lub stosunku W/W_f (tab. 2.11)

Tabela 2.11. Klasyfikacja suszy na podstawie wskaźnika W/W_f i $CWSI$ [TIAN, BOKEN, 2005]

Stopień intensywności suszy	W/W_f	$CWSI$
Susza silna	$<0,4$	$>0,913$
Sucho	$0,41-0,50$	$0,765-0,913$
Słaba susza	$0,51-0,60$	$0,617-0,764$
Okres normalny	$0,61-0,80$	$0,322-0,616$
Okres wilgotny	$>0,81$	$<0,321$

Na wystąpienie suszy glebowej i rolniczej, jak i na jej intensywność, mogą wskazywać również niedobory wody dla roślin, które wynikają z zapotrzebowania na wodę roślin dla danego plonu (ewapotranspiracji potencjalnej danej uprawy), zdolności retencyjnych gleby oraz opadów [ROGUSKI, SARNACKA, DRUPKA, 1988]. Niedobory wody wskazują na potrzeby nawadniania, wyrażone zapotrzebowaniem wody do nawodnień netto. Wielkość tego zapotrzebowania jest ilością wody, jaką trzeba dostarczyć do strefy korzeniowej w danym okresie, w celu pokrycia potrzeb wodnych roślin i utrzymania wilgotności gleby powyżej wilgotności krytycznej. Niedobór wody dla roślin jest niedoborem wody glebowej rozumianym jako różnica między aktualnym zapasem wody użytecznej a zapasem wody w stanie wilgotności krytycznej, czyli zapasem wody trudnodostępnej:

$$N = ZWTD - ZWU_a, \quad (2.13)$$

gdzie $ZWU_a < ZWTD$,

gdzie:

N – niedobór wody, mm,

ZWU_a – aktualny zapas wody użytecznej w warstwie korzeniowej (na koniec okresu obserwacyjnego, np. doby, dekady, miesiąca), mm,

$ZWTD$ – zapas wody trudnodostępnej, mm.

Tak obliczane niedobory wodne za pomocą programu komputerowego *CROPDEF*, opracowanego przez ŁABĘDZKIEGO [1990, 1996], były podstawą określenia liczby dekad z suszą glebową i oceny potrzeb nawadniania w Polsce w pracach DRUPKI, KRYŃSKIEJ i KUŹNIARA [1997] oraz KUŹNIARA [2001]. Analiza przestrzenno-czasowa niedoborów wody w Polsce dla różnych upraw polowych i dla użytków zielonych była przedmiotem prac ŁABĘDZKIEGO [1990, 1996, 1997]. W analizach tych pod uwagę wzięto regionalne cechy klimatu, właściwości retencyjne rozmaitych gleb oraz wymagania wodne różnych gatunków roślin. Spośród zbóż wybrano pszenicę jara i ozimą, a z roślin okopowych ziemniaka średnio późnego i buraka cukrowego. Wytypowano więc takie gatunki roślin uprawnych, które mogą charakteryzować cały okres wegetacyjny pod względem wrażliwości na deficyty wody w glebie, a zarazem są uważane za rośliny ważne gospodarczo, które stanowią ważny element w strukturze zasiewów i dobrze reagują na nawodnienia. Modelowanie komputerowe wykazało zróżnicowanie obszarów Polski pod względem rozkładu dekadowych wartości niedoborów wodnych. Potwierdzono fakt, że deficyt wody w glebie nie pojawia się równocześnie we wszystkich rodzajach gleb, lecz w różnym czasie w zależności od ich rodzajowej (lub gatunkowej) retencji oraz rodzaju uprawy. Wszystkie publikowane w tych pracach wyniki mogą wskazywać na zagrożenie suszą różnych upraw w Polsce, przy uwzględnieniu zdolności retencyjnych gleb na tle rzeczywistych wartości elementów meteorologicznych.

Fakt zmniejszanie się intensywności ewapotranspiracji roślin, spowodowanej ograniczeniem poboru wody przez korzenie i wpływ tego zjawiska na zmniejszenie się plonu ma swoje odzwierciedlenie w literaturze polskiej i zagranicznej. Najczęściej używana jest wzajemna relacja zachodząca między redukcją plonu i redukcją ewapotranspiracji, którą można opisać zależnością [DOORENBOS, KASSAM, 1979; DRUPKA, KUŹNIAR, 1989; KOWALIK, 1989; ŁABĘDZKI, 1996, 1997; MOSIEJ, 1996]:

$$\left(1 - \frac{Y_{re}}{Y_p}\right) = k_y \left(1 - \frac{ET_{re}}{ET_p}\right) \quad (2.14)$$

gdzie:

Y_{re} – plon zredukowany w wyniku niedoboru wody glebowej,

Y_p – plon potencjalny w warunkach dostatecznego uwilgotnienia gleby (powyżej wilgotności krytycznej),

k_y – współczynnik reakcji plonu na niedobory wody [ŁABĘDZKI, 1996]; czułość uprawy na braki wody w poszczególnych fazach fenologicznych [MOSIEJ, 1996],

ET_{re} – ewapotranspiracja w warunkach niedoboru wody w glebie (rzeczywista),

ET_p – ewapotranspiracja potencjalna w warunkach dostatecznego uwilgotnienia gleby (powyżej wilgotności krytycznej).

Zależność ta może być wyznaczana, gdy znane są potrzeby i niedobory wodne roślin oraz maksymalny i rzeczywisty plon. Niedobór wody w stosunku do potrzeb wodnych roślin rozumianych jako ewapotranspiracja w warunkach nieograniczonej dostępności wody wpływa na ewapotranspirację i plon. W warunkach nieograniczonej dostępności wody ewapotranspiracja osiąga maksimum ET_p umożliwiając uzyskanie potencjalnego plonu Y_p w danych warunkach klimatycznych i glebowych, na określonym poziomie agrotechniki. Gdy pokrycie potrzeb wodnych jest niepełne, następuje hamowanie wzrostu roślin i redukcja plonu. Współczynnik k_y jest wskaźnikiem wrażliwości roślin na niedobór wody i określa, ile razy będzie większa lub mniejsza względna redukcja plonu od względnego deficytu wody. Im współczynnik k_y jest mniejszy, tym roślina jest bardziej odporna na niedobór wody.

Badania DOORENBOSA i KASSAMA [1979] wykazały, że około 80-85% obserwowanych redukcji w różnych środowiskach glebowych i klimatycznych można było wyjaśnić tymi wzajemnymi związkami. Autorzy zwracają również uwagę na fakt, że dotyczy to głównie redukcji ewapotranspiracji nieprzekraczających 50%. W przypadku wyższych wartości redukcji zależności te są bardziej złożone. Wartości współczynnika k_y zależą od badanej rośliny i jej stadium rozwoju oraz w pewnym stopniu od prędkości wiatru i wilgotności powietrza. Podobnie wypowiada się TRYBAŁA [1996], który stwierdza, że „...zależność między plonem a wielkością ewapotranspiracji ma w określonych warunkach klimatycznych i agrotechnicznych charakter liniowy. W tych warunkach plon rośnie proporcjonalnie do faktycznie zużytej wody. Należy jednak zaznaczyć, że ma to miejsce przy zachowaniu odpowiedniego poziomu agrotechniki, zwłaszcza zaś nawożenia. Poprawa samych tylko warunków wodnych bez uwzględnienia nawożenia (zwłaszcza azotowego) może powodować załamanie się krzywej plonów, co wynika m.in. z doświadczeń prowadzonych przez wiele lat w rejonie Wrocławia na glebach lekkich i średnich”.

We wzorze (2.14) wielkość redukcji plonu może służyć jako wskaźnik suszy rolniczej YR (*Yield Reduction*), który jest zdefiniowany w postaci wzoru:

$$YR = 1 - \frac{Y_{re}}{Y_p} \quad (2.15)$$

Prawa strona równania (2.14) przedstawia wielkość redukcji ewapotranspiracji, spowodowanej niedoborem wody w glebie, która jest znana jako wskaźnik suszy roślinnej *CDI* (wzór 2.10). Zależność (2.14) można więc przedstawić w postaci:

$$YR = k_y \cdot CDI \quad (2.16)$$

2.8. ZWIĄZKI MIĘDZY SUSZĄ METEOROLOGICZNĄ I SUSZĄ ROLNICZĄ

Przegląd literatury pokazuje, że na świecie przeprowadza się badania relacji między suszą meteorologiczną i glebową oraz jej wskaźnikami a suszą rolniczą skwantyfikowaną redukcją ewapotranspiracji, plonu aktualnego lub plonu końcowego. Celem ich jest wykazanie, jaka jest reprezentatywność wskaźników suszy meteorologicznej i glebowej w odniesieniu do suszy rolniczej [BRUNINI i in., 2005; KLESCHENKO, ZOIDZE, BOKEN, 2005; MILLER i in., 2003; RODRÍGUEZ-PINEDA i in., 2005; SABĂU i in., 2005; SIMS, NIYOGI, RAMAN, 2002; SZALAI, SZINEL, ZOBOKI, 2003]. Uzyskane wyniki są różne i zależą m. in. od właściwego doboru wskaźnika suszy meteorologicznej do badanej rośliny.

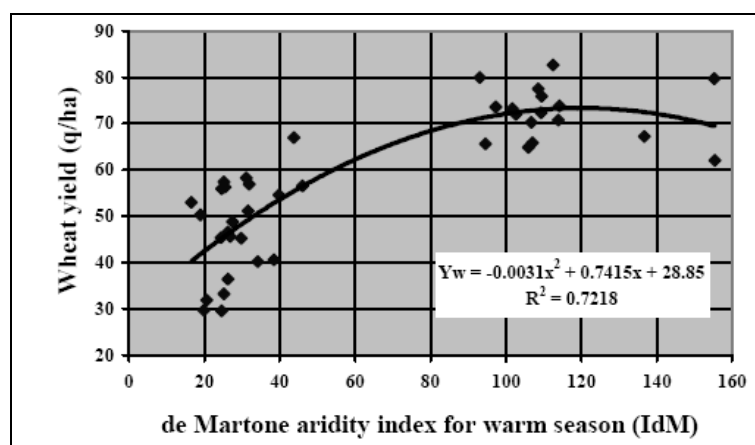
W Rumunii badania między wskaźnikami suszy meteorologicznej (nazywanej przez autorów suszą klimatyczną – *climate drought*) i plonem końcowym wybranych roślin przeprowadzili SABĂU i in. [2005]. Wskaźnikami suszy meteorologicznej były: wskaźnik suchości de Martone (*IdM*), hydrotermiczny Sielianinowa (*IhS*), klimatyczny Donciu (*IcD*), hydroheliotermiczny Domuty (*IhD*), suszy Palfai (*PAI*). Badania przeprowadzono na uprawach 3 roślin: pszenicy, kukurydzy i kapusty. Przyjęto wielomian drugiego stopnia jako najlepiej aproksymujący zależności między wskaźnikami suszy i plonem; wyjątkiem jest korelacja ze wskaźnikiem Palfai, która ma postać funkcji wykładniczej. Największą korelację w okresie wegetacyjnym (IV-IX) stwierdzono na uprawach kukurydzy dla wskaźnika *PAI* ($R = 0,91$), najmniejszą na uprawach pszenicy dla wskaźnika *IhD* ($R = 0,50$) (tab. 2.12).

Tabela 2.12. Współczynniki korelacji R między meteorologicznymi wskaźnikami suszy (z uwzględnieniem dawek nawadniania roślin) i wielkością plonu w warunkach nawadniania; (IV-IX) 1975-2000; Rumunia (Oradea) [SABĂU i in., 2005]

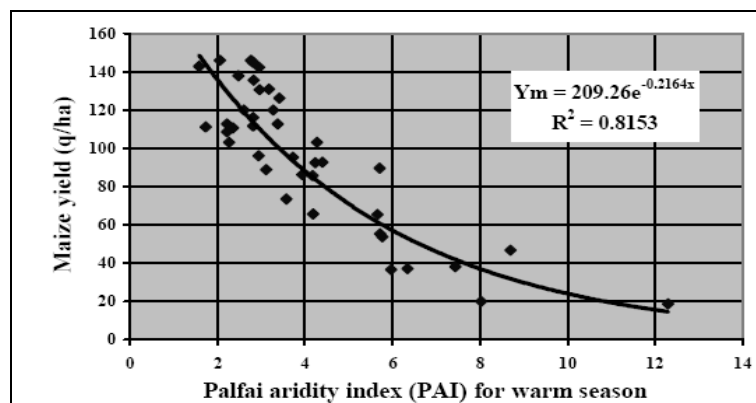
Pszenica		Kukurydza		Kapusta	
Wskaźnik suszy	R	Wskaźnik suszy	R	Wskaźnik suszy	R
IdM	0,85	IdM	0,84	IdM	0,84
Ihs	0,69	Ihs	0,84	Iks	0,85
IcD	0,68	IcD	0,85	IcD	0,87
IhD	0,67	IhD	0,82	IhD	0,87
PAI	0,50*	PAI	0,91	PAI	0,79

* - nieistotny statystycznie

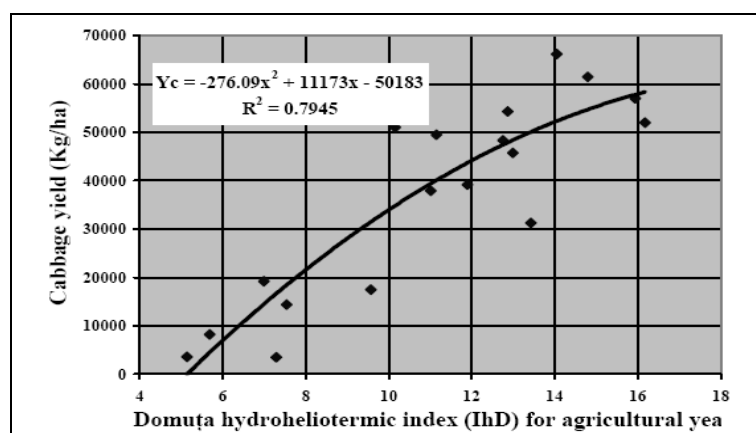
Dla pszenicy największą korelację osiągnięto dla wskaźnika de Martone (IdM) - ($R = 0,85$). Maksymalny plon odpowiada wartości wskaźnika IdM w przedziale od 110 do 130 $dt \cdot ha^{-1}$ (rys. 2.2). Dla kukurydzy wszystkie korelacje ze wskaźnikami suszy meteorologicznej były bardzo istotne. Największą wartość współczynnika korelacji uzyskano dla wskaźnika Palfai; dla $PAI = 14$ (okres uznawany jako ekstremalnie suchy) zanotowano najniższy plon (rys. 2.3). Dla kapusty największą zależność w relacji plon $\leftrightarrow$ opady zanotowano dla wskaźnika Domuta (DhI) (rys. 2.4).



Rys. 2.2. Krzywa regresji między wskaźnikiem de Martone (IdM) i wartością plonu pszenicy w wieloleciu 1975-2000 [SABĂU i in., 2005].



Rys. 2.3. Krzywa regresji między wskaźnikiem Palfai (*PAI*) i wartością plonu kukurydzy w wieloleciu 1975-2000 [SABĂU i in., 2005].



Rys. 2.4. Krzywa regresji między wskaźnikiem Domuța (*DhI*) i wartością plonu kapusty w wieloleciu 1989-2000 [SABĂU i in., 2005].

MILLER i in. [2003] badał zależność między kumulowanym wskaźnikiem suchości AI_n (susza meteorologiczna) i wskaźnikiem YLD (susza rolnicza), który jest odchyleniem procentowym od trendu liniowego plonu zbóż w środkowo-zachodnich stanach USA w wieloleciu 1980-1999. Wartość AI_n oblicza się według wzoru:

$$AI_n = \sum_{i=1}^n k_i AI_i \quad (2.17)$$

gdzie:

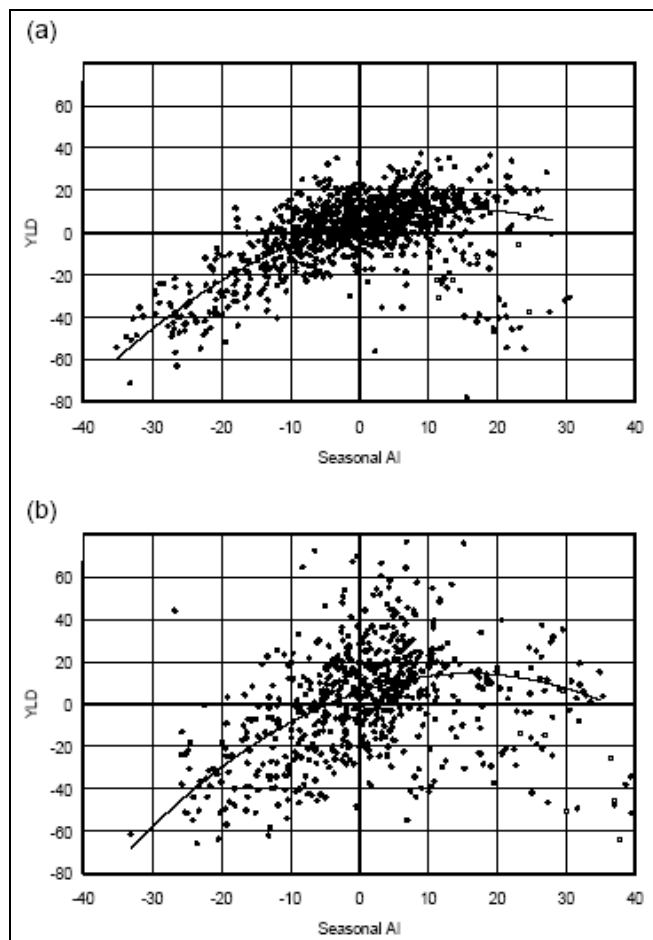
AI_i – wskaźnik suchości (*Aridity Index*), liczony wg wzoru (4) w i – tygodniu okresu wegetacji rośliny,

i – numer tygodnia okresu wegetacji rośliny,

n – liczba tygodni w okresie wegetacji rośliny,

k – stabelaryzowany współczynnik, którego wartość jest określona dla każdego tygodnia okresu krytycznego pod względem temperatury i opadów.

W okresach cieplejszych i jednocześnie bardziej suchych od warunków normalnych pogody w danym regionie wartości wskaźnika są ujemne, a w okresach bardziej wilgotnych i chłodniejszych są dodatnie. Z uzyskanych wykresów zależności $YLD = f(AI_n)$ można określić jak bieżące wartości wskaźnika AI_n wpłyną na plon końcowy (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Rozkład AI_n i YLD w USA w stanach: a) – wschodnich, b) – zachodnich
[MILLER i in., 2003]

BRUNINI i in. [2005] analizując zjawisko suszy rolniczej w Brazylii sugeruje, aby relacje między suszą meteorologiczną i rolniczą oceniać na podstawie kilku wskaźników suszy meteorologicznej, np.: *CMI*, *SPI* i *PDSI*.

Praktycznie pomysł ten wykorzystuje się w Rosji, gdzie korzysta się z zespołu kilku wskaźników suszy meteorologicznej i glebowej do oceny ryzyka redukcji plonu [KLESCHENKO, ZOIDZE, BOKEN, 2005]. Suszę meteorologiczną ocenia się na podstawie wskaźnika hydrotermicznego Sielianinowa, wskaźnika wilgotności Szaszkowa, wskaźnika nawadniania Protserowa. Ponadto uwzględnia się liczbę dni ze względną wilgotnością powietrza $< 30\%$ i liczbę dni z temperaturą $> 30^{\circ}\text{C}$. Susza glebowa charakteryzowana jest

przez zapasy wody użytecznej w glebie w warstwach 0-20 cm, 0-50 cm i 0-100 cm w okresie zimy, wczesnej i późnej wiosny. Wartości wymienionych wskaźników oblicza się w kolejnych dekadach okresu wegetacji i służą one do oceny suszy według przyjętej klasyfikacji, w której wyróżnia się: suszę ekstremalną, silną, umiarkowaną, słabą i okres bez suszy.

Interesujące z punktu widzenia problemów podjętych w dysertacji były badania, które miały odpowiedzieć na pytanie, czy można prognozować wielkość plonu za pomocą wskaźnika suszy meteorologicznej *SPI*. W Meksyku przeprowadzono takie badania w oparciu o plony kukurydzy i fasoli [RODRÍGUEZ-PINEDA i in., 2005]. Wartości *SPI* analizowano w okresach 3, 4, 5 i 6 miesięcy. Wyniki wykazały dodatnie i jednocześnie niskie korelacje (od 0,26 do 0,54) między wielkością plonów obu roślin i *SPI* obliczanego dla okresu 3 miesięcy (*SPI*-3); dla dłuższych okresów czasu korelacje były jeszcze niższe. Autorzy sugerowali dwie przyczyny tak niskich zależności. Po pierwsze wielkości badanych plonów były średnimi plonami w badanym regionie; sugerowano, aby zbadać te same zależności w oparciu o plony lokalne. Po drugie uważali, że wartości *SPI* zależą tylko od opadów, podczas gdy plon jest poddany działaniu wielu czynników. Podsumowując stwierdzili, że wskaźnik *SPI* nie może być dobrym prognostykiem wielkości plonów i z tego powodu nie może być wykorzystywany do prognozowania suszy rolniczej w Meksyku.

SZALAI, SZINEL i ZOBOKI [2003] badając zmiany wilgotności gleby w okresie wegetacyjnym (IV-IX), ocenili przydatność wskaźnika *SPI* do detekcji i monitoringu suszy rolniczej na Węgrzech. Wilgotność gleby była mierzona na głębokości 0,5 m, a wskaźniki *SPI* obliczane dla okresu 1, 2, 3 i 6 miesięcy. Otrzymane wartości współczynnika korelacji były bardzo zróżnicowane i zależały zarówno od badanego regionu, jak i od długości terminu, dla którego obliczano wartości wskaźnika *SPI*. Największą i statystycznie istotną korelację w okresie wegetacyjnym stwierdzono dla *SPI* obliczanego dla dwóch miesięcy ($R = 0,5 \div 0,6$). Przy okazji stwierdzono też bardzo niską zależność między wartością wskaźnika *PDSI*, obliczanego w całym okresie wegetacyjnym i wilgotnością gleby ($R = 0,1 \div 0,5$). Autorzy badali również te same zależności skupiając się na miesiącach letnich (VI-VIII). Wartości współczynników korelacji były również najwyższe dla *SPI* obliczanego w okresie dwóch miesięcy ($R = 0,6 \div 0,7$), natomiast nadal niskie dla wskaźnika *PDSI* obliczanego w tych miesiącach ($R = 0,0 \div 0,2$).

Zgoda inne wyniki uzyskano w USA, w badaniach na terenie stanu Północna Karolina [SIMS, NIYOGI, RAMAN, 2002]. Analizowano zmiany wilgotności gleby w korelacji z miesięcznymi i dwu-, trzy-tygodniowymi wartościami *SPI*, oraz z miesięcznymi wartościami

PDSI. Hipoteza robocza zakładała, że wskaźnik *SPI* może być uznany jako zamienny wskaźnik wilgotności gleby, ponieważ w krótkich okresach czasu dodatnie wartości wskaźnika *SPI* świadczą o wyższej wilgotności gleby i odwrotnie. Otrzymane wyniki wykazały, że zarówno *SPI*, jak i *PDSI* mogą być używane do oceny wilgotności gleby. Charakter zmian w glebie najlepiej oddaje wskaźnik *SPI* obliczany w krótkich okresach czasu. Współczynnik korelacji między wartościami *SPI*, obliczanymi w okresach dwu, trzytygodniowych i znormalizowanymi wartościami wilgotności gleby wynosił 0,71. Natomiast wartości wskaźnika *PDSI* aproksymują ogólny trend rozkładu opadów i nie reagują na wahania opadów w badanych okresach.

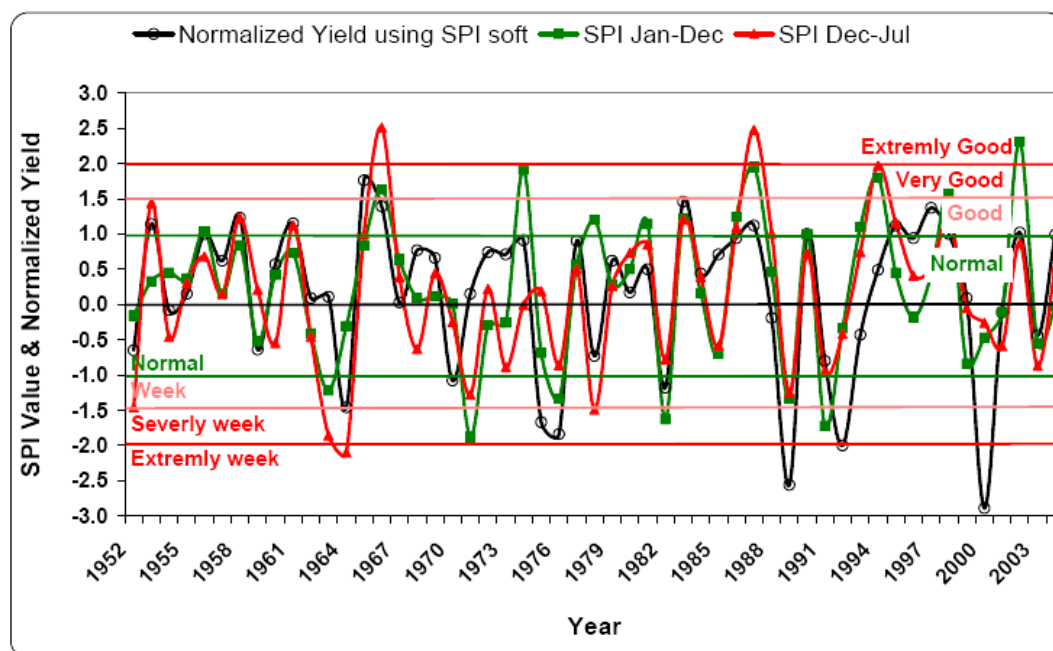
Autorzy badań widzą przydatność wskaźnika *SPI*, jako wskaźnika wilgotności gleby, nie tylko na badanym obszarze, ale sugerują jego zastosowanie na całym obszarze północno-wschodniej części USA. Jednocześnie zalecają przeprowadzenie badań na różnych rodzajach gleb i z wykorzystaniem danych dotyczących wilgotności gleby na innych poziomach.

Jedną z najnowszych prac dotyczących związków wskaźnika *SPI* z plonowaniem roślin jest praca NAINA, KERSEBAUMA i MIRSCHELA [2005]. Autorzy badali związki między wartościami wskaźnika *SPI*, obliczanymi w różnych przedziałach czasowych (od wartości w skali miesiąca do wartości w skali roku) z rzeczywistymi i modelowymi plonami pszenicy w latach 1985-2001 w rejonie Märkisch-Oderland (północne Niemcy). Symulację plonów przeprowadzono za pomocą nowego modelu CERES-Wheat na podstawie ponad 50-letnich historycznych ciągów opadów i prognoz opadów w kolejnym pięćdziesięcioleciu. W modelu wykorzystuje się różne wskaźniki suszy (*CSDI*), w tym również wskaźnik *SPI*.

Na podstawie wartości *SPI* zidentyfikowano w badanym okresie kilka susz meteorologicznych o różnym natężeniu, lecz żadna z nich dokładnie nie wyjaśniała warunków powstawania suszy rolniczej. Przede wszystkim stwierdzono różną częstość obu rodzajów susz w badanych latach, ponadto w dwóch przypadkach wskaźnik *SPI* informował o silnej i ekstremalnej suszy meteorologicznej, podczas gdy w tych latach uzyskano dobre plony pszenicy. Fakt ten autorzy wyjaśniają tym, że w całym roku (I-XII) faktycznie stwierdzono niższe od przeciętnych sumy opadów, lecz w okresie wegetacji pszenicy (XII-VII) były one przeciętne.

Analizowano również relacje normalizowanych plonów pszenicy generowanych modelem CERES-Wheat i rzeczywistej suszy meteorologicznej opisaną wskaźnikiem *SPI* w latach 1952-2004 (rys. 2.6). Największe różnice między obiema suszami stwierdzono w okresach, w

których wartości *SPI* był obliczane w odniesieniu do sezonu wegetacji i roku. Są one spowodowane nierównomiernym rozkładem opadów w tych okresach.



Rys. 2.6. Analiza suszy meteorologicznej (*SPI*) i rolniczej (normalizowane plony pszenicy) w latach 1952-2004 [NAIN, KERSEBAUM, MIRSCHEL, 2005]

Mimo stwierdzonych różnic w ocenie suszy meteorologicznej i rolniczej, autorzy nie odrzucają metody standaryzacji opadów, przede wszystkim ze względu na możliwość stosowania wskaźnika *SPI* w różnych przedziałach czasowych.

Przegląd literatury pokazał, że stosowane w Polsce i na świecie wskaźniki suszy meteorologicznej służą w większości przypadków do oceny wrażliwości obszarów na wystąpienie suszy i odnoszą się faktycznie do zjawisk *post factum*. Jak na razie nieliczne są próby wykorzystania ich do bieżącego monitorowania suszy meteorologicznej i przewidywania jej dalszego przekształcania się w suszę glebową i rolniczą. Można jednak zauważyć, że coraz częściej próbuje się wykorzystać, jak na razie z różnym skutkiem, przydatność wskaźnika standaryzowanego opadu *SPI* do ocen rozwoju suszy meteorologicznej i jej skutków w postaci suszy glebowej i rolniczej.

Wydaje się, że istnieją poważne przesłanki, aby sądzić, że wskaźnik *SPI* może służyć zarówno do monitorowania suszy meteorologicznej, jak i rolniczej, pod warunkiem dokładniejszego zbadania zależności między tymi suszami. Przede wszystkim należałoby odejść od powszechnie stosowanych i nie zawsze zasadnych okresów badań nad zmiennością

opadów, na przykład w skali miesiąca, dwóch miesięcy itd., a okresy te dopasować do faz fenologicznych rozwoju danej rośliny. Szczególnie ważne jest to na tych obszarach, gdzie obserwuje się dużą zmienność opadów, a susze lub kilkudziesięciodniowe posuchy występują nieregularnie. Ponadto susza powinna być traktowana jako proces ciągły, w związku z tym badania powinny uwzględniać zarówno bieżące, jak i poprzednie warunki opadowe.

Przedstawione w tym rozdziale wyniki i analizy pokazują zakres nierozwiązanych a ważnych problemów na styku susz meteorologicznych i rolniczych oraz uzasadniają celowość rozwiązania sformułowanych w pracy problemów.

3. WARUNKI METEOROLOGICZNE I GLEBOWE UPRAWY BURAKA CUKROWEGO NA KUJAWACH

3.1. CHARAKTERYSTYKA UPRAWY BURAKA CUKROWEGO NA KUJAWACH

Wybór buraka cukrowego do badań nad związkami między suszą meteorologiczną i rolniczą nie jest przypadkowy. Jest to roślina uprawy polowej, której okres wegetacji prawie pokrywa się z okresem wegetacyjnym (IV-IX), jest wrażliwa na deficyty wody w glebie, a zarazem ma duże znaczenie gospodarcze, stanowi ważny element struktury zasiewów i dobrze reaguje na nawodnienia [GRUSZKA, 1996]. Uprawa buraka cukrowego na Kujawach zajmuje w strukturze zasiewów około 9% i jest dominującą wśród upraw okopowych nie tylko w tym regionie, ale także w województwie kujawsko-pomorskim. Ma również duże znaczenie komercyjne w rolnictwie Kujaw (przynosi duże zyski, rolnicy zorganizowani są w grupy producenckie) [RUDNICKI, SKINDER, 2001].

Długość okresu wegetacji buraka cukrowego wynosi 150 - 180 dni, przy czym na nizinach Polski trwa przeciętnie 170 dni i kończy się zbiorem około 20 października [DZIEŻYC, 1989]. W okresie wegetacji buraka cukrowego, który w warunkach Kujaw średnio rozpoczyna się siewem między 20 a 25 kwietnia, można wyróżnić kilka faz fenologicznych i okres krytyczny, czyli okres zwiększonego zapotrzebowania na wodę. Na podstawie badań DRUPKI [1976], GĄSOWSKIEGO i OSTROWSKIEJ [1993], KOŹMIŃSKIEGO [za BAC, 1982], ŁABĘDZKIEGO [1996] dla upraw buraka cukrowego na Kujawach można wydzielić średnie terminy początku i końca faz fenologicznych, okresu krytycznego i okresu wegetacji, które przyjęto w pracy (tab. 3.1.1).

Burak cukrowy jest wrażliwy na wiosenne przymrozki, surowy ostry klimat oraz suszę w okresie lata i jesieni. Wymaga długiego okresu wegetacji i obfitych opadów od czerwca do sierpnia oraz umiarkowanych w okresie wiosennym i jesiennym. Roślina udaje się na glebach żyznych, głębokich, zwięzłych, zasobnych w składniki pokarmowe o odczynie zbliżonym do obojętnego i uregulowanych stosunkach wodnych. Zazwyczaj uprawia się ją na glebach kompleksów pszennych (bardzo dobrych i dobrych) oraz żytnim bardzo dobrym, natomiast do upraw nie nadają się gleby podmokłe lub piaszczyste. Korzeń właściwy, który jest częścią korzenia głównego może osiągać długość do 1 m, co pozwala na penetrację wodną na glebach z niskim poziomem wody gruntowej. Najlepsze warunki wilgotnościowe dla buraków występują przy poziomie wody gruntowej na głębokości 150-200 cm i połowej pojemności wodnej wynoszącej 70-80% [DZIEŻYC, 1993].

Tabela 3.1.1. Średnie terminy faz fenologicznych, okresu krytycznego i okresu wegetacji buraka cukrowego na Kujawach

Termin	Stadia rozwojowe	Faza fenologiczna
21.04 - 10.05	siew i kiełkowanie	I
11.05 - 20.06	wschody	IIa
21.06 - 20.07	3 para liści i początek grubienia korzeni	IIb
21.07 - 31.08	zółknięcie liści	III
01.09 - 20.10	dojrzwanie i zbiór	IV
21.06 – 10.09	okres krytyczny	
20.04 -20.10	okres wegetacji	

Istotny wpływ na wysokość plonu buraków cukrowych ma termin siewu. Opóźnienie wysiewu przyczynia się do spadku plonów, np. 10 dniowe opóźnienie powoduje redukcję plonu o 10-15% [KOŹMIŃSKI, 1986].

Roślina jest wymagająca pod względem potrzeb wodnych i wrażliwa na warunki uwilgotnienia gleby. Na kompleksach gleb pszenno-żytnich kilkunastodniowe posuchy sprzyjają pozyskiwaniu plonów buraków cukrowych w granicach średniej wartości i powyżej. Według KOŹMIŃSKIEGO [1986] 25-dniowe posuchy powodują spadek plonu o 5%, 30-dniowe - 10%, a 35-dniowe - 15%. Szczególnie niekorzystny wpływ mają posuchy atmosferyczne w okresie zwiększonego zapotrzebowania na wodę, nazywanym okresem krytycznym, w którym

następuje silne grubienie korzeni rośliny. Długość tego okresu, według różnych autorów, wynosi od 60 do 90 dni.

W warunkach Kujaw uprawa buraka cukrowego zagrożona jest okresowymi niedoborami wody. Średnie wieloletnie niedobory opadów atmosferycznych dla buraka cukrowego w okresie VI-IX wynoszą na glebach bardzo lekkich 75-100 mm, a na glebach lekkich 60-85 mm [RZEKANOWSKI, DUDEK, ŻARSKI, 1996]. Z dwudziestoletnich badań ROGUSKIEGO [1980] prowadzonych w rejonie Bydgoszczy na glebie średniej gliniastej wynika, że w latach średnich ($p = 50\%$) niedobory wodne wynoszą dla buraka cukrowego 80 mm, w latach suchych ($p = 20\%$) 128 mm. GRUSZKA [1996] podaje, że na glebach lekkich, o zapasach wody łatwodostępnej *ZWŁD* wynoszącej 60-71 mm w 1 m profilu, w latach średnich ($p = 50\%$) niedobory wody w uprawach buraków cukrowych wynosiły 100 mm, a na glebach średnich (*ZWŁD* = 84-92 mm) - 89 mm.

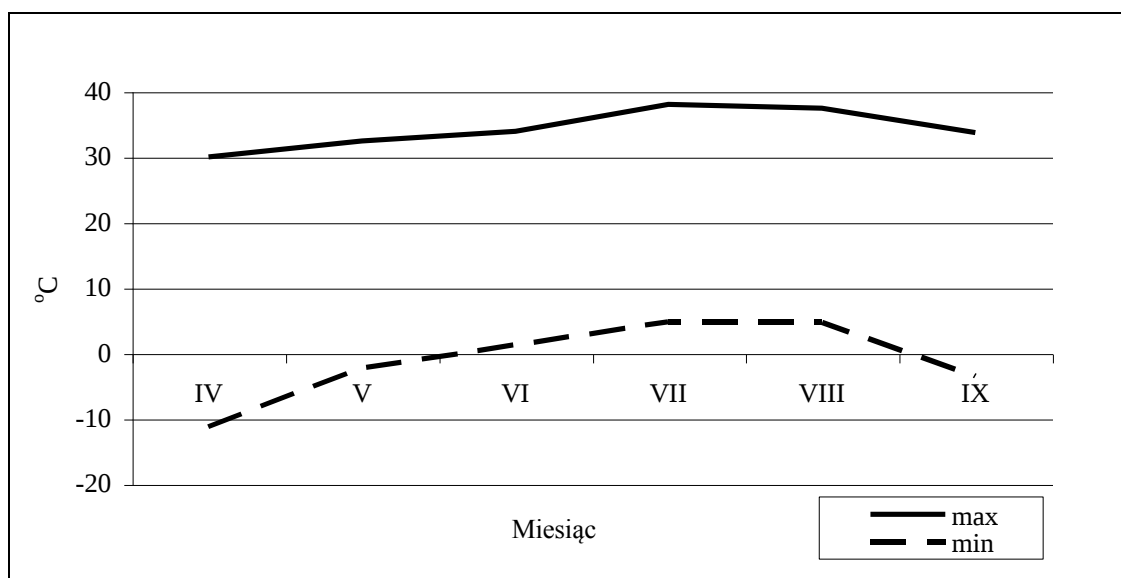
3.2. WARUNKI KLIMATYCZNE KUJAW

Kujawy należą do najsuchszych i najcieplejszych regionów w Polsce. Długotrwały brak opadów wywołany jest dominacją cyrkulacji antycyklonalnej (wyżowej) nad danym obszarem. Przy cyrkulacji wyżowej powietrza dominują ruchy osiadające i następuje znaczne obniżenie wilgotności względnej powietrza, co praktycznie uniemożliwia nasycenie powietrza wilgocią. W ten sposób zahamowane są procesy konwekcyjne, które prowadzą do powstawania lokalnych burz. Powstawaniu i rozwojowi suszy najbardziej sprzyja wyż wschodnioeuropejski, który nad Polskę kieruje gorące i suche masy powietrza z rejonu Bałkanów lub Azji Mniejszej lub utrzymujący się przez dłuższy okres Wyż Azorski. Serie postępujących po sobie wyżów mogą trwać przez kilka miesięcy - np. w 1992 r. wyże dominowały nad Polską od maja do końca sierpnia [BOBIŃSKI, MEYER, 1992; Mies. Przegl. Agrometeo., 1992]. Intensywność zjawiska zwiększa bardzo wysoka temperatura, często przekraczająca w dzień 30–33°C, a w nocy utrzymująca się na poziomie 20-18°C. Opady letnie na Kujawach charakteryzują się dużą wartością współczynnika zmienności opadów. Różnice między sumami opadów z poszczególnych lat dochodzą do 250%. Tak duża zmienność warunków związana jest z klimatem przejściowym umiarkowanym. Wegetacja roślin może przebiegać zatem w warunkach bardzo suchych (zwykle upalnych) lub bardzo wilgotnych (przeważnie chłodnych). Najniższe opady sezonu wegetacyjnego występują szczególnie w obrębie dolin rzecznych, rynien jeziornych i obniżen terenowych [PESZEK,

1996; KONOPKO, 1988]. Takie warunki klimatyczne według DRUPKI [1976] umiejscawiają Kujawy w I strefie celowości stosowania nawodnień deszczownianych w rolnictwie.

Region odznacza się również dobrymi warunkami energetycznymi i ciepłymi, które stawiają go w rzędzie najbardziej uprzywilejowanych pod tym względem rolniczych regionów kraju. W ocenie warunków ciepłych środowiska rolniczego doniosłą rolę spełniają sumy temperatur aktywnych przekraczających 10°C. Przy przeciętnych warunkach pogodowych przebieg jest zbliżony do bilansu promieniowania. Na obszarze Kujaw, na rubieży Bydgoszcz – Żnin – Kołuda Wielka – Kruszwica występują wartości najwyższe przekraczające 2500°C [PESZEK, 1996]. Podobne wartości spotyka się w uprzywilejowanych rejonach Polski, jak Nizina Śląska i Kotlina Sandomierska [BAC, 1982]. W okresie wegetacyjnym, w okresie najbardziej gorących dni temperatura wzrastała w regionie do +38°C (Bydgoszcz-IMUZ, 31 lipca 1994 r.) [ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI, 1996]. Według danych z lat 1945-1998, na stacji Bydgoszcz-IMUZ było średnio 6 dni upalnych z $t_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ i 39 gorących z $t_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$.

W okresie wiosennym notuje się dni z przymrozkami ($t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) (rys. 3.2.1). Liczba dni z przymrozkiem w znacznym stopniu zależy od warunków lokalnych. Częściej pojawiają się one w obniżeniach terenowych, rzadziej na wzniesieniach. Według KASPERSKIEJ [1996] przymrozki wiosenne w Bydgoszczy w latach 1945-1994 kończyły się średnio 19 maja, chociaż w 1986 r. pojawiły się nawet 22 czerwca.



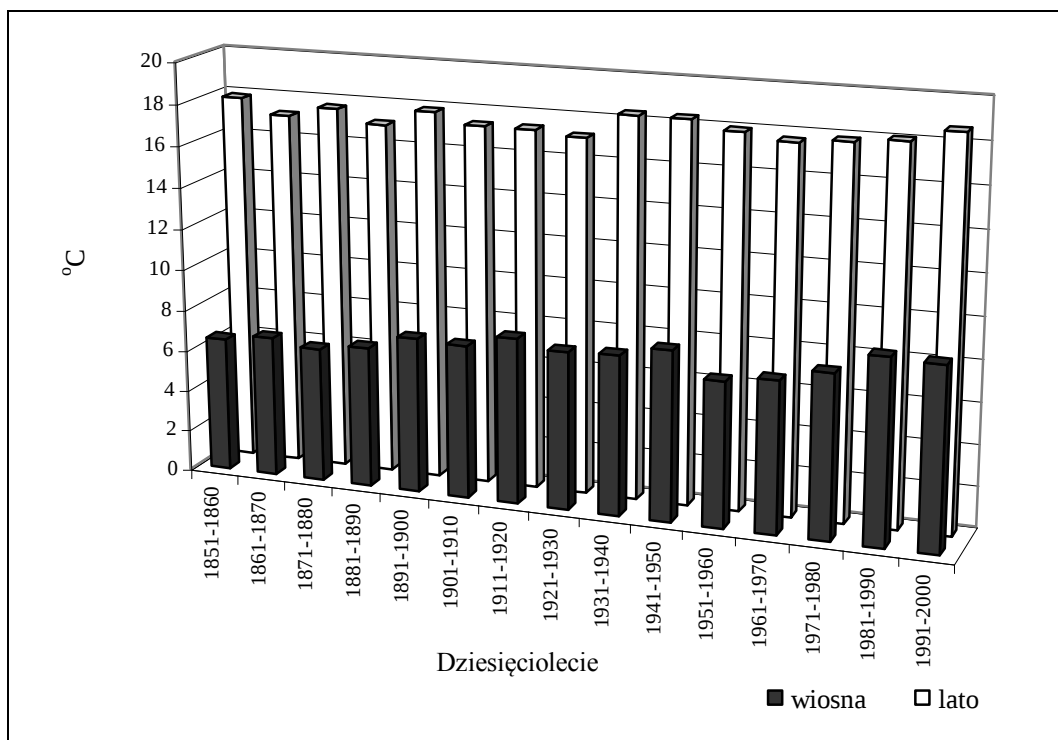
Rys. 3.2.1. Absolutna temperatura maksymalna i minimalna powietrza w Bydgoszczy w okresie wegetacyjnym (1945-1994) według KASPERSKIEJ [1996]

Dla rolnictwa duże znaczenie ma znajomość czasu trwania okresu wegetacyjnego (średnia dobową temperatura powietrza wynosi $\geq 5^{\circ}\text{C}$). Prace wielu autorów potwierdzają fakt, że początek tego okresu na Kujawach wypada w pierwszych dniach kwietnia, a kończy się około 4 listopada [ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI, 1996; WOŚ, 1994; ŻARSKI, DUDEK, KUŚMIEREK, 2000]. Długość okresu zmieniała się w poszczególnych latach - od 215 do 227 dni (tab. 3.2.1).

Tabela 3.2.1. Średni termin początku i końca oraz długość okresu wegetacyjnego w wybranych miejscowościach

Miejscowość	Początek	Koniec	Długość, dni	Okres	Źródło
Bydgoszcz-IMUZ	2 IV	3 XI	215	1945-1996	ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI [1996]
Mochełek	1 IV	4 XI	218	1951-2000	ŻARSKI, DUDEK, KUŚMIEREK [2000]
Poznań	31 III	5 XI	220	1951-1980	WOŚ [1994]

Badania średniej w dziesięciolecie rocznej temperatury wiosny (III-V) i lata (VI-VIII) na stacji Bydgoszcz-IMUZ w wieloleciu 1851-2000, pokazały, że w ostatnim trzydziestoleciu XX wieku pory te były wyjątkowo ciepłe. W poszczególnych dziesięcioleciach zanotowano wiosną: $7,9^{\circ}\text{C}$ w 1971-1980, $8,8^{\circ}\text{C}$ w 1981-1990 i $8,8^{\circ}\text{C}$ w 1991-2000; średnia temperatura w latach 1851-2000 wynosiła $7,5^{\circ}\text{C}$. Latem, w tych samych okresach czasu zanotowano $17,8$; $18,0$ i $18,6^{\circ}\text{C}$; średnia temperatura lata wynosiła $17,7^{\circ}\text{C}$ (rys. 3.2.2) [BAK, 2004].

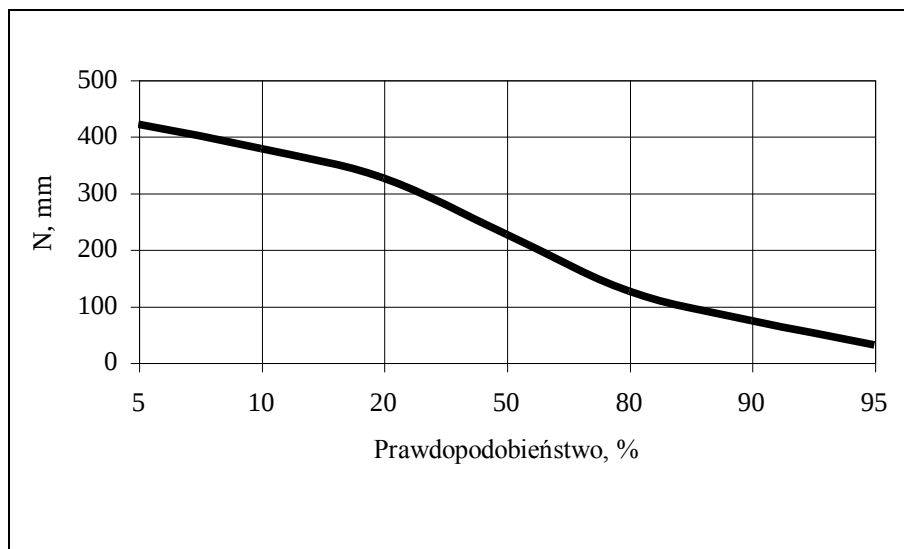


Rys. 3.2.2. Średnia z dziesięcioleci temperatura powietrza wiosną i latem na stacji Bydgoszcz-IMUZ w latach 1851-2000 [BAK, 2004]

Na stacji Bydgoszcz-IMUZ w latach 1945-1998 średnia ewapotranspiracja wskaźnikowa ET_o , liczona według wzoru Penmana, w okresie wegetacyjnym wynosiła 550 mm, zmieniając się w zakresie 444-638 mm [ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI, 1996]. Na pozostałych stacjach IMUZ, leżących w promieniu 20-30 km od Bydgoszczy, zanotowano następujące wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej: w okolicach Kruszwicy w latach 1959-1997 - średnio 496 mm (od 404 do 645 mm), we Frydrychowie w okresie 1972-1998 - 512 mm (od 423 do 609 mm). Większe wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej notowano w siedlisku suchym na stacji Bydgoszcz-IMUZ, a znacznie mniejsze w wilgotnych i mokrych siedliskach dolinowych użytkowanych łąkowo. Największe różnice występowały w latach suchych [BAK, 2004].

Na podstawie niedoborów klimatycznych opadów N obliczanych jako różnica między ewapotranspiracją wskaźnikową ET_o i sumą opadów P ($N = ET_o - P$) można wnioskować o niedoborach wody dla rolnictwa i potrzebie nawodnień roślin uprawnych i użytków zielonych. W okresie wegetacyjnym najbardziej prawdopodobne ($p = 50\%$) niedobory opadów na stacji Bydgoszcz-IMUZ wynoszą 226 mm, w rejonie Kruszwicy 201 mm, a we Frydrychowie 228 mm. W okresie lat bardzo suchych ($p = 10\%$), niedobory te wynoszą odpowiednio 378, 360 i 390 mm. Największe niedobory występują w maju, czerwcu i lipcu.

Niedobór klimatyczny opadów o różnym prawdopodobieństwie przewyższenia w okresie letnim (IV-IX) na stacji Bydgoszcz-IMUZ, obliczony z zastosowaniem rozkładu prawdopodobieństwa gamma, przedstawiono na rysunku 3.2.3 [BAK, 2004].



Rys. 3.2.3. Niedobór klimatyczny opadów N w okresie wegetacyjnym (IV-IX) o różnym prawdopodobieństwie przewyższenia na stacji Bydgoszcz-IMUZ (1945-1995) [BAK, 2004]

O rzeczywistych niedoborach wody dla roślin i potrzebach nawodnień można wnioskować dopiero po uwzględnieniu ewapotranspiracji poszczególnych upraw, opadu, zapasów wody użytecznej w glebie z okresu zimowego oraz zasilania przez wody gruntowe. Gleby piaszczyste i murszowate na piasku mają najmniejsze zdolności retencjonowania wody i dlatego w tych siedliskach występują największe niedobory wody i potrzeby nawodnień. Na dobrych glebach mineralnych (czarnych ziemiach, madach średnich i innych wytworzonych z gliny średniej i utworów pyłowych), charakteryzujących się dużymi zdolnościami retencyjnymi, niedobory wody są znacznie mniejsze niż obliczane niedobory klimatyczne.

3.3. WARUNKI GLEBOWE NA KUJAWACH

Na Kujawach dominujący jest krajobraz glacialny równinny. Są to przeważnie płaskie wysoczyzny morenowe zbudowane z glin zwałowych o znacznej miąższości, pokrytych w większości glebami płowymi, czarnymi ziemiami i glebami brunatnymi (tab. 3.3.1). Pozostałe typy, to gleby hydrogeniczne [GRUSZKA, 1996; KOBIERSKI, DĄBKOWSKA-NASKRĘT, 2003]. Gleby występujące na znacznej części obszaru posiadają nie tylko dużą zawartość próchnicy i składników pokarmowych, ale także są sprawne fizycznie i mało zakwaszone. Dla uprawy

buraka posiadają niezwykle cenną właściwość polegającą na wyjątkowo głębokiej warstwie ornej i rzadkim występowaniu podeszwy płużnej [RUDNICKI, SKINDER, 2001].

Tabela 3.3.1. Charakterystyka gleb najczęściej występujących na Kujawach na podstawie GRUSZKI [1996]

	Powierzchnia, %	Pochodzenie gleb	Przydatność rolnicza	Klasa bonitacyjna
Gleby płowe	68	W większości wytworzone z glin zwałowych, odgórnie płytko lub średnio głęboko spłaszczone, z piasków naglinowych oraz utworów pyłowych	Żytni bardzo dobry (4) i żytni dobry (5).	IIIa - IVb
Czarne ziemie	19	W większości z glin zwałowych moreny dennej, piasków zwałowych wodnolodowcowych, piasków starych tarasów akumulacyjnych, pyłów wodnego pochodzenia oraz ilów.	Od pszennego bardzo dobrego (1) do żytniego słabego (6).	II - IVb
Gleby brunatne	7	Z glin zwałowych w różnym stopniu spłaszczonych, piasków naglinowych i całkowitych, z pyłów wodnego pochodzenia oraz ilów zasobnych w węglany wapnia.	Od pszennego bardzo dobrego (1) do żytniego bardzo słabego (7).	II - VI

Gleby bardzo dobre i dobre (I-III klasa bonitacyjna) zajmują około 60% użytków rolnych w części Kujaw, zwanej Kujawami Czarnymi, chociaż w niektórych powiatach wielkość ta przekracza 75%. Biorąc pod uwagę kryteria przydatności rolniczej i bonitacji gleb, według GRUSZKI [1996] oraz RUDNICKIEGO i SKINDERA [2001] do nawodnień kwalifikuje się na Kujawach 55-65% areалу gruntów ornych.

Udział produkcyjnych zasobów glebowych na wspomnianym terenie jest najwyższy w województwie kujawsko-pomorskim i wynosi 12,3% [RUDNICKI, SKINDER, 2001].

Badania GRUSZKI [1996] na stanowiskach badawczych zlokalizowanych na Kujawach wykazały, że zapas wody gleb lekkich w stanie połowej pojemności wodnej wynosi 151-183 mm, w tym 120-142 mm wody ogólnie dostępnej i 60-70 mm wody łatwo dostępnej. Gleby średnie przy stanie połowej pojemności wodnej retencjonują 295-305 mm wody, w tym 168-184 mm wody ogólnie dostępnej i 84-92 mm wody łatwo dostępnej. Pod względem

granulometrycznym są to gleby, które są predysponowane do uprawy buraka cukrowego [DOBRZAŃSKI, ZAWADZKI, 1995; DZIEŻYC, 1989, 1993;]

4. MATERIAŁ BADAWCZY

Obiektem badawczym była uprawa buraka cukrowego na Kujawach Czarnych w latach 1954-2003. Analiza suszy meteorologicznej i rolniczej w oparciu o wskaźniki tych susz została dokonana przy użyciu materiału badawczego, który obejmuje parametry meteorologiczne, roślinne i glebowo-wodne.

4.1. PARAMETRY METEOROLOGICZNE

Materiał badawczy w zakresie parametrów meteorologicznych obejmuje dobowe sumy opadów w okresie 21.04-30.09 w latach 1954-2003 oraz dekadowe wartości następujących elementów:

- sum opadów w okresie 01.10-30.09 w wieloleciu 1953-2003,
- temperatury powietrza w okresie 21.04-30.09 w latach 1954-2003,
- ciśnienia pary wodnej w powietrzu w okresie 21.04-30.09 w latach 1954-2003,
- usłonecznienia w okresie 21.04-30.09 w latach 1954-2003,
- prędkości wiatru w okresie 21.04-30.09 w latach 1954-2003.

Wymienione powyżej parametry meteorologiczne są wykorzystywane do obliczania wartości wskaźnika suszy meteorologicznej SPI i ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_0 według wzoru Penmana-Monteitha oraz do symulacji zmian zapasów wody użytecznej w glebie oraz ewapotranspiracji rzeczywistej buraków cukrowych.

Przyjęto założenie, że dane meteorologiczne stacji Bydgoszcz-IMUZ są reprezentatywne dla obszaru Kujaw Czarnych, które obejmują obszar leżący między Inowrocławiem, Kruszwicą i Radziejowem Kujawskim. W tym rejonie w latach 1970-1995 znajdowała się stacja Polanowice-IMUZ, odległa od Bydgoszczy o około 50 km. W związku z faktem nasilenia się okresów suszy w latach: 2000, 2002 i 2003, uznano za wskazane uwzględnienie tego okresu w badaniach. Takim ciągiem pomiarowym natomiast dysponowała stacja Bydgoszcz-IMUZ w wieloleciu 1954-2003.

Aby sprawdzić, czy stacja Bydgoszcz-IMUZ reprezentuje warunki meteorologiczne na Kujawach Czarnych, przyjęto hipotezę zerową, że średnie sumy opadów μ i wariancje σ^2 w

okresie wegetacyjnym (IV-IX) w wieloleciu 1970-1995 były równe na obu stacjach na poziomie istotności $\alpha = 0,01$.

Warunkiem sprawdzenia tej hipotezy jest normalność rozkładów opadów. Ocenę zgodności obu rozkładów z rozkładem normalnym przeprowadzono testem normalności Lillieforsa zawartym w programie *Statistica* (KOBUS, PIETRZYKOWSKI, ZIELIŃSKI, 2001). W obu przypadkach otrzymana wartość prawdopodobieństwa błędu nieodrzućcia hipotezy zerowej $p > 0,2$, czyli jest większa od założonego prawdopodobieństwa $\alpha = 0,01$. Brak jest więc podstaw o odrzuceniu hipotezy o normalności rozkładów i można przyjąć, że oba rozkłady są normalne.

Istotność różnic średnich i wariancji badanych ciągów pomiarowych badano testem t i F dla prób niezależnych. Wyniki testów przedstawiono w tabeli 4.1.1.

Tabela. 4.1.1. Wyniki testu t i F istotności różnic średnich sum opadów i wariancji w okresie wegetacyjnym (IV-IX) w wieloleciu 1970-1995

Stacje	$p(\mu)$	$p(\sigma^2)$
Bydgoszcz-IMUZ	0,61	0,37
Polanowice-IMUZ		

$p(\mu)$ – prawdopodobieństwo błędu odrzucenia hipotezy zerowej o równości średnich.

$p(\sigma^2)$ – prawdopodobieństwo błędu odrzucenia hipotezy zerowej o równości wariancji

Przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,01$ stwierdzono, że zarówno $p(\mu) > \alpha$, jak i $p(\sigma^2) > \alpha$, czyli brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, że warunki opadowe na stacji Bydgoszcz-IMUZ są również reprezentatywne dla Kujaw Czarnych. Współczynnik korelacji opadów na obu stacjach jest wysoki ($r = 0,79$) i statystycznie istotny z $p < 0,01$.

Podobne testy przeprowadzono dla ciągów wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o , obliczonej metodą Penmana-Monteitha dla sum ET_o w sezonach wegetacyjnych (IV-IX) na obu stacjach w latach 1970-1995. Test normalności Lillieforsa pokazał, że brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu, co było warunkiem koniecznym pozwalającym na zastosowanie testu t i F dla prób niezależnych. Dalsze badania pokazały, że otrzymane wartości prawdopodobieństwa $p(\mu)$ i $p(\sigma^2)$ są większe od przyjętego poziomu istotności 0,01, co oznacza, że wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o obliczane dla Bydgoszczy są także reprezentatywne dla Kujaw (tab. 4.1.2).

Podobnie, jak w przypadku opadów, współczynnik korelacji jest również wysoki ($r = 0,71$) i jednocześnie statystycznie istotny z $p < 0,01$.

Tabela. 4.1.2. Wyniki testu t i F istotności różnic średnich sum ET_O i wariancji w okresie wegetacyjnym (IV-IX) w wieloleciu 1970-1995

Stacje	$p(\mu)$	$p(\sigma^2)$
Bydgoszcz-IMUZ	0,02	0,18
Polanowice-IMUZ		

$p(\mu)$ – prawdopodobieństwo błędu odrzucenia hipotezy zerowej o równości średnich.

$p(\sigma^2)$ – prawdopodobieństwo błędu odrzucenia hipotezy zerowej o równości wariancji

4.2. PARAMETRY ROŚLINNE

Parametrami roślinnymi wykorzystywanymi w badaniach były:

- data początku i końca okresu wegetacji buraka cukrowego,
- terminy faz fenologicznych w okresie wegetacji,
- głębokość korzenienia się rośliny w kolejnych dekadach okresu wegetacji,
- dekadowe współczynniki roślinne k_c w okresie wegetacji.

W okresie uprawy buraka przyjęto średnie terminy faz fenologicznych w wieloleciu:

- faza I: 21.04 - 10.05,
- faza IIa: 11.05 - 20.06,
- faza IIb: 21.06 - 20.07,
- faza III: 21.07 - 31.08,
- faza IV: 01.09 - 20.10.

Obliczenia i analizy wykonano w okresie od 21.04 do 30.09 (okres ten trwa 163 dni). O zakończeniu badań z końcem września decydują czynniki meteorologiczne i agrotechniczne, jakie występują w październiku. Stwierdzono, że przy średnich warunkach meteorologicznych w okresie od 1.10 do terminu zbioru, z powodu mniejszego usłonecznienia, niższej temperatury i możliwości pojawiania się przymrozków, przyrost masy korzeniowej buraka jest już nieznaczny, następuje też naturalne obsychanie liści. Zdarza się też, że kilka lub kilkanaście dni przed zbiorem, roślina jest pozbawiana liści w wyniku tzw. ogławiania. W tym okresie transpiracja jest już niewielka. Ponadto, przyjęta do obliczeń ewapotranspiracji metoda Penmana-Monteitha, może dawać ujemne wartości, co wynika z ujemnego bilansu

promieniowania. Wymienione czynniki powodują, że uzyskana dla tego okresu wielkość ewapotranspiracji jest mało wiarygodna.

Burak cukrowy jest rośliną o zmiennej w czasie głębokości korzenia się. Zmiany głębokości korzenia się rośliny d w kolejnych dekadach okresu wegetacji przyjęto za DOORENBOSEM i PRUITTEM [1977] oraz ROGUSKIM, SARNACKĄ i DRUPKĄ [1988]. W modelu przyjęto średni przyrost głębokości systemu korzeniowego równy około $10 \text{ cm} \cdot \text{dek}^{-1}$, aż do głębokości maksymalnej w okresie pełnego rozwoju rośliny (tab. 4.2.1).

Tabela 4.2.1. Współczynniki roślinne k_c do wzoru Penmana-Monteitha oraz głębokość ukorzenia buraka cukrowego d

Miesiąc	Dekada	k_c	d [m]
Kwiecień	1	0,00	0,0
	2	0,00	0,0
	3	0,40	0,1
Maj	1	0,46	0,1
	2	0,48	0,2
	3	0,50	0,3
Czerwiec	1	0,53	0,4
	2	0,74	0,5
	3	0,85	0,6
Lipiec	1	0,96	0,7
	2	1,15	0,8
	3	1,31	0,9
Sierpień	1	1,31	1,0
	2	1,34	1,0
	3	1,25	1,0
Wrzesień	1	1,23	1,0
	2	1,22	1,0
	3	1,19	1,0

Współczynnik roślinny k_c jest wykorzystywany do obliczenia ewapotranspiracji buraka cukrowego dających wysoki plon, możliwy do osiągnięcia przy zastosowaniu wysokiego nawożenia i przy nielimitującym poziomie pozostałych czynników agrotechnicznych (około $50 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Wyraża on wpływ zespołu czynników roślinnych (związanych z fazą rozwojową roślin) na ewapotranspirację w warunkach braku wpływu wilgotności gleby na natężenie tego procesu, czyli w przedziale stanów dostatecznego uwilgotnienia. Jego wartość zależy od wielkości biomasy, czyli od wielkości plonu roślin.

W pracy zastosowano współczynniki roślinne k_c określone dla kolejnych dekad okresu wegetacyjnego w odniesieniu do wzoru Penmana-Monteitha (tab. 4.2.1). Zostały one wyznaczone według zależności:

$$k_c^{PM} = k_c^P \frac{ET_o^P}{ET_o^{PM}} \quad (4.2.1)$$

gdzie:

k_c^{PM} - współczynnik k_c do metody Penmana-Monteitha,

k_c^P - współczynnik k_c do metody Penmana,

ET_o^{PM} - ewapotranspiracja wskaźnikowa obliczona metodą Penmana-Monteitha,

ET_o^P - ewapotranspiracja wskaźnikowa obliczona metodą Penmana

Współczynniki k_c^P zostały one wyznaczone przez ROGUSKIEGO, SARNACKĄ i DRUPKĘ [1988], ŁABĘDZKIEGO [1988, 1995] oraz ŁABĘDZKIEGO i ROGUSKIEGO [2001] na podstawie pomiarów lizymetrycznych ewapotranspiracji buraka cukrowego wykonanych w latach 1968-1985 na stacji Bydgoszcz-IMUZ, jako stosunek pomierzonej ewapotranspiracji do ewapotranspiracji wskaźnikowej obliczonej na podstawie wzoru Penmana.

Wartości stosunku ET_o^P i ET_o^{PM} zostały wyznaczone jako średnie dekadowe z lat 1954-2003 na podstawie dekadowych wartości ewapotranspiracji wskaźnikowej liczonej wzorem Penmana i Penmana-Monteitha w każdym roku badanego wielolecia.

Zagadnienie wykorzystania współczynników roślinnych k_c do obliczania ewapotranspiracji roślin opisano w wielu publikacjach krajowych i zagranicznych [ALLEN i in., 1998; BAC, 1982; DOORENBOS, PRUITT, 1977; FEDDES, LENSELINK, 1994; ROGUSKI, 1978; ROGUSKI, ŁABĘDZKI, 1988; ROGUSKI, SARNACKA, DRUPKA, 1988; ROJEK, 1987; ROJEK, WIERCIOCH, 1990]. Bezwzględne porównywanie współczynników roślinnych podawanych w literaturze może być nieraz trudne i niecelowe, gdyż ich wartości zależą od zastosowanego wzoru na ewapotranspirację wskaźnikową.

Stosowanie tych współczynników daje dobre rezultaty w wieloletnich obliczeniach ewapotranspiracji, na przykład do określenia średnich lub prawdopodobnych niedoborów wody. Zadowalające wyniki uzyskuje się również w bieżącej ocenie ewapotranspiracji w przeciętnych warunkach meteorologicznych i typowych warunkach rozwoju roślin. W

warunkach meteorologicznych znacznie odbiegających od przeciętnych ewapotranspiracja obliczona może się znacznie różnić od pomierzonej. W bieżącej ocenie ewapotranspiracji z wykorzystaniem tych współczynników należy krytycznie podchodzić do uzyskiwanych wyników. Zwrócił na to uwagę również ROJEK [1987].

4.3. PARAMETRY GLEBOWO-WODNE

Parametrami glebowo-wodnymi stosowanymi w pracy są:

- zapasy wody użytecznej *ZWU* w warstwach 0-10 cm w profilu o miąższości 0-100 cm,
- współczynniki dostępności wody *p*.

Badania przeprowadzono na 4 glebach występujących na Kujawach Czarnych, charakteryzujących się zróżnicowanym zapasem wody użytecznej *ZWU* w 1-m profilu i wynoszącym: 103, 137, 165 i 203 mm i zdolnością retencjonowania wody. W dalszej części pracy gleby te oznaczono symbolami: *G1*, *G2*, *G3*, *G4*. Badane gleby są zakwalifikowane jako czarne ziemie zdegradowane, charakteryzujące się gospodarką opadowo-retencyjną i głębokim lustrem wody gruntowej, niewpływającym na wilgotność warstwy korzeniowej. Według bonitacyjnej klasyfikacji gleb są to gleby klasy III i IV (dobre, średnio dobre i średniej jakości) zaliczane do kompleksu pszenno-żytniego. Pod względem składu granulometrycznego można je zaliczyć do gleb lekkich i średnich według podziału na agronomiczne kategorie ciężkości [DZIEŻYC, 1989, 1993; DOBRZAŃSKI, ZAWADZKI, 1995]. Charakterystykę retencyjności tych gleb przedstawiono w tabeli 4.3.1.

Zapasy wody użytecznej *ZWU* zostały obliczone dla każdej warstwy 10 cm jako różnica między zapasem wody przy $pF = 2,0$ i zapasem wody przy $pF = 4,2$:

$$ZWU = ZW_{pF\,2,0} - ZW_{pF\,4,2} \quad (4.3.1)$$

Następnie zapasy te sumowano w kolejnych warstwach (tab. 4.3.1) oraz w warstwach o miąższości równej głębokości korzenienia się buraków w kolejnych dekadach (tab. 4.3.2).

Współczynnik dostępności wody *p* przyjmuje wartości w przedziale $<0,1>$ i określa, jaka część zapasu wody użytecznej *ZWU* jest łatwo dostępna dla roślin. Zapasy wody łatwo dostępnej *ZWŁD* oblicza się ze wzoru:

$$ZWŁD = ZWU \cdot p \quad (4.3.2)$$

gdzie:

$ZWŁD$ - zapas wody łatwo dostępnej, mm

a zapas wody trudnodostępnej, korzystając ze wzoru:

$$ZWTD = (1 - p) \cdot ZWU \quad (4.3.3)$$

gdzie:

$ZWTD$ - zapas wody trudnodostępnej, mm

Współczynnik dostępności wody p jest zależny od fazy rozwojowej rośliny oraz głębokości i powierzchni czynnej korzeni. Jego wartość zmienia się od 0,2 dla roślin płytko korzeniących się i wrażliwych na niedobór wody (warzywa) do 0,9 dla roślin głęboko korzeniących się, odpornych na niedobór wody i korzystających z zapasów wody zgromadzonych w głębszych warstwach gleby. Użyte w pracy wartości współczynnika dostępności wody p dla buraków cukrowych podano za DOORENBOSEM i PRUITTEM [1977] oraz za ŁABĘDZKIM [1990] (tab. 4.3.2). Jest on silnie związany z warunkami dostępności wody i możliwością poboru wody przez korzenie. Charakteryzuje warunki wilgotności krytycznej gleby, przy której rozpoczyna się ograniczenie poboru wody przez korzenie i odpowiada potencjałowi wody glebowej równemu -0,1 MPa ($pF = 3,0$) [REWUT, 1980; SALISBURY, 1975]. Według tych autorów potencjał ten odpowiada sile ssącej korzeni roślin, przy której jest możliwy jeszcze nieograniczony pobór wody przez korzenie.

Tabela 4.3.1. Zapas wody w charakterystycznych stanach uwilgotnienia
i zapasy wody użytecznej ZWU

Gleba	Warstwa profilu [cm]	$ZW_{pF\ 2,0}$ [mm]	$ZW_{pF\ 4,2}$ [mm]	ZWU [mm]	ΣZWU [mm]
<i>G1</i>	0-10	22,6	10,4	12,2	12,2
	10-20	23,7	12,4	11,3	23,5
	20-30	23,2	12,3	10,9	34,4
	30-40	23,4	12,4	11,0	45,4
	40-50	27,0	19,1	7,9	53,3
	50-60	29,0	18,5	10,5	63,8
	60-70	27,8	17,8	10,0	73,8
	70-80	26,6	17,1	9,5	83,3
	80-90	26,6	17,0	9,6	92,9
	90-100	26,6	17,0	9,6	102,5
<i>G2</i>	0-10	29,3	11,8	17,5	17,5
	10-20	30,7	14,3	16,4	33,9
	20-30	29,3	14,2	15,1	49,0
	30-40	27,5	14,0	13,5	62,5
	40-50	26,7	13,2	13,5	76,0
	50-60	24,2	11,1	13,1	89,1
	60-70	25,0	12,0	13,0	102,1
	70-80	25,7	12,9	12,8	114,9
	80-90	25,1	13,4	11,7	126,6
	90-100	24,5	14,0	10,5	137,1
<i>G3</i>	0-10	29,4	12,5	16,9	16,9
	10-20	29,4	12,5	16,9	33,8
	20-30	29,4	12,5	16,9	50,7
	30-40	29,4	12,5	16,9	67,6
	40-50	29,4	12,5	16,9	84,5
	50-60	26,8	10,8	16,0	100,5
	60-70	26,8	10,8	16,0	116,5
	70-80	28,7	12,4	16,3	132,8
	80-90	28,7	12,4	16,3	149,1
	90-100	28,7	12,4	16,3	165,4
<i>G4</i>	0-10	22,6	8,1	14,5	14,5
	10-20	26,0	9,1	16,9	31,4
	20-30	26,0	9,1	16,9	48,3
	30-40	26,5	9,3	17,2	65,5
	40-50	30,0	8,2	21,8	87,3
	50-60	33,0	11,8	21,2	108,5
	60-70	32,0	10,2	21,8	130,3
	70-80	32,5	8,6	23,9	154,2
	80-90	32,0	8,1	23,9	178,1
	90-100	32,0	7,5	24,5	202,6

ΣZWU – zapas wody użytecznej w warstwie 0-10, 0-20, ..., 0-100 cm

Tabela 4.3.2. Parametry glebowo-wodne badanych gleb w kolejnych dekadach okresu wegetacji buraka cukrowego

Miesiąc	Dekada	p	d [m]	ZWU [mm] w glebie			
				$G1$	$G2$	$G3$	$G4$
Kwiecień	1	0,5	0,0	-	-	-	-
	2	0,5	0,0	-	-	-	-
	3	0,5	0,1	12,2	17,5	16,9	14,5
Maj	1	0,5	0,1	12,2	17,5	16,9	14,5
	2	0,5	0,2	23,5	33,9	33,8	31,4
	3	0,5	0,3	34,4	49,0	50,7	48,3
Czerwiec	1	0,5	0,4	45,4	62,5	67,6	65,5
	2	0,5	0,5	53,3	76,0	84,5	87,3
	3	0,5	0,6	63,8	89,1	100,5	108,5
Lipiec	1	0,5	0,7	73,8	102,1	116,5	130,3
	2	0,5	0,8	83,3	114,9	132,8	154,2
	3	0,5	0,9	92,9	126,6	149,1	178,1
Sierpień	1	0,5	1,0	102,5	137,1	165,4	202,6
	2	0,5	1,0	102,5	137,1	165,4	202,6
	3	0,5	1,0	102,5	137,1	165,4	202,6
Wrzesień	1	0,6	1,0	102,5	137,1	165,4	202,6
	2	0,6	1,0	102,5	137,1	165,4	202,6
	3	0,6	1,0	102,5	137,1	165,4	202,6

p – współczynnik dostępności wody,
 d – głębokość ukorzenienia buraka cukrowego,
 ZWU – zapas wody użytecznej.

5. METODYKA BADAŃ

5.1. WSKAŹNIK STANDARYZOWANEGO OPADU SPI (STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX)

Wskaźnik suszy meteorologicznej SPI obliczano dla sum opadów P w okresie od początku okresu wegetacji buraka cukrowego (21.04) do końca każdej fazy fenologicznej lub do końca okresu wegetacyjnego w roku bieżącym w wieloleciu 1954-2003. Okresy te to:

- okres I, obejmujący fazę fenologiczną I: 21.04 - 10.05,
- okres IIa, obejmujący fazę fenologiczną I i IIa: 21.04 - 20.06,
- okres IIb, obejmujący fazę fenologiczną I, IIa i IIb: 21.04 - 20.07,
- okres III, obejmujący fazę fenologiczną I, IIa, IIb i III: 21.04 - 31.08,
- okres IV, obejmujący fazę fenologiczną I, IIa, IIb, III i IV: 21.04 - 30.09, czyli cały okres wegetacji buraka cukrowego.

Opad atmosferyczny jako zjawisko meteorologiczne jest zmienną losową o dolnym ograniczeniu i na ogół dodatniej asymetrii i nie podlega rozkładowi normalnemu, lecz rozkładowi gamma [KACZMAREK, 1970; GUTTMAN 1999]. Sprawdzono dopasowanie badanych ciągów opadów w wydzielonych okresach do rozkładu gamma testem χ^2 , który nie dał podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności rozkładu gamma z próbą losową. Następnie przeprowadzono normalizację tych ciągów, stosując funkcję przekształcającą $f(P)$:

$$f(P) = \sqrt[3]{P} \quad (5.1.1)$$

Zgodność rozkładu zmiennej przekształconej funkcją $f(P)$ z rozkładem normalnym była zbadana testem normalności Lillieforsa zawartym w pakiecie *Statistica* [KOBUS, PIETRZYKOWSKI, ZIELIŃSKI, 2001]. Nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu.

Standaryzacji zostały poddane znormalizowane ciągi sum opadów P . Wartości wskaźnika standaryzowanego opadu SPI dla danej wartości opadu P były obliczane za pomocą równania:

$$SPI = \frac{f(P) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (5.1.2)$$

gdzie:

$f(P)$ – przekształcona suma opadów, mm,

$\hat{\mu}$ - średnia wartość znormalizowanego ciągu opadów, mm,

$\hat{\sigma}$ - średnie odchylenie standardowe znormalizowanego ciągu opadów, mm.

Klasyfikację okresów suszy przyjęto za MCKEE [1993] i według zaleceń *ICID* [HOW TO WORK..., 1998], jednocześnie wprowadzając następujące określenia: *D* (drought) – okres suchy, susza; *W* (wet) – okres mokry; *N* – okres normalny. Cyfra przy symbolu literowym oznacza wzrost intensywności zjawiska (tab. 5.1). Susza może być opisywana jako charakterystyczny okres czasu (np. okres umiarkowanie suchy, bardzo suchy,...) lub według intensywności zjawiska (np. susza umiarkowana, silna,...). Pojęcia te są tożsame i tak są stosowane w dalszej części pracy.

Tabela 5.1.1. Klasyfikacja okresów według *SPI*
[MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993, 1995; HOW TO WORK..., 1998]

Rodzaj okresu	Susza	<i>SPI</i>	Symbol*
Ekstremalnie suchy	Ekstremalna	$\leq -2,0$	<i>D3</i>
Bardzo suchy	Silna	$-1,99 \div -1,5$	<i>D2</i>
Umiarkowanie suchy	Umiarkowana	$-1,49 \div -1,0$	<i>D1</i>
Normalny	-	$-0,99 \div 0,99$	<i>N</i>
Umiarkowanie mokry	-	$1,0 \div 1,49$	<i>W1</i>
Bardzo mokry	-	$1,5 \div 1,99$	<i>W2</i>
Ekstremalnie mokry	-	$\geq 2,0$	<i>W3</i>

* - wg autora

5.2. WSKAŹNIKI SUSZY ROLNICZEJ

Wskaźniki suszy rolniczej obliczono w tych samych okresach czasu, co wskaźnik *SPI*.

Wskaźnik *CDI*, określający wielkość redukcji ewapotranspiracji w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej, obliczono według wzoru:

$$CDI = 1 - \frac{ET}{ET_p} \quad (5.2.1)$$

gdzie:

ET – suma ewapotranspiracja rzeczywistej w okresie, mm,

ET_p – suma ewapotranspiracja potencjalnej w okresie w warunkach dostatecznego uwilgotnienia gleby (powyżej wilgotności krytycznej), mm.

Ewapotranspiracja rzeczywista *ET* była liczona od początku okresu wegetacji (21.04) do końca każdej fazy fenologicznej lub do końca okresu wegetacyjnego, każdego roku w wieloleciu 1954-2003, jako suma *ET* w okresach dekadowych w różnych warunkach uwilgotnienia gleby. Analogicznie była liczona ewapotranspiracja potencjalna *ET_p*.

Wskaźnik *CDI* może być obliczany dla różnych okresów (dekada, miesiąc, faza fenologiczna, okres wegetacji). Wtedy zarówno *ET*, jak i *ET_p* we wzorze 5.2.1 są sumami tych wielkości w analizowanym okresie. Suma ewapotranspiracji rzeczywistej *ET* w danym okresie obejmuje ewapotranspirację w krótszych okresach (np. doba), w których ewapotranspiracja może być mniejsza od potencjalnej *ET_p* w wyniku niedoboru wody

glebowej (wilgotność mniejsza od krytycznej) jak i równa potencjalnej (wilgotność większa od krytycznej). Ewapotranspiracja w okresach dekad, miesięcy, faz fenologicznych i okresie wegetacji obliczana jest jako suma wartości dobowych.

Wskaźnik CDI przyjmuje wartości z przedziału $<0,1>$ w sposób następujący:

$$\begin{aligned} ZWU_a \geq ZWTD &\Rightarrow ET = ET_p \Rightarrow CDI = 0 \\ ZWU_a < ZWTD &\Rightarrow ET < ET_p \Rightarrow CDI < 1 \\ ZWU_a = 0 &\Rightarrow ET = 0 \Rightarrow CDI = 1 \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

gdzie:

ZWU_a – aktualny zapas wody użytecznej w warstwie korzeniowej.

Metoda obliczania wielkości ET i ET_p , które są wyznaczane za pomocą modelu matematycznego, będzie podana w dalszej części pracy.

Mnożąc wartość CDI uzyskaną z zależności (5.2.1) przez 100, wskaźnik ten wyraża procentową (np. 10%, 50%, 100%) redukcję ewapotranspiracji w badanym okresie czasu w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej.

Wskaźnik CDI_w , określający wielkość redukcji ewapotranspiracji w stosunku do średniej wieloletniej ewapotranspiracji rzeczywistej, obliczono według wzoru:

$$CDI_w = 1 - \frac{ET}{ET_{sr}} \quad (5.2.3)$$

gdzie:

ET_{sr} – średnia wieloletnia ewapotranspiracja rzeczywista w okresie, mm.

Wskaźnik CDI_w , w zakresie ewapotranspiracji mniejszej lub równej ewapotranspiracji średniej z wielolecia, przyjmuje wartości z przedziału $<0,1>$ w sposób następujący:

$$\begin{aligned} ET = ET_{sr} &\Rightarrow CDI_w = 0 \\ ET < ET_{sr} &\Rightarrow CDI_w < 1 \\ ET = 0 &\Rightarrow CDI_w = 1 \end{aligned} \quad (5.2.4)$$

Zarówno $CDI > 0$, jak i $CDI_w > 0$ wskazuje na suszę rolniczą. Ocena jej intensywności będzie zależała natomiast od przyjętych kryteriów dla danego wskaźnika.

5.3. METODA OBLICZANIA EWAPOTRANSPIRACJI (ET i ET_p)

Do symulacji ewapotranspiracji i zmian zapasów wody użytecznej w glebie zastosowano metodę bilansu wodnego warstwy korzeniowej gleby w oparciu o metodykę opracowaną przez ALLENA i in. [1998], DRUPKĘ [1988], DOORENBOSA i PRUITTA [1977], ŁABĘDZKIEGO [1990a, 1997], ROGUSKIEGO, SARNACKĄ oraz SMITHA [1992]. Metodyka ta, jak również opracowany na jej podstawie model CROPDEF, została pozytywnie zweryfikowana przez ŁABĘDZKIEGO [1988, 1990a, 1992, 1997]. Jest ona powszechnie zalecana i stosowana na świecie i w Polsce. Model ten tworzy wieloletnie serie ewapotranspiracji roślin przy danym, założonym poziomie produkcji (plonie końcowym), aktualnych zapasów wody użytecznej i niedoborów wodnych roślin dla historycznych wieloletnich danych meteorologicznych.

Metodyka, będąca podstawą modelu, została zmodyfikowana w zakresie obliczania wiosennych zapasów wody glebowej na podstawie bilansu okresu zimowego i wprowadzenia współczynnika redukcyjnego ewapotranspiracji w warunkach niedoboru wody glebowej i opracowana w postaci modelu komputerowego *CROPBALANCE* [ŁABĘDZKI, BĄK, 2004a].

Model oparty jest na bilansie wodnym gleby. Bilansowanie w pierwszy roku rozpoczynane jest, podając oszacowany zapas wody użytecznej ZWU w profilu glebowym na początku okresu wegetacyjnego, tj. na początku kwietnia. W kolejnych latach zapas wody użytecznej na początku kwietnia jest obliczany z szacunkowego bilansu wodnego w poprzedzającym okresie zimowym według równania:

$$ZWU_{1IV} = ZWU_{30IX} + P_z - ET_z \quad (5.3.1)$$

gdzie:

ZWU_{1IV} - zapas wody użytecznej na początku okresu wegetacyjnego, mm,

ZWU_{30IX} - zapas wody użytecznej na końcu okresu wegetacyjnego poprzedniego roku, mm,

P_z - opad w okresie od 01.10 do 31.03, mm,

ET_z - ewapotranspiracja w okresie od 01.10 do 31.03, mm, w warunkach Polski przyjmowana jako równa około 120 mm.

Następnie, począwszy od 1 kwietnia, obliczenia bilansu wodnego dokonywane są w okresach dobowych dla warstwy korzeniowej o stałej głębokości charakterystycznej w danej dekadzie (tab. 4.2.1). Każdy kolejny okres wegetacyjny obliczeń poprzedzony jest bilansem w okresie zimowym według równania 5.3.1.

Podstawowe równanie bilansowe stosowane w modelu ma postać:

$$ZWU_p^t = ZWU_k^{t-1} = ZWU_p^{t-1} + P^{t-1} - ET^{t-1} \quad (5.3.2)$$

gdzie:

ZWU_p^t - zapas wody użytecznej na początku doby t w warstwie korzeniowej, mm

ZWU_k^{t-1}, ZWU_p^{t-1} - zapas wody użytecznej na końcu i początku doby $t-1$ w warstwie korzeniowej, mm,

P^{t-1} - opad w dobie $t-1$, mm,

ET^{t-1} - ewapotranspiracja rzeczywista w dobie $t-1$, mm.

Ewapotranspirację rzeczywistą ET^t w dobie t oblicza się z równania:

$$ET^t = k_s^t k_c^t ET_o^t \quad (5.3.3)$$

gdzie:

ET_o^t - ewapotranspiracja wskaźnikowa wg Penmana-Monteitha w okresie doby t , mm,

k_c^t - współczynnik roślinny zależny od fazy rozwojowej rośliny i wielkości plonu w dobie t , stały w danej dekadzie,

k_s^t - współczynnik glebowo-wodny obliczany dla każdej doby symulacji jako stosunek aktualnego (na początku doby) zapasu wody użytecznej w bilansowanej warstwie gleby do zapasu wody trudno dostępnej w tej warstwie [ALLEN i in., 1998]:

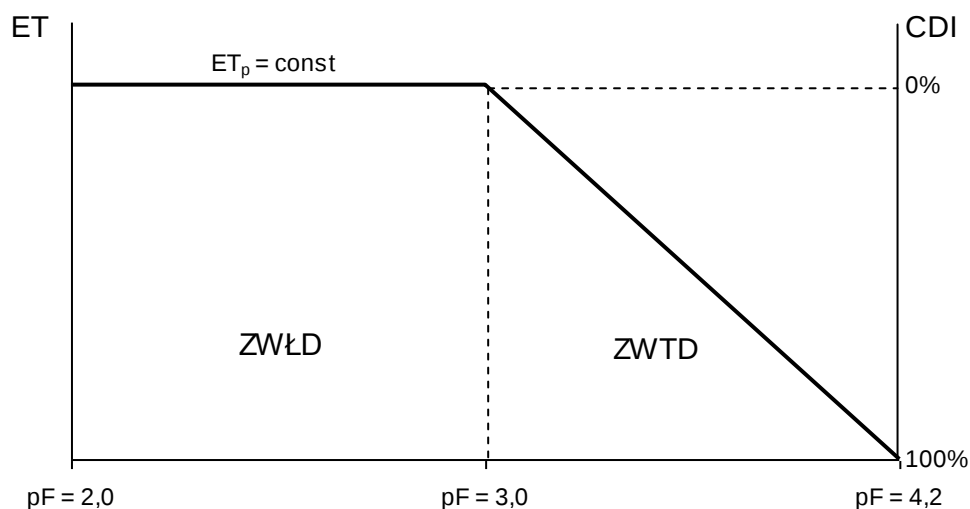
$$k_s^t = \frac{ZWU_p^t}{ZWTD} \quad (5.3.4)$$

gdzie:

ZWU_p^t - zapas wody użytecznej w glebie na początku doby t , mm,

$ZWTD$ - zapas wody trudno dostępnej, mm.

Wyczerpanie zapasu wody łatwo dostępnej $ZWŁD$ oznacza spadek wilgotności gleby poniżej wilgotności krytycznej (minimalnej dopuszczalnej), poniżej której następuje wyraźne ograniczanie ewapotranspiracji i przyrostu roślin. Przyjmuje się, że wilgotność krytyczna odpowiada $pF = 3,0$ (rys. 5.3.1).



Rys. 5.3.1. Schemat zależności ewapotranspiracji od wartości pF

Gdy

$$ZWU_p^t \geq ZWTD \quad (5.3.5)$$

to

$$k_s^t = 1 \quad \text{i} \quad ET^t = ET_p^t$$

Ewapotranspirację potencjalną ET_p w okresie 1 doby, będącą ewapotranspiracją rzeczywistą roślin przy dostatecznym uwilgotnieniu gleby (równą potrzebom wodnym roślin), oblicza się metodą współczynników roślinnych jako:

$$ET_p = k_c ET_o \quad (5.3.6)$$

gdzie:

ET_o - ewapotranspiracja wskaźnikowa wg Penmana-Monteitha w okresie 1 doby, mm,

k_c - współczynnik roślinny zależny od fazy rozwojowej rośliny i wielkości plonu.

Obecnie zalecaną i najpowszechniej stosowaną metodą obliczania ewapotranspiracji wskaźnikowej jest metoda Penmana-Monteitha. Metoda ta jest zalecana przez FAO i ICID [ALLEN i in., 1989, 1994a, 1994b, 1998; FEDDES, LENSELINK, 1994; SMITH, 1992a, 1992b]. Ewapotranspirację wskaźnikową według metody Penmana-Monteitha definiuje się następująco: "Ewapotranspiracja wskaźnikowa jest to ewapotranspiracja hipotetycznej rośliny, jaką jest trawa o stałej, jednakowej wysokości równej 12 cm, stałej oporności

stomatycznej równej $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, stałym albedo wynoszącym 0,23, w pełni zakrywająca glebę, w warunkach aktywnego rozwoju i nieograniczonego dostępu wody." Jest ona obliczana ze wzoru [ALLEN i in., 1998]:

$$ET_o = \frac{0,408\delta R_n + 900\tau v(e_s - e)/T}{\delta + \tau(1 + 0,34v)} \quad (5.3.7)$$

gdzie:

ET_o - ewapotranspiracja wskaźnikowa, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,

T - temperatura powietrza średnia w dekadzie, K,

v - prędkość wiatru średnia w dekadzie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

δ - nachylenie krzywej ciśnienia nasyconej pary wodnej, $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$,

τ - stała psychrometryczna, $\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$,

R_n - promieniowanie netto średnie w dekadzie, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,

e - ciśnienie pary wodnej średnie w dekadzie, kPa,

e_s - ciśnienie pary wodnej nasyconej średnie w dekadzie, kPa,

Promieniowanie netto R_n jest obliczane na podstawie usłonecznienia z zależności [ALLEN i in., 1998]:

$$R_n = R_o(1 - a)(0,25 + 0,50 S/S_o) - \sigma T^4(0,34 - 0,14\sqrt{e})(0,1 + 0,9 S/S_o) \quad (5.3.8)$$

gdzie:

R_o - promieniowanie całkowite na górnej granicy atmosfery, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,

a - albedo,

S - usłonecznienie rzeczywiste, h,

S_o - usłonecznienie możliwe, h,

σ - stała Stefana-Boltzmannna równa $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$.

Ewapotranspirację potencjalną i rzeczywistą w okresach obliczano jako sumę wartości dobowych.

6. WYNIKI I DYSKUSJA

6.1. OPADY I EWAPOTRANSPIRACJA

6.1.1. ZMIENNOŚĆ OPADÓW

Badania zmienności sum opadów P przeprowadzono w okresie od początku okresu wegetacji buraka cukrowego (21.04) do końca każdej fazy fenologicznej lub do końca okresu wegetacji w roku bieżącym w wieloleciu 1954-2003. Wydzielono następujące okresy badawcze:

- okres I, obejmujący fazę fenologiczną I: 21.04 - 10.05,
- okres IIa, obejmujący fazę fenologiczną I i IIa: 21.04 - 20.06,
- okres IIb, obejmujący fazę fenologiczną I, IIa i IIb: 21.04 - 20.07,
- okres III, obejmujący fazę fenologiczną I, IIa, IIb i III: 21.04 - 31.08,
- okres IV, obejmujący fazę fenologiczną I, IIa, IIb, III i IV: 21.04 - 30.09, czyli cały okres wegetacji buraka cukrowego.

Na podstawie danych opadowych stwierdzono, że w rejonie Kujaw, reprezentowanym przez stację Bydgoszcz-IMUZ, w wieloleciu 1954-2003 wystąpiło 28 okresów wegetacji buraka cukrowego, w których suma opadów była mniejsza od średniej z wielolecia wynoszącej 307 mm; w tym 4 okresy z opadami poniżej 50%. Sumy opadów zmieniały się w poszczególnych latach w zakresie od 105 mm w 1989 r. do 639 mm w 1980 r. Współczynnik zmienności opadów wynosił około 30% (tab. 6.1.1). Wynik ten potwierdza fakt, że Bydgoszcz leży na obszarze charakteryzującym się największą zmiennością opadów w Polsce. W czasie badań nad suszą w Polsce w okresie wegetacyjnym w latach 1954-1998 przeprowadzonych przez ŁABĘDZKIEGO i BĄKA [2004b] stwierdzono, że w Bydgoszczy współczynnik zmienności opadów wynosił 28% i był największy na całym obszarze Polski. Wysoką zmienność opadów (powyżej 25%) zaobserwowano nie tylko na Kujawach, także we wschodniej części Pomorza, na Żuławach oraz na wschodzie Lubelszczyzny, czyli na obszarach, na których średnie sumy opadów okresu wegetacyjnego należą do najmniejszych. Ponadto zauważono, że w okresie wegetacyjnym obszary, na których występują najmniejsze opady charakteryzują się ich największą zmiennością.

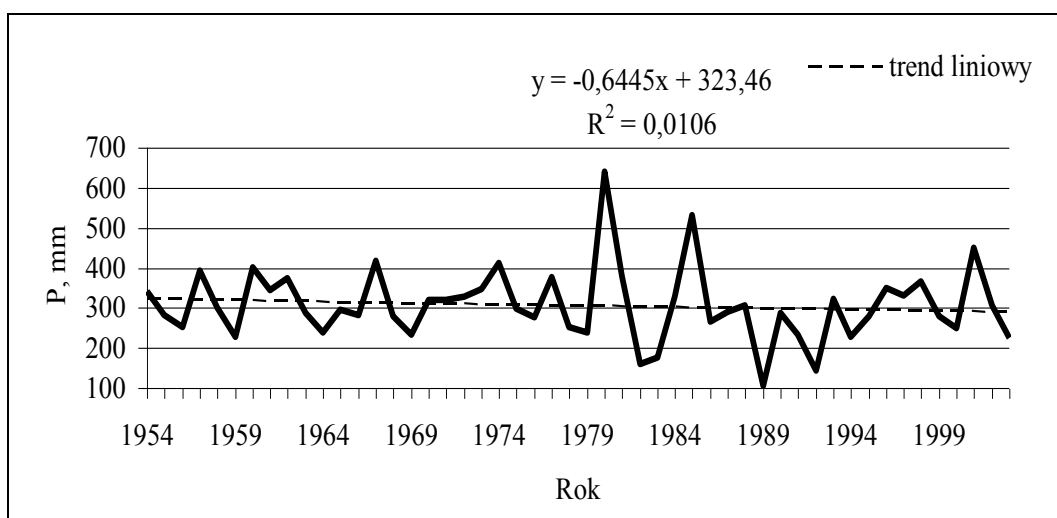
W poszczególnych okresach wartości współczynnika zmienności opadów były jeszcze większe. Maksymalną wartość zanotowano na początku okresu wegetacji (w okresie I) i wynosiła ona 67%.

Tabela 6.1.1. Statystyki sum opadów P w okresach w wieloleciu 1954-2003

Statystyki	Opady P w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
$\bar{x}$ (mm)	28	98	176	260	307
V (%)	67	47	45	34	30

$\bar{x}$ – wartość średnia, V – współczynnik zmienności

Przebieg sum opadów P w okresie wegetacji buraka cukrowego (21.04-30.09) w badanym wieloleciu przedstawiono na rysunku 6.1.1. Nieistotny statystycznie, ujemny trend liniowy opadów wynosił 0,6 mm/rok. Niska wartość współczynnika determinacji R^2 świadczy o słabym dopasowaniu linii trendu do wyników obserwacji. Najbardziej suche okresy wegetacji były w latach: 1989 (105 mm), 1992 (145), 1982 (161) oraz 1983 (176), najbardziej wilgotne były okresy wegetacji w latach: 1980 (639 mm), 1985 (531), 2001 (450), 1967 (419), 1974 (411) i 1960 (400).



Rys. 6.1.1. Sumy opadów P okresu wegetacji buraka cukrowego (21.04-30.09) w wieloleciu 1954-2003

Ujemny i nieistotny statystycznie trend otrzymali BĄK i ŁABĘDZKI [2002], badając zmienność opadów w okresie wegetacyjnym (IV-IX) na obszarze Wielkopolski i Kujaw w latach 1954-1998. Pomimo zróżnicowania sum opadów między latami w okresie wegetacyjnym okazało się, że wspomniany obszar jest jednorodny pod względem opadowym. Autorzy przy użyciu testu Newmana-Keulsa obliczyli poziomy istotności różnic średnich

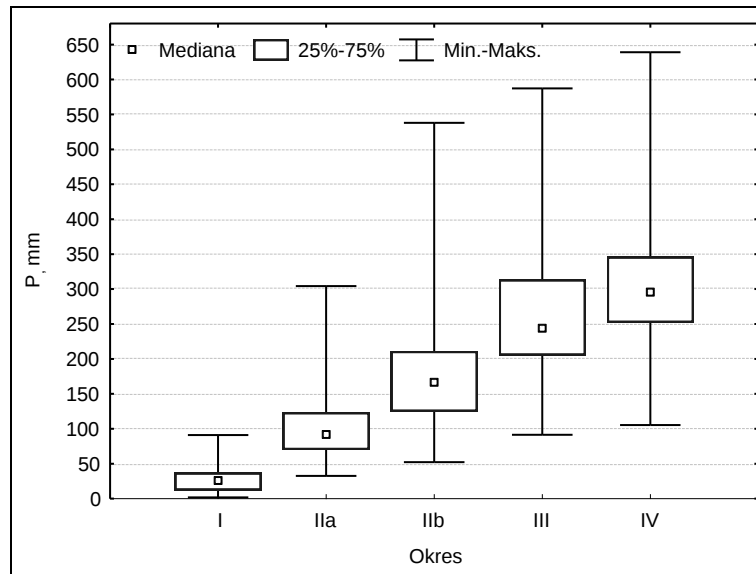
opadów na stacjach: Bydgoszcz, Toruń, Koło, Płock, Polanowice, Poznań, zakładając hipotezę zerową o braku takich różnic. Uzyskane poziomy istotności, większe od $\alpha = 0,05$, wykazały brak istotnego statystycznie zróżnicowania opadów na badanych stacjach.

Dodatni i istotny statystycznie trend uzyskano w Mochelku na stacji położonej kilkanaście kilometrów od Bydgoszczy, w kierunku północno-zachodnim [ŻARSKI, DUDEK, KUŚMIEREK, 2001]. Badania wykazały, że stacja ta położona jest w cieniu opadowym, przez co średnie wieloletnie opady w okresie 1950-2000 były mniejsze o 15-20% od występujących na stacjach IMUZ na Kujawach, jak również stwierdzono mniejszą liczbę dni z opadami.

Fakt występowania niskich opadów atmosferycznych w Bydgoszczy potwierdzają badania ciągu historycznego opadów w latach 1861-1994 [ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI, 1996]. Stwierdzono, że w okresie wegetacyjnym w średnich latach (dla prawdopodobieństwa $p = 50\%$) suma opadów wynosiła 311 mm. W latach suchych uzyskano odpowiednio: dla $p = 20\%$ - 249 mm, $p = 10\%$ - 220 mm, $p = 5\%$ - 198 mm, $p = 1\%$ - 161 mm. Na podstawie tych wyników można uznać, że tak suchy jak w 1989 r. okres wegetacyjny (105 mm) pojawia się z częstotliwością mniejszą niż 1 razy na 100 lat.

O suchości okresu wegetacyjnego (IV-IX) w Bydgoszczy i na Kujawach decydują posuchy atmosferyczne i okresy bezopadowe. KASPERSKA-WOŁOWICZ, ŁABĘDZKI i BĄK [2003] stwierdzili na podstawie danych z okresu 1972-2003 z Bydgoszczy i Frydrychowa (dolina Noteci), że średnia częstość wystąpienia ciągów dni bezopadowych na obu stacjach była prawie jednakowa. Co roku, w okresie od kwietnia do września pojawiało się około 50-60 dni z posuchą atmosferyczną, co stanowi 30% liczby dni w tym okresie. Najdłuższy okres bezopadowy trwał 38 dni - w Bydgoszczy wystąpił w 1975 r., a we Frydrychowie w 1982 r. W badanym wieloleciu okres posuszny średnio trwał 21-22 dni. W Bydgoszczy największa liczba dni z posuchą wyniosła 93 (1980 r.). W tym samym okresie wegetacyjnym (IV-IX) zanotowano także największą w stuleciu sumę opadu atmosferycznego, co znaczy, że także podczas lat mokrych można spodziewać się wystąpienia okresów posusznych. We Frydrychowie największa liczba dni z posuchą pojawiła się w 1989 r. i wynosiła 131 dni. Do najbardziej posusznych (ponad 90 dni) w Bydgoszczy można zaliczyć lata: 1975 i 1980, we Frydrychowie 1975, 1989 i 1992. WOŚ [1994, 2003] natomiast stwierdził, że w regionie środkowowielkopolskim w latach 1951-1980 średnia liczba dni w roku z pogodą ciepłą i bezopadową wynosiła 142.

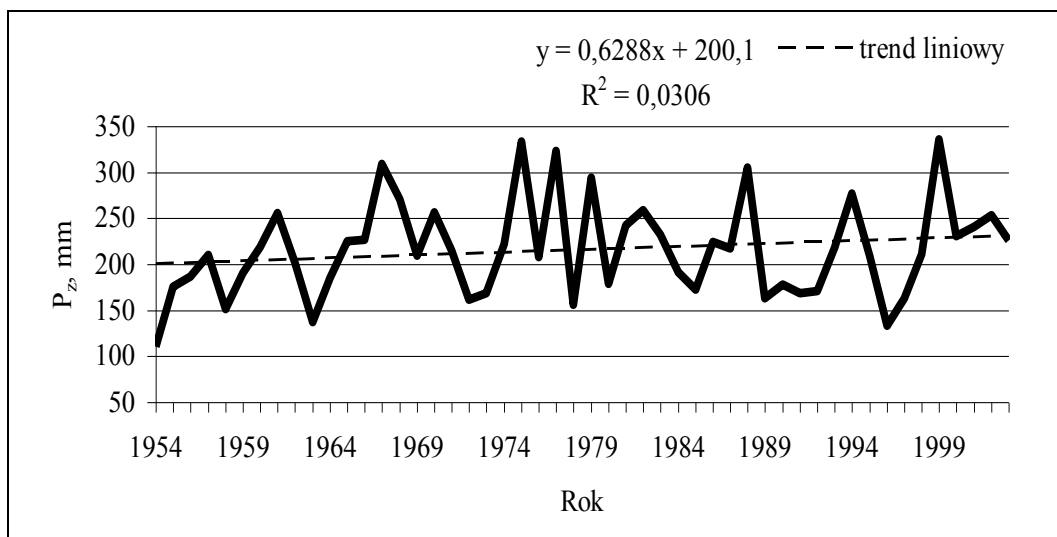
Sumy opadów P , dolny i górny kwartył oraz medianę w poszczególnych okresach przedstawia rysunek 6.1.2.



Rys. 6.1.2. Statystyki sumy opadów P w okresach w wieloleciu 1954-2003

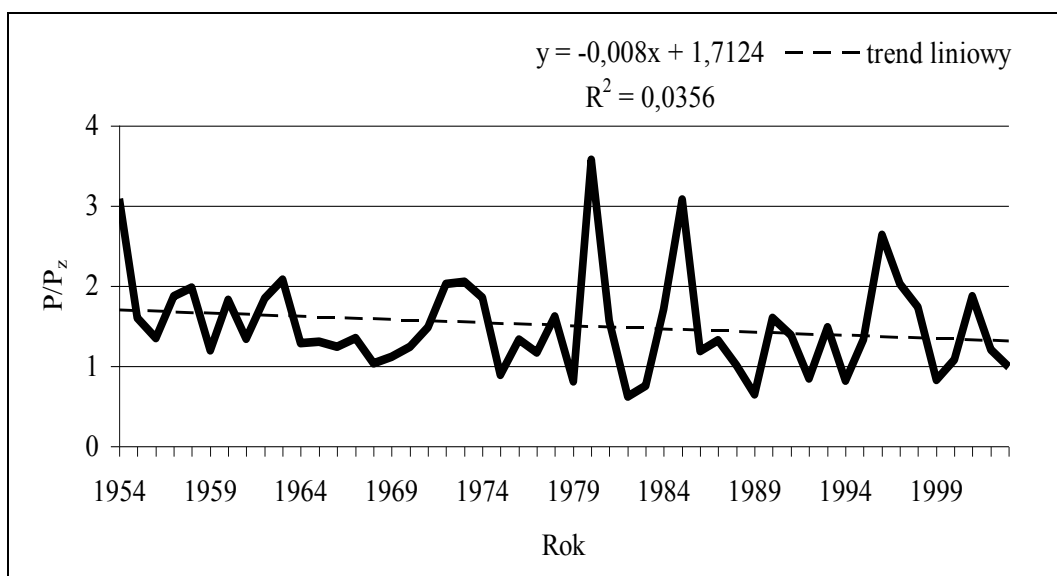
Największą amplitudę opadów P obserwowano w okresie IV i wynosiła ona 534 mm, a najmniejszą w okresie I - 89 mm. Maksymalne różnice w poszczególnych okresach między wartością średnią opadów P w wieloleciu i medianą nie przekraczały 12%, przeważały różnice sięgające 4 - 7 %. Z pewnym uproszczeniem można więc przyjąć, że ilość okresów z opadami mniejszymi i większymi od średniej w badanym wieloleciu była taka sama.

Na przebieg i intensywność suszy glebowej i rolniczej w okresie wegetacji ma wpływ zapas wody w glebie zgromadzony w poprzedzającym okresie zimowym. W wieloleciu 1953-2003 sumy opadów zimowych P_z (od 01.10 do 20.04) w 26 okresach były niższe od średnich opadów wielolecia wynoszących 216 mm. Na podstawie kryteriów KACZOROWSKIEJ [1962] wyróżniono 13 okresów z sumą opadów zimowych mniejszą od 90% średniej wieloletniej, 6 okresów poniżej 75% i żadnego okresu z opadami poniżej 50%. Najbardziej suchy okazał się sezon zimowy 1953/54, w czasie którego spadło 111 mm, a najbardziej wilgotny sezon 1998/99 – 336 mm. Zmienność opadów zimowych była tylko niewiele niższa niż opadów wiosenno-letnich i wynosiła 24%. Nieistotny statystycznie trend dodatni wynosił 0,6 mm/rok i świadczył o niewielkim wzroście opadów zimowych (rys. 6.1.3).



Rys. 6.1.3. Sumy opadów P_z (01.10-20.04) w wieloleciu 1953-2003

Tylko w 8 okresach suma opadów zimowych była większa od opadów letnich, w 1 przypadku równa, a w 41 – mniejsza. Średni stosunek sumy opadów P/P_z wynosił 1,5; najmniejszy był w 1989 roku i wynosił 0,6, największy w roku 1980 - 3,6 (rys. 6.1.4).



Rys. 6.1.4. Stosunek sumy opadów P/P_z w wieloleciu 1953-2003

KOŻUCHOWSKI [2004] sugeruje, że malejący trend stosunku opadów lata do opadów zimy, jak i stosunku opadów półrocza ciepłego do opadów półrocza chłodnego, jest rezultatem przemian struktury sezonowej opadów i jest wywołany obserwowanym ociepleniem klimatu. Tendencja ta, statystycznie istotna, jest jedną z niewielu prawidłowości wieloletnich zmian stosunków opadowych w Polsce.

Przedstawiona powyżej analiza warunków opadowych na Kujawach dotyczy opadów zmierzonych deszczomierzem Hellmanna na wysokości 1 m. Jak podaje KĘDZIORA [1995, 2005] w Wielkopolsce opady dochodzące do powierzchni gruntu są większe o około 10% w okresie letnim. W związku z tym w warunkach Kujaw, przy średniej sumie opadów w badanym okresie wegetacji wynoszącej 307 mm, średnie opady rzeczywiste wynosiły około 340 mm.

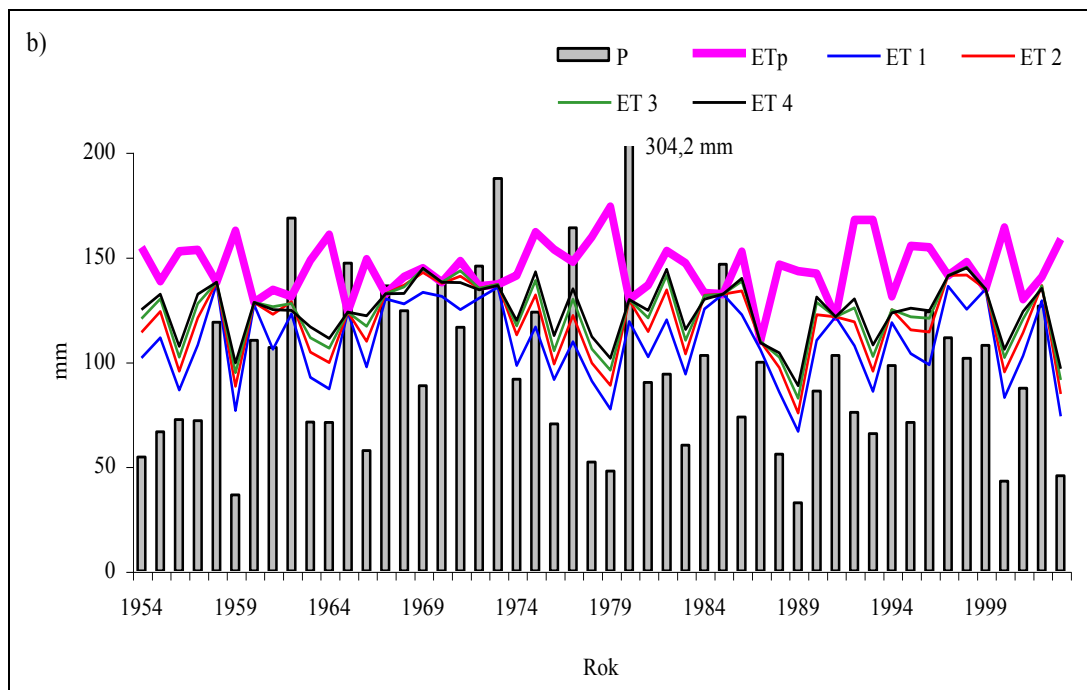
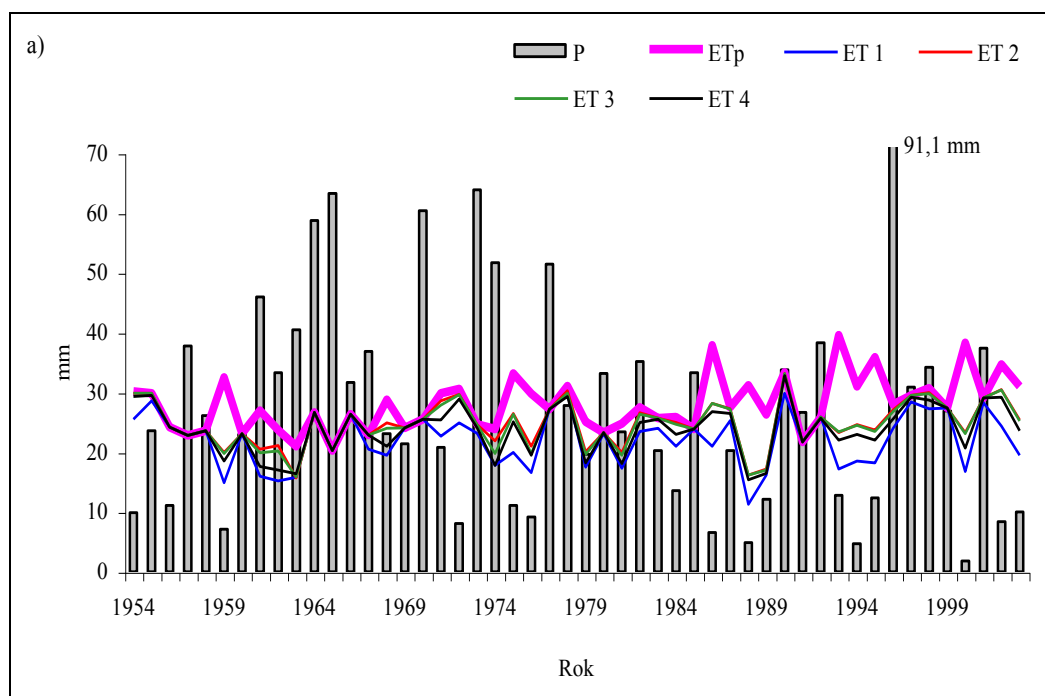
6.1.2. ZMIENNOŚĆ EWAPOTRANSPIRACJI

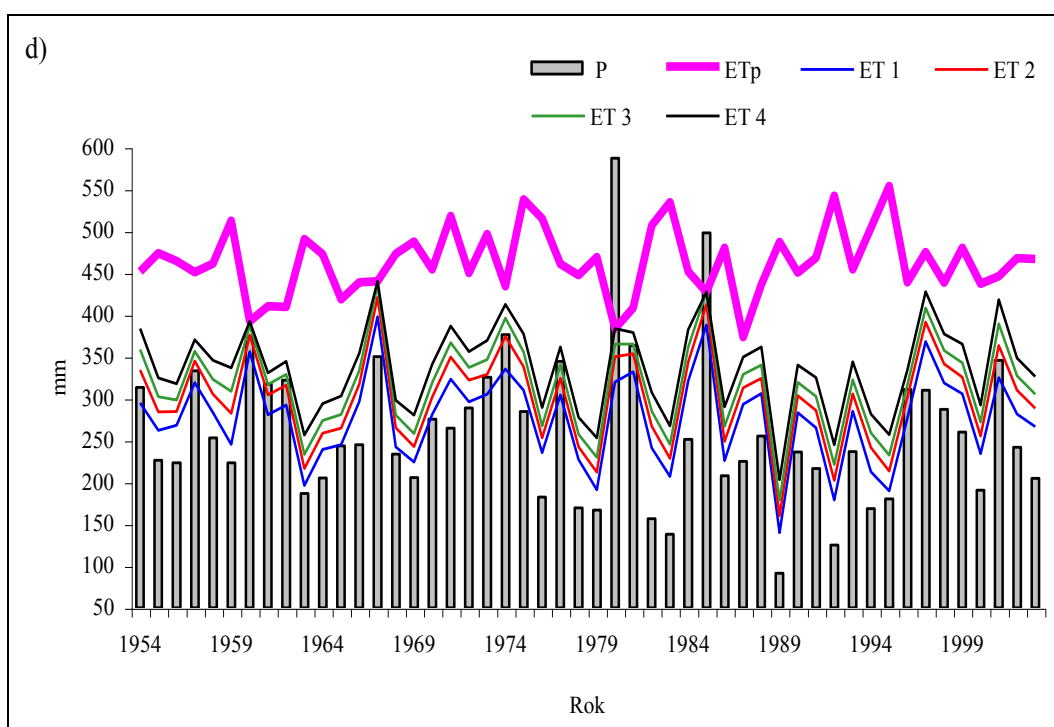
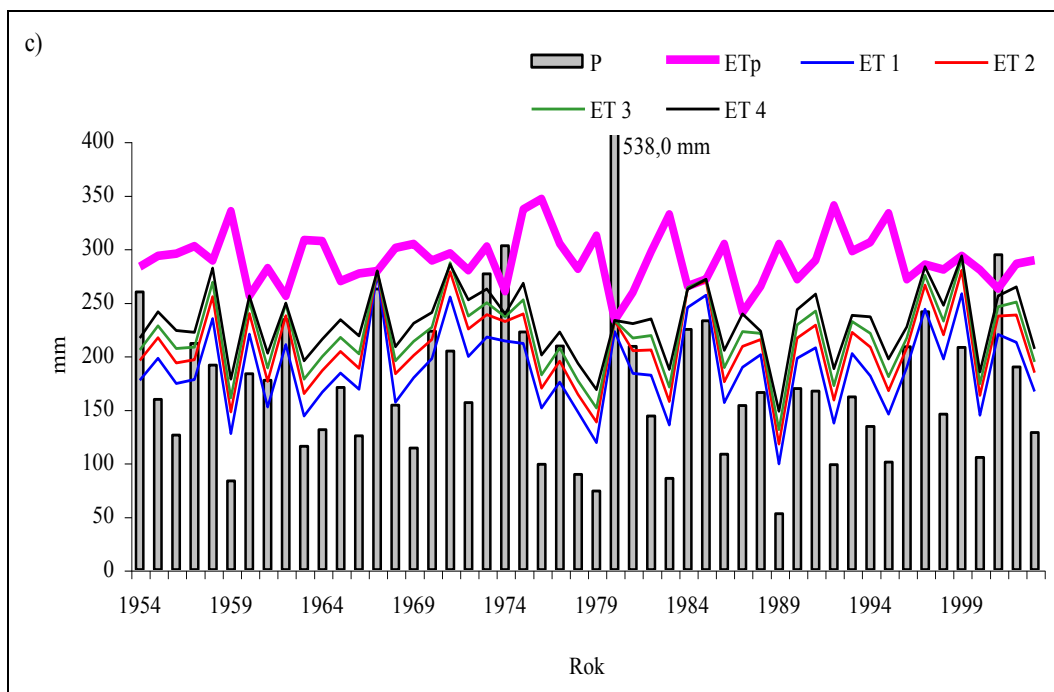
Obliczenia ewapotranspiracji potencjalnej ET_p i ewapotranspiracji rzeczywistej ET były prowadzone od 21.04 do 30.09 w tych samych okresach, w których analizowano sumy opadów P . Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 6.1.2 oraz na rysunkach 6.1.5 i 6.1.6. Jednoczesny przebieg w kolejnych okresach badanego wielolecia sum opadów P , ewapotranspiracji rzeczywistej ET i ewapotranspiracji potencjalnej ET_p przedstawiono na rysunku 6.1.5.

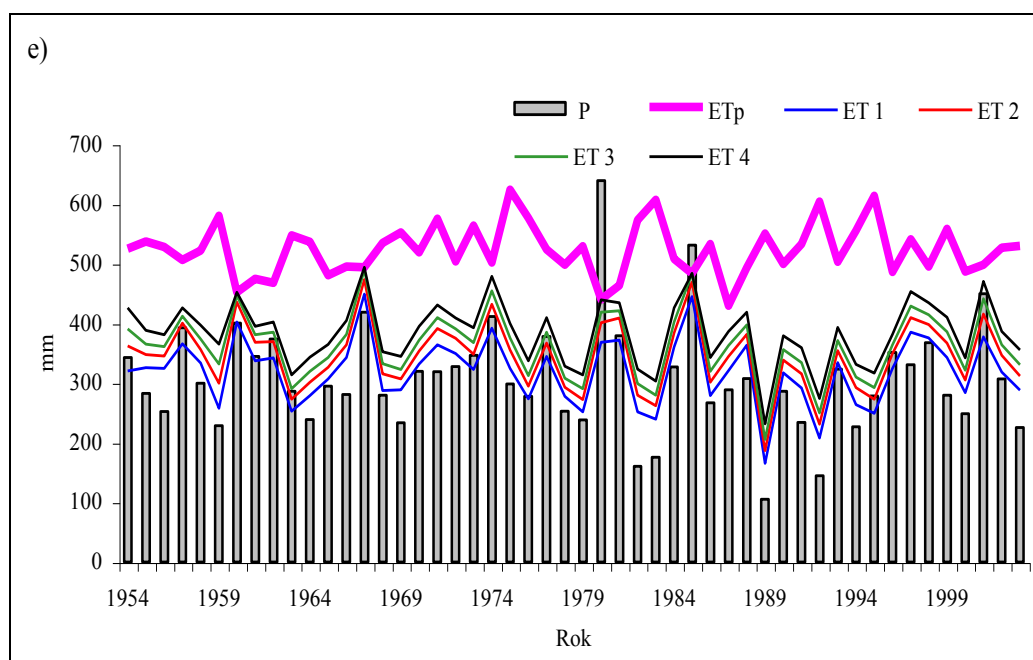
Tabela 6.1.2. Statystyki sum ewapotranspiracji ET i ET_p w okresach w wieloleciu 1954-2003

Parametr	Statystyki	Gleba	Okres				
			I	IIa	IIb	III	IV
			21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
ET	$\bar{x}$ (mm)	$G1$	22	109	188	276	319
	V (%)		20	17	21	20	17
	$\bar{x}$ (mm)	$G2$	25	119	208	300	345
	V (%)		16	15	18	19	17
	$\bar{x}$ (mm)	$G3$	25	122	219	317	363
	V (%)		16	13	17	17	16
	$\bar{x}$ (mm)	$G4$	24	124	230	337	384
	V (%)		17	11	14	16	14
ET_p	$\bar{x}$ (mm)	$G1, G2,$	28	144	290	463	523
	V (%)	$G3, G4$	16	9	9	9	8

$\bar{x}$ – wartość średnia, V – współczynnik zmienności







Rys. 6.1.5. Sumy opadów P , ewapotranspiracji ET i ET_p w okresach:
a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV;
 ET_1, ET_2, ET_3, ET_4 – ewapotranspiracja na badanych glebach G_1, G_2, G_3, G_4

Zgodnie z przyjętą metodyką oraz założeniem, że ewapotranspiracja w zakresie wody łatwodostępnej w glebie nie zależy od wilgotności gleby i jest równa ewapotranspiracji potencjalnej ($ET = ET_p$), ewapotranspiracja potencjalna jest taka sama na każdej glebie, ale inna w każdym roku. Średnia jej wartość w całym okresie wegetacji wyniosła 523 mm (tab. 6.1.2) i zmieniała się w zakresie od 429 mm do 624 mm (rys. 6.1.5e); współczynnik zmienności wynosił 8%. W pozostałych okresach utrzymywał się na poziomie 9% i tylko w okresie I, pokrywającym się z fazą fenologiczną siewu i kiełkowania, był większy - 16%. W okresie I najmniejszą wartość ET_p zanotowano w 1965 roku i wynosiła ona 20 mm. W następnych okresach minimum wartości ET_p pojawiało się w następujących latach: IIa – 1987 r. (110 mm), IIb – 1980 (233 mm), III – 1987 (373 mm), IV – 1987 (429 mm). Analogicznie maksymalne wartości parowania potencjalnego ET_p w kolejnych okresach wynosiły: w okresie I – 1993 r. (40 mm), IIa – 1979 (174 mm), IIb – 1976 (346 mm), III – 1993 (554 mm), IV – 1975 (624 mm).

Lata, w których notowano skrajne wartości ET_p w poszczególnych okresach, nie pokrywają się z latami, w których notowano ekstremalne wartości sumy opadów P . Oznacza to, że np. okres suchy pod względem opadów nie charakteryzuje się jednocześnie wysoką wartością ET_p i odwrotnie. Można to wytłumaczyć faktem, że ewapotranspiracja potencjalna zależy od czynników meteorologicznych, które wchodzą w skład wzoru na ewapotranspirację

wskaźnikową. Wspomnianymi czynnikami meteorologicznymi są: promieniowanie, usłonecznienie, temperatura powietrza, prędkość wiatru, niedosyt wilgotności powietrza.

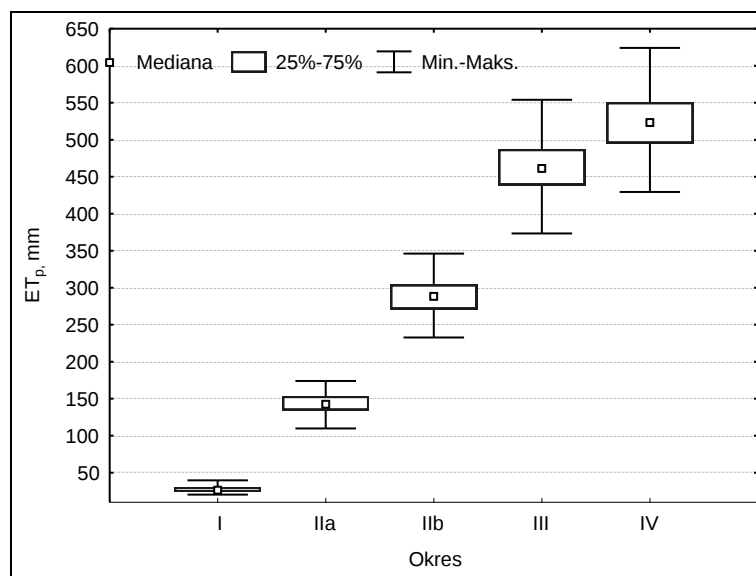
W badanym wieloleciu stwierdzono istotną statystycznie tendencję wzrostową sumy ET_p w okresie wegetacji, która wynosiła 0,19 mm/rok. Przyczyniły się do tego m.in. zmiany klimatyczne w wyniku, których w drugiej połowie XX wieku nastąpił wzrost temperatury w Polsce latach 1951-2000 w tempie około 0,2°C/10 lat [KOZUCHOWSKI, ŻMUDZKA, 2001]. Istotnym wzrostem odznaczała się średnia temperatura w marcu (wzrost o ok. 3°C) i w maju (1,5°C). Malejące trendy, ale nieistotne, pojawiły się w czerwcu (-0,6°C) i we wrześniu (-0,0°C). Również znacząco podniosły się średnie wieloletnie w dwu końcowych dekadach stulecia. Zarówno średnia roczna temperatura z 10-lecia 1991-2000, jak i średnia z 20-lecia 1981-2000 różnią się istotnie od normy z okresu 1951-2000. Fakt ten znalazł potwierdzenie również w przebiegu temperatury w Bydgoszczy. Według notowań na stacji Bydgoszcz-IMUZ, średnia roczna temperatura powietrza w okresie 1851-2000 wynosiła +8,1°C, przy czym w dwóch ostatnich dziesięcioleciach była najwyższa i wynosiła +9,0°C [BAK, 2004]. Również na zmiany ET_p w wieloleciu mogły mieć wpływ zmiany zachmurzenia. W przebiegu zachmurzenia nad obszarem Polski. ŻMUDZKA [2003] wyróżniła trzy okresy: do roku 1981 z tendencją wzrostową (przewaga odchyłeń dodatnich od średniej z 50-lecia), lata 1982-1992 z dominacją odchyłeń ujemnych, po roku 1992 z ponownym niewielkim wzrostem wielkości zachmurzenia. W ostatnich 20-30 latach XX wieku zmieniły się nieco warunki nefologiczne, co spowodowało przesunięcie minimum rocznego zachmurzenia z września na sierpień oraz brak lat anomalnie pochmurnych (wielkość zachmurzenia mniejsza niż określona przez kwantyl 10%).

W okresach obejmujących początkowe fazy rozwoju rośliny, liczba lat, w których $ET = ET_p$, była większa niż w okresach poszerzonych o późniejsze fazy fenologiczne. Wskazuje to na większą częstotliwość suszy glebowej w późniejszych fazach rozwojowych, co wiąże się z jednej strony ze wzrostem potrzeb wodnych rośliny i ewapotranspiracji potencjalnej, a z drugiej – ze wzrostem zdolności ewaporacyjnej atmosfery wynikającej ze wzrostu temperatury powietrza, promieniowania, usłonecznienia, niedosytu wilgotności powietrza w okresie letnim. W analizowanych okresach wegetacji wielolecia 1954-2003 tylko w 4 latach: 1960, 1967, 1980, 1985 i tylko na glebie G4 stwierdzono fakt, że $ET = ET_p$ (rys. 6.1.5e). W pozostałych latach zaznaczył się wyraźnie wpływ retencji wodnej gleby i wilgotności gleb na redukcję ewapotranspiracji. Na glebie G1, o najmniejszym zapasie wody użytecznej ZWU, wpływ ten był największy (tab. 6.1.2.). Średnia ewapotranspiracja na tej

glebie w okresie wegetacji wynosiła tylko 319 mm, co stanowiło 61% potencjalnych możliwości ewapotranspiracji uprawy buraka cukrowego. Na glebie G4, o największym zapasie wody użytecznej ZWU, średnia ewapotranspiracja była największa (384 mm), ale również mniejsza od ewapotranspiracji potencjalnej. Tak więc i na tej glebie niedobór wody glebowej (wyczerpanie zapasu wody łatwo dostępczej) powodował redukcję ewapotranspiracji.

Największe różnice między ET i ET_p stwierdzano w czasie suszy meteorologicznej, której towarzyszyła wysoka temperatura powietrza. Na przykład w ekstremalnie suchym okresie wegetacyjnym w 1989 r. ET_p wynosiła 550 mm, podczas gdy ET na kolejnych glebach wynosiła: 166, 186, 206, 232 mm.

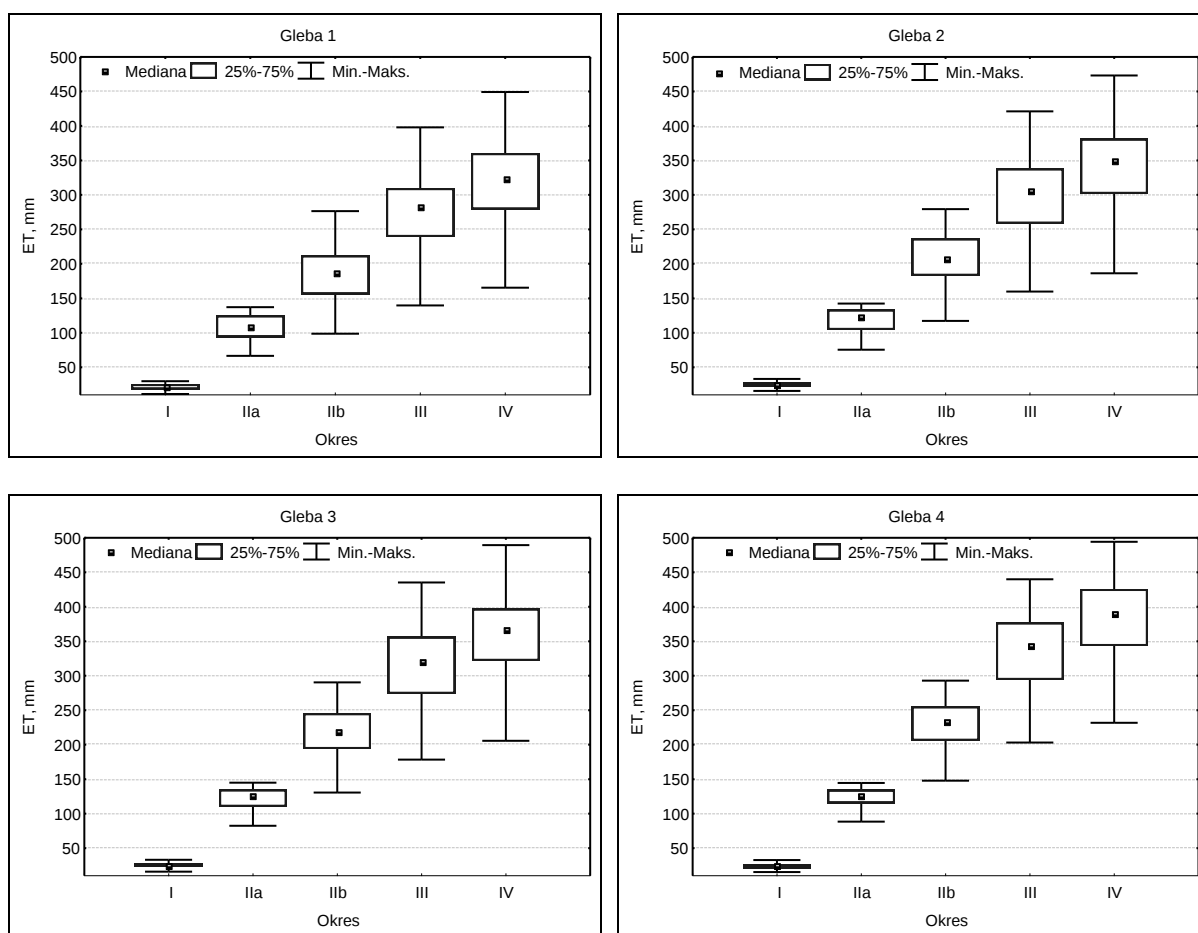
Zróznicowanie ewapotranspiracji rzeczywistej ET w kolejnych okresach i na poszczególnych glebach oraz ewapotranspiracji potencjalnej ET_p w okresach można prześledzić na wykresach skrzynkowych (rys. 6.1.6 i 6.1.7). Rysunki te przedstawiają statystyczne rozkłady częstotliwości obu rodzajów ewapotranspiracji. Wyróżniono wartości ewapotranspiracji rzeczywistej i potencjalnej, które wraz z mniejszymi występują z częstotliwością 25, 50 (mediana) i 75%. Są tu zaznaczone również maksymalne i minimalne wartości obu badanych parametrów.



Rys. 6.1.6. Statystyki ewapotranspiracji potencjalnej ET_p w okresach w wieloleciu 1954-2003

Z rysunku 6.1.6 widać, że za wyjątkiem okresu I, w następnych okresach rozkład wartości ewapotranspiracji potencjalnej był równomierny.

Podobnie, jak w przypadku ewapotranspiracji potencjalnej ET_p , także rozkład ewapotranspiracji rzeczywistej ET począwszy od okresu IIa staje się coraz bardziej równomierny z powodu wydłużania badanego okresu (rys. 6.1.7). Przykładowo, rozpatrując gleby o skrajnych zapasach wody użytecznej, ewapotranspiracja w okresie wegetacji występująca z częstotliwością 50% wynosi na glebie $G1$ około 300 mm, a na glebie $G4$ - 400 mm. W 75% przypadków suma ewapotranspiracji była mniejsza od 350 mm na glebie $G1$ i od 420 mm na glebie $G4$. Podobne relacje między glebami występują w pozostałych badanych okresach związanych z fazami fenologicznymi.



Rys. 6.1.7. Statystyki ewapotranspiracji rzeczywistej ET w okresach w wieloleciu 1954-2003

Zmienność ET była kilkakrotnie mniejsza niż zmienność opadów, zarówno w poszczególnych okresach, jak i w całym okresie wegetacji. Najwyższe wartości współczynnika zmienności ewapotranspiracji rzeczywistej osiągał na glebie $G1$. Wzrost retencyjności gleby, a tym samym zapasów wody użytecznej, wpływał stabilizująco na współczynnik zmienności

ewapotranspiracji ET i obniżał jego wartość. Wraz z retencyjnością gleb wzrastała wartość mediany w kolejnych okresach, natomiast w tych samych okresach jej zróżnicowanie między glebami stawało się coraz mniejsze (rys. 6.1.7). Długość analizowanego okresu miała też wpływ na wzrost amplitudy ewapotranspiracji. Na przykład w okresie wegetacji różnica między największą i najmniejszą wartością ET na każdej glebie przekraczała 250 mm.

Powyższe wielkości ewapotranspiracji potencjalnej ET_p i rzeczywistej ET w różnych warunkach uwilgotnienia gleby, uzyskane w wyniku obliczeń modelowych, są w znacznej zgodności z ewapotranspiracją i zużyciem wody przez buraki w różnych warunkach glebowo-wodnych podawanymi przez innych autorów.

Według badań MARCILONKA [1978] przeprowadzonych w latach 1957-1969 na glebach średnich, zużycie wody przez buraki cukrowe można oszacować na 527 mm przy plonie około $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w warunkach dostatecznego zaopatrzenia w wodę. DZIEŻYC [1989] podaje, że ewapotranspiracja buraków cukrowych w tych samych warunkach wynosi 500-550 mm, a według BACA [1982] parowanie terenowe na glebie średnio zwięzłej na stacji Swojec w latach 1964-1975 wynosiło w okresie wegetacyjnym IV-IX średnio 460 mm. Z badań DZIEŻYCA [1989] przeprowadzonych na glebach lekkich wynika, że połowe zużycie wody z warstwy 0-60 cm gleby na poletkach nienawadnianych wynosiło zależnie od roku 350-500 mm, zaś na poletkach deszczowanych było wyraźnie wyższe.

Na podstawie badań lizymetrycznych prowadzonych w Bydgoszczy w latach 1968-1985 [ŁABĘDZKI, ROGUSKI, 2001; ROGUSKI, 1978; ROGUSKI, GABRYCH, 1974] na glebie o zapasie wody użytecznej wynoszącej 180 mm stwierdzono, że w okresie od 21.IV do 30.IX średnia ewapotranspiracja buraka cukrowego w tych latach wyniosła 380 mm. Natomiast według badań modelowych przeprowadzonych przez autora w niniejszej pracy ewapotranspiracja buraków cukrowych w tych samych latach wyniosła średnio 378 mm na glebie G3 ($ZWU = 167 \text{ mm}$) i 399 mm na glebie G4 ($ZWU = 203 \text{ mm}$), co wskazuje na wiarygodność obliczonych wartości ewapotranspiracji. W poszczególnych latach różnice między ewapotranspiracją obliczoną i pomierzoną były różne. W latach przeciętnych pod względem opadów różnice te nie przekraczały 10 mm, w latach bardzo suchych były ujemne i dochodziły do 70-90 mm (1983 r.), a w latach wilgotnych były dodatnie i dochodziły do 100 mm (1980 r.). Różnice te pokazują wyraźnie wcześniej sygnalizowany problem, że stosowanie do obliczania ewapotranspiracji średnich z wielolecia empirycznych współczynników roślinnych daje zadowalające wyniki w przeciętnych warunkach meteorologicznych i typowych warunkach rozwoju roślin. W warunkach meteorologicznych

znacznie odbiegających od przeciętnych ewapotranspiracja obliczona może się różnić od pomierzonej. Problem ten wymaga dalszych badań i analiz.

ROJEK [1987] podaje natomiast, że w latach 1968-1973 średnia ewapotranspiracja buraków cukrowych w tym samym rejonie, obliczona na podstawie średnich współczynników empirycznych i wzoru Bacia na parowanie wskaźnikowe, wynosiła 403 mm. Według ROJKA i WIERCIOCH [1995] średnia ewapotranspiracja w latach 1951-1990 na Kujawach wyniosła w lipcu około 145 mm, a wyznaczona w tej pracy dla okresu 50 lat (1954-2003) – 147 mm.

Interesujące było również porównanie w tych samych okresach średnich sum opadów P i średniej ewapotranspiracji potencjalnej ET_p , czyli takiej, jaka występuje w warunkach nieograniczonego dostępu buraka cukrowego do wody. Jest to jednocześnie poziom ewapotranspiracji, który gwarantuje plon rośliny w wysokości około $50 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ na glebach średnich i ciężkich [NOWAK, 1986; ŁABĘDZKI, ROGUSKI, 2001]. Stwierdzono, że za wyjątkiem okresu I, w pozostałych okresach występował niedobór opadów w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej (por. tab. 6.1.1 i tab. 6.1.2.). Jest to ważna cecha warunków agroklimatycznych badanego rejonu.

Cechę tę, ale w stosunku do ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o , potwierdzali wcześniej inni autorzy. ROGUSKI, KASPERSKA i ŁABĘDZKI [1996] podają, że w Bydgoszczy w wieloleciu 1945-1994 średni klimatyczny bilans wodny ($P - ET_o$) zmieniał się w zakresie od -185 mm do 457 mm. W latach przeciętnych ($p = 50\%$) już był ujemny i wynosił -226 mm, co wskazuje na wyraźną dominację okresów suchych w badanym regionie. Niedobór opadów w stosunku do ewapotranspiracji wskaźnikowej pogłębiał się jeszcze bardziej w okresach suchych i wynosił -326 mm dla $p = 20\%$, -378 mm dla $p = 10\%$, -421 mm dla $p = 5\%$ oraz -502 mm dla $p = 1\%$.

Badania ROJKA i WIERCIOCH [1995] pokazały, że w 40-letnim okresie (1951-1990) w Poznaniu zdecydowanie przeważały lata z ujemnymi wielkościami klimatycznego bilansu wodnego ($P - E_o$) w odniesieniu do parowania wskaźnikowego E_o . Co drugi rok, czyli z prawdopodobieństwem przewyższenia $p = 50\%$ wynosiły one około -150 mm, -250 mm z $p = 30\%$ (raz na 3 lata), -320 mm z $p = 10\%$ (raz na 10 lat), a -350 mm z $p = 5\%$ (raz na 20 lat). Również raz na 20 lat ($p = 95\%$) występują dodatnie wielkości ($P - E_o$), które wynoszą 50 mm. Z tych danych wynika, że ujemny klimatyczny bilans wodny mógł występować w badanym wieloleciu 8 razy na 10 lat.

Otrzymane wartości klimatycznego bilansu wodnego dla obu miast różnią się między sobą, ale różnice spowodowane są sposobem obliczania parowania wskaźnikowego i

ewapotranspiracji wskaźnikowej. W pierwszym przypadku wielkość ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o obliczono według wzoru Penmana. W drugim wielkość parowania E_o (parowanie z wolnej powierzchni) obliczono według wzoru Baca na parowanie wskaźnikowe uwzględniające niedosyt wilgotności, prędkość wiatru i promieniowanie całkowite. Parowanie wskaźnikowe, obliczone zgodnie ze wzorem Baca, w latach 1951-1990 w rejonie Wielkopolski i Kujaw wynosiło w okresie wegetacyjnym od 450 do 490 mm [ROJEK, ŻYROMSKI, 1994]. Według KĘDZIORY [2005] parowanie wskaźnikowe w okresie IV-X w 30-letnim okresie 1965-1994 w rejonie Kujaw wynosiło około 500 mm, a klimatyczny bilans wodny w tym samym okresie, ale w latach 1951-1990 około -130 mm.

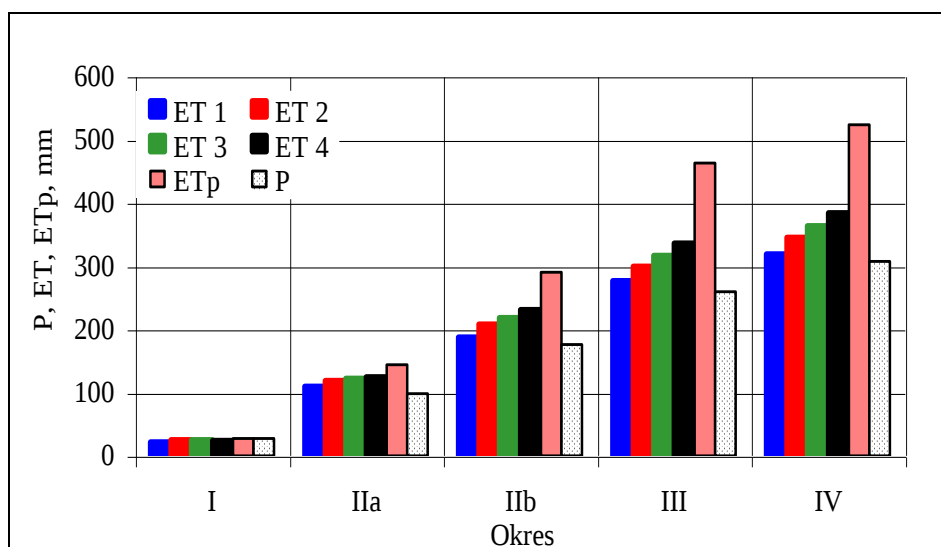
Dla zobrazowania relacji między opadami i ewapotranspiracją stosuje się niedobór klimatyczny opadów N , obliczany jako różnica między ewapotranspiracją wskaźnikową ET_o i sumą opadów P ($N = ET_o - P$). Na jego podstawie można wnioskować o niedoborach wody dla rolnictwa i potrzebie nawodnień roślin uprawnych i użytków zielonych. Badania na stacjach MUZ w rejonie Kujaw pokazały, że w okresie wegetacyjnym najbardziej prawdopodobne ($p = 50\%$) niedobory opadów na stacji Bydgoszcz-IMUZ wynoszą 226 mm, w rejonie Kruszwicy 201 mm, a we Frydrychowie 228 mm. W okresie lat suchych ($p = 10\%$), niedobory te wynoszą odpowiednio 378, 360 i 390 mm. Największe niedobory występują w maju, czerwcu i lipcu [Program ..., 1997].

Różnica między sumą opadów atmosferycznych i ewapotranspiracją potencjalną (ewapotranspiracją w warunkach nieograniczonego zaopatrzenia roślin w wodę) określa się mianem rolniczo-klimatycznego bilansu wodnego (rolniczo-klimatycznego niedoboru lub nadmiaru opadów). Ujemne wartości są traktowane jako niedobory opadowe w stosunku do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji w danym okresie. W warunkach Kujaw w badanym wieloleciu, rolniczo-klimatyczny bilans wodny w okresie wegetacji wyniósł średnio -216 mm, a na przykład w lipcu -61 mm. Taką samą wartość dla lipca (-60 mm) podają ROJEK i WIERCIOCH [1995].

Badania MIATKOWSKIEGO [1986] wykonane na czarnych ziemiach zdegradowanych zbrunatniałych na Kujawach wykazały, że polowe zużycie wody przez buraki cukrowe wynosiło w roku suchym (1983) ok. 250 mm, a wykorzystanie zasobów wody glebowej około 110 mm. Systematyczne pomiary wilgotności były wykonywane do głębokości 100 cm, jednak w okresie największego wyczerpania zasobów wody glebowej stwierdzono zmniejszanie się wilgotności gleby do głębokości 150 cm. Przyjmując, że rośliny z warstwy 1,0-1,5 m wykorzystywały 50% zasobów wody dostępnej (ok. 30 mm), rzeczywiste polowe

zużycie wody wyniosło 280 mm, a zapasów wody glebowej ok. 140 mm. Obliczenia modelowe przeprowadzone przez autora w odniesieniu do 1983 r. wykazały zbliżone zużycie wody, wynoszące 240 mm na glebie *G1* ($ZWU = 103$ mm), 262 mm na glebie *G2* ($ZWU = 137$ mm), 280 mm na glebie *G3* ($ZWU = 165$ mm) i 303 mm na glebie *G4* ($ZWU = 203$ mm); średnio na wszystkich badanych glebach zużycie wody wyniosło 271 mm.

Zmiany w poszczególnych okresach średnich wartości P i ET_p oraz ET na badanych glebach przedstawia rysunek 6.1.8. Widoczne różnice między tymi wielkościami w wieloleciu pojawiają się dopiero od okresu IIa i na koniec okresu wegetacji są największe. Potwierdza to wcześniej zaobserwowaną prawidłowość, że wpływ suszy meteorologicznej i glebowej na zmniejszenie ewapotranspiracji zaznacza się wyraźniej w miarę rozwoju rośliny i jest większy na glebach o mniejszych zdolnościach retencyjnych.



Rys. 6.1.8. Średnie wartości ET , ET_p , P , w okresach;
 ET_1 , ET_2 , ET_3 , ET_4 – ewapotranspiracja na badanych glebach *G1*, *G2*, *G3*, *G4*

Współczynniki korelacji między opadem P i ewapotranspiracją rzeczywistą ET są dodatnie, co oznacza, że wraz ze wzrostem opadów rośnie też ewapotranspiracja (tab. 6.1.3). Zależą one, podobnie jak ET , od retencji gleb. Na glebach lżejszych retencja stanowi mniejszy „bufor” i opad „przekształca się” szybciej w ewapotranspirację, stąd wpływ opadu na ewapotranspirację jest wyższy. Najsłabsza korelacja występuje w I okresie, ponieważ w tym czasie duże znaczenie odgrywa zapas wody pozimowej. Maleje ono wraz z rozwojem rośliny.

Tab. 6.1.3. Współczynniki korelacji między P i ET_1, ET_2, ET_3, ET_4 oraz P i ET_p w okresach

Okres		ET_1	ET_2	ET_3	ET_4	ET_p
I	P	0,30*	0,03	0,03	0,08	-0,50*
IIa	P	0,64*	0,62*	0,57*	0,53*	-0,52*
IIb	P	0,67*	0,64*	0,61*	0,56*	-0,57*
III	P	0,80*	0,82*	0,81*	0,79*	-0,59
IV	P	0,82*	0,83*	0,83*	0,82*	-0,59*

*- statystycznie istotny z $p < 0,05$

ET_1, ET_2, ET_3, ET_4 – ewapotranspiracja na glebach G_1, G_2, G_3, G_4

Ujemny współczynnik korelacji między P i ET_p wskazuje, że ET_p , która zależy od warunków meteorologicznych, maleje wraz ze wzrostem opadów (tab. 6.1.3). Jest to spowodowane faktem, że okresy opadowe charakteryzują się jednocześnie niższą temperaturą, mniejszym promieniowaniem i mniejszym niedosytem wilgotności powietrza.

Zgodnie z przyjętą metodyką, ewapotranspiracja potencjalna ET_p , w badanym wieloleciu była jednakowa w danym okresie i roku na wszystkich badanych glebach. W przeciętnych warunkach meteorologicznych na Kujawach, gdy średni deficyt opadów w okresie wegetacji w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej ($P - ET_p$) wynosił 216 mm, dominowała zależność $ET < ET_p$. Jak już wcześniej pokazano, suma ewapotranspiracji rzeczywistej w okresie wegetacji była równa ewapotranspiracji potencjalnej ($ET = ET_p$) tylko 4 razy w całym 50-letnim okresie badawczym i tylko na glebie G_4 o największym zapasie wody użytecznej. Widać więc, że ewapotranspiracja potencjalna nie charakteryzuje przeciętnych warunków rozwoju roślin, wynikających z wieloletniej zmienności warunków meteorologicznych, traktując ciąg 50-letni jako wystarczający do takiej charakterystyki. Z tego względu wydaje się, że dalsze analizy suszy i jej wpływu na ewapotranspirację należy również prowadzić w odniesieniu do warunków przeciętnych, charakteryzowanych przez średnią wielkość zużycia wody przez rośliny w wieloleciu (ET_{sr}), a nie pod kątem tylko potencjalnych możliwości uzyskiwania wysokich plonów i ewapotranspiracji potencjalnej (ET_p). W przeciętnych warunkach opadowych na Kujawach w okresie wegetacji nie ma możliwości uzyskiwania wysokich plonów bez nawodnień. DRUPKA i GRUSZKA [1974] oraz ROJEK [1987] stwierdzają, że w 7 latach na 10 uprawy buraka cukrowego powinny być nawadniane, co wskazuje na taką częstotliwość pojawiania się suszy rolniczej.

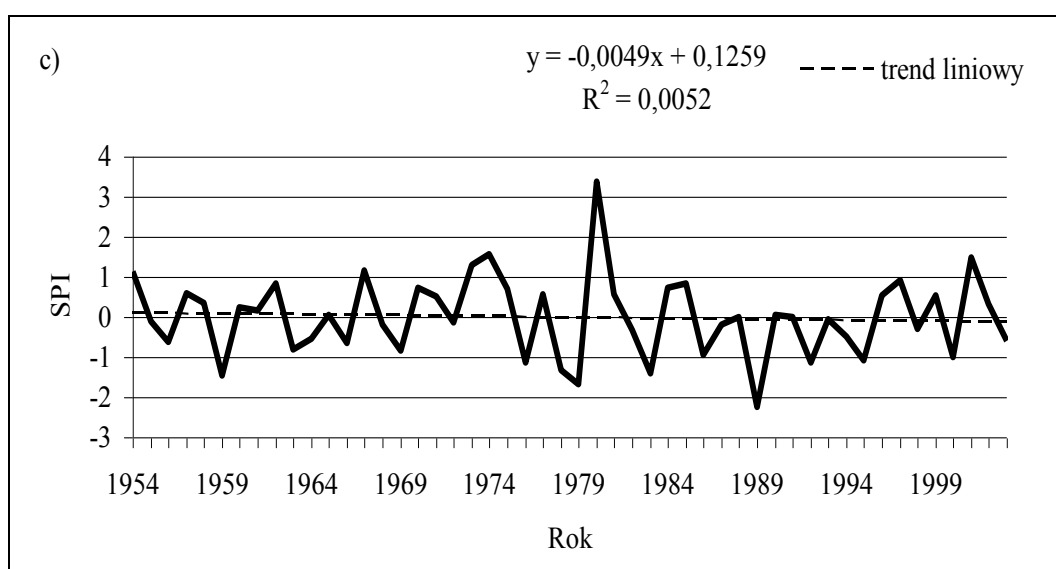
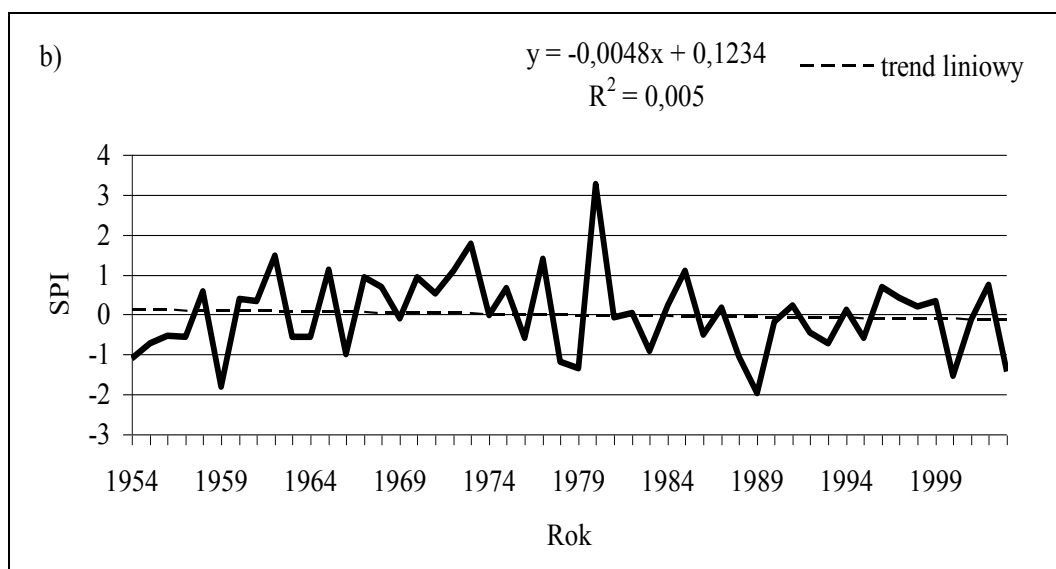
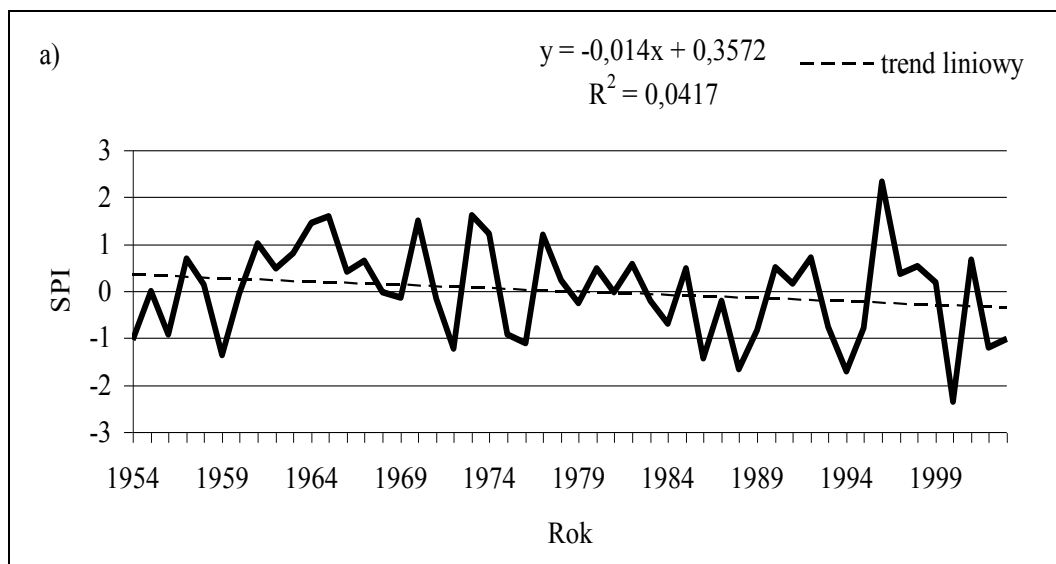
6.2. WSKAŹNIK STANDARYZOWANEGO OPADU *SPI* JAKO WSKAŹNIK SUSZY METEOROLOGICZNEJ

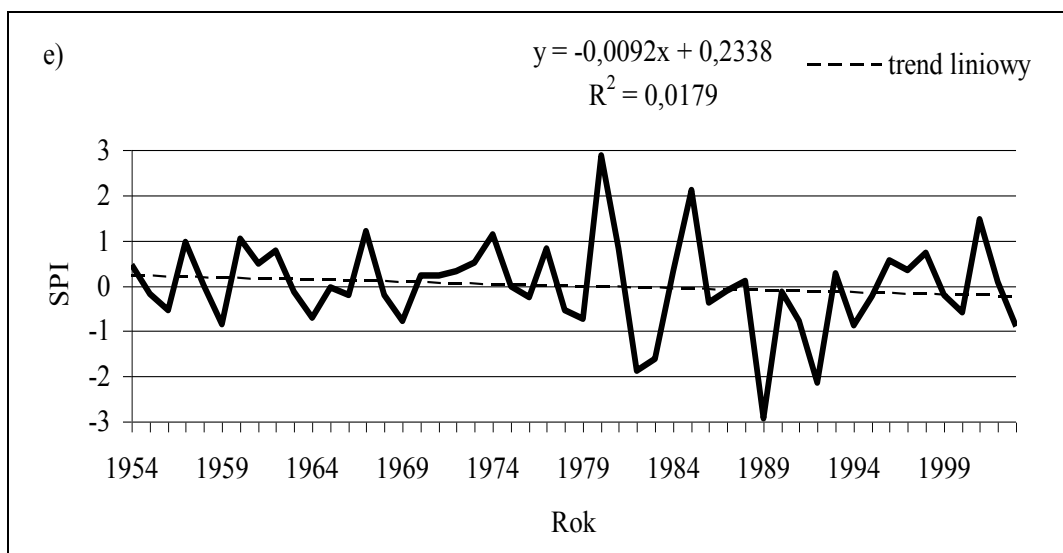
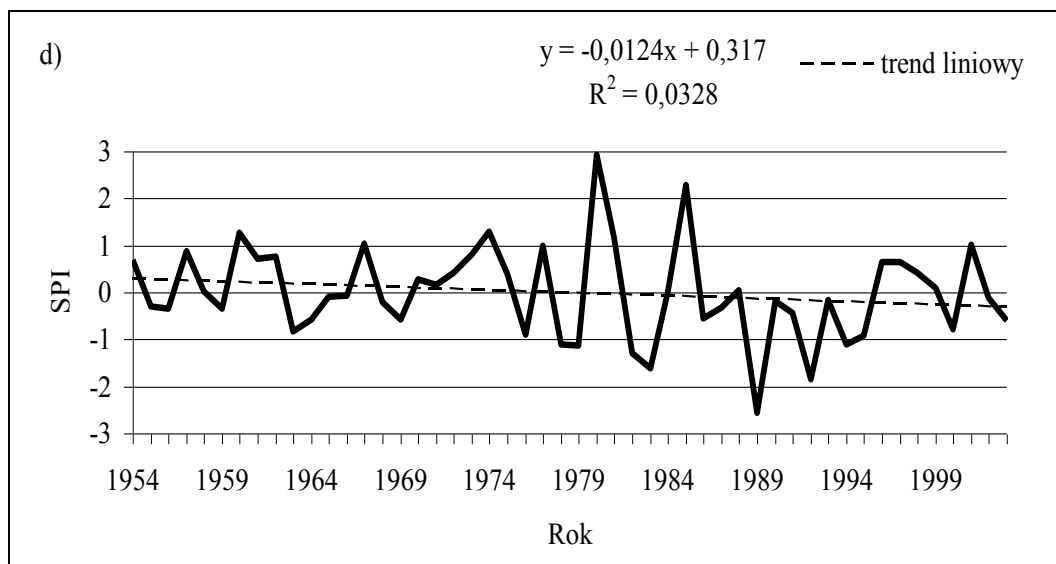
Wartości standaryzowanego wskaźnika *SPI* obliczano w latach 1954-2003 dla tych samych pięciu okresów, w których analizowano zmienności opadów *P*. Są to:

3. okres I: 21.04 - 10.05,
4. okres IIa: 21.04 - 20.06,
5. okres IIb: 21.04 - 20.07,
6. okres III: 21.04 - 31.08,
7. okres IV: 21.04 - 30.09.

Przeprowadzono klasyfikację tych okresów pod względem intensywności suszy, przyjmując obecnie powszechnie stosowaną klasyfikację, w której wartości progowe kolejnych klas suszy *SPI* wynoszą: -1,0 (susza umiarkowana), -1,5 (susza silna), -2,0 (susza ekstremalna) [HOW TO WORK..., 1998; NDMC, 2004]. W tym podziale okres, w którym $-0,99 < SPI < 0$ jest uważany jako okres normalny, chociaż autorzy klasyfikacji w swoich pierwszych pracach dotyczących wskaźnika *SPI* traktowali go jako *łagodną suszę* (*mild drought*) [MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993, 1995]. Prawdopodobieństwo pojawienia się suszy łagodnej zmienia się od 0,5 do 0,16, co oznacza, że susza w tej klasie intensywności może pojawiać się zarówno, co drugi rok, jak i raz na 5 lat.

Zmienność wartości *SPI* w powyższych okresach w wieloleciu 1954-2003 przedstawia rysunek 6.2.1.





Rys. 6.2.1. Przebieg wartości *SPI* w wieloleciu 1954-2003 w okresach:
a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV

W okresie I (21.04-10.05) badanego wielolecia 1954-2003, najmniejszą wartość wskaźnika *SPI* = -2,4 zanotowano w 2000 r. (rys. 6.2.1a), kiedy w Bydgoszczy spadło zaledwie 2 mm opadu. Według przyjętej klasyfikacji była to susza ekstremalna. Pojawiła się ona w czasie pokrywającym się z fazą fenologiczną I (21.04-10.05 - siew i kiełkowanie) i była skutkiem utrzymywania się układu wyżowego, z bardzo ciepłą i suchą masą powietrza napływającego znad Rosji [LORENC i in., 2000]. Okres bezopadowy na Kujawach trwał prawie miesiąc i spowodował duże zagrożenie dla wschodzących roślin, w tym także dla buraków cukrowych. Na części z nich, już pod koniec okresu I zaobserwowano zasychanie wschodzących kielek [ŁABĘDZKI, 2000]. Wspomniana susza wiosenna objęła znaczne obszary kraju i trwała jeszcze

przez całą następną fazę fenologiczną IIa (11.05-20.06 - wschody buraka cukrowego) oraz dekadę kolejnej fazy fenologicznej IIb (21.06-20.07 - 3 para liści i początek grubienia korzeni) [ZIERNICKA, ZAWORA, 2002]. Krótkotrwałe opady, które pojawiły się dopiero pod koniec maja i czerwca spowodowały złagodzenie suszy meteorologicznej, ale były zbyt późne, aby zahamować proces zasychania roślin.

W badanym wieloleciu w okresie I pojawiła się tylko jedna seria dwóch kolejnych lat z suszami (2002-2003). W obu przypadkach były to susze umiarkowane. W latach 1975-76, 1988-89 i 1993-95 stwierdzono w każdej z wymienionych serii jedną suszę umiarkowaną, a w pozostałym roku lub w dwóch latach okres normalny pod względem ilości opadu ($SPI \approx -1,0$), który można określić jako suszę łagodną. W latach 60-tych stwierdzono tylko 1 suszę (dominowały warunki normalne i umiarkowanie wilgotne), a w latach 80-tych zanotowano tylko 2 przypadki z suszą. Ujemny i nieistotny statystycznie na poziomie $p = 0,05$ trend wartości SPI świadczył o zwiększaniu się ilości susz meteorologicznych w okresie wczesnowiosennym.

W okresie IIa, trwającym od 21.04 do 20.06 i obejmującym fazy fenologiczne I i IIa (okres od siewu do pojawienia się 3 pary liści), najsilniejsza susza w badanym wieloleciu wystąpiła w 1989 r. Była to susza ekstremalna ($SPI = -2,0$), która w dalszych badanych okresach jeszcze pogłębiała się. W tym okresie zanotowano dwie serie susz: w latach 1978-79 (obie susze umiarkowane) i 1988-89 (susza umiarkowana i ekstremalna) (rys. 6.2.1b). Stwierdzono, że w latach 1959, 1988-89 i 2000 susze pojawiały się zarówno w obu dotychczas analizowanych okresach. W okresie IIa trend wskaźnika SPI był również ujemny i nieistotny statystycznie.

Mała ilość opadów w fazie fenologicznej IIb w 1989 r. spowodowała, że w okresie IIb wystąpiła susza ekstremalna ($SPI = -2,1$). Podobny przypadek suszy trwającej przez okresy I, IIa i IIb zanotowano w 1959 r. W okresie I była to susza umiarkowana, a w okresach IIa i IIb susza silna. W wieloleciu 1954-1975 w okresie IIa wspomniana susza w 1959 r. była jedyną suszą. Dopiero w następnych latach susze o różnej intensywności pojawiały się już częściej. W okresie IIb zanotowano tylko jedną serię susz (w latach 1978-79). Podobnie jak w poprzednich okresach trend zmian wskaźnika SPI w okresie IIb był ujemny i nieistotny statystycznie.

W okresie III, obejmującym fazy fenologiczne I, IIa, IIb i III (począwszy od fazy siewu i wschodów do fazy żółknięcia liści), serie susz wystąpiły w latach 1978-79 (obie susze umiarkowane) i 1982-83 (susza umiarkowana i silna) (rys. 6.2.1.d). W wieloleciu 1986-1995 susza ekstremalna wystąpiła w 1989 r. ($SPI = -2,6$), susza silna w 1992 r. ($SPI = -1,9$), susza umiarkowana w 1994 r. ($SPI = -1,1$). Natomiast susze łagodne ($-0,99 < SPI < 0$) pojawiły się

w latach 1990, 1991, 1993 i 1995 (rys. 6.2.1d). Ekstremalna susza w 1989 r. (był to jednocześnie najsuchszy okres w całym wieloleciu) była kontynuacją suszy, która rozpoczęła się z początkiem okresu wegetacji buraka cukrowego. Od 21.04 do końca okresu III, czyli do 31.08, w Bydgoszczy spadło 92 mm opadów, tj. 35% średniej sumy opadów w wieloleciu. Analogicznie podczas silnej suszy w 1992 r. spadło 125 mm (48%). Stwierdzono, że w tym okresie susza umiarkowana pojawiła się po raz pierwszy w Bydgoszczy dopiero w 1978 r.; w ciągu poprzednich 23 lat zanotowano tylko 2 susze łagodne. Słaby, ujemny i nieistotny statystycznie trend liniowy wartości wskaźnika *SPI* świadczył o niewielkim wzroście ilości susz meteorologicznych w tym okresie.

Z rysunku 6.2.1e widać, że susze meteorologiczne notowane w okresach wegetacji buraka cukrowego (okresach IV) pojawiły się dopiero w latach osiemdziesiątych. W latach 1982-83 wystąpiła seria susz silnych w czasie, których wskaźnik *SPI* wynosiła -1,9 i -1,6. Na podstawie danych uzyskanych z 31 stacji pomiarowych leżących na obszarach poniżej 400 m n.p.m stwierdzono, że susza w 1982 r. swoim zasięgiem objęła 90%, a w roku następnym 82% obszaru Polski [ŁABĘDZKI, BĄK, 2004b]. W Bydgoszczy susza w 1989 r. była pierwszą suszą ekstremalną, jaka pojawiła się w badanym wieloleciu 1954-2003 i zarazem najbardziej intensywną ($SPI = -2,9$). Był to najsuchszy okres wegetacji, podczas którego spadło 105 mm opadów, czyli 34% średniej sumy opadów w wieloleciu 1954-2003. Taka susza jak we wspomnianym roku pojawia się z częstotliwością mniejszą niż 1 raz na 100 lat. Jednocześnie w Polanowicach, które leżą w centrum Kujaw, w okresie wegetacyjnym (IV-IX) spadło zaledwie 85 mm [BĄK, ŁABĘDZKI, 2002], a w okresie wegetacji buraka cukrowego (21.04-30.09) jeszcze mniej, bo tylko 82 mm i opady te stanowiły 28% średniej sumy opadów w wieloleciu 1954-1998. Niższe opady w Polanowicach w stosunku do Bydgoszczy lub Torunia w okresie letnim można wytłumaczyć m.in. mniejszym udziałem opadów pochodzących ze zjawisk burzowych. Tendencję do zmniejszanie się ilości opadów ku centrum Kujaw potwierdzają badania dokonane przez KONOPKO [1988]. Wiosenno-letnia susza w 1989 r. swoim zasięgiem objęła prawie $\frac{3}{4}$ kraju.

Kolejna susza ekstremalna pojawiła się w badanym wieloleciu w 1992 r. Chociaż nie była ona rekordowo rozległa (objęła prawie 75% obszaru Polski), to wyróżniała się swoją intensywnością na znacznym obszarze [KUŹNIAR, TWARDY, KOSTUCH, 2001]. W Bydgoszczy wartość *SPI* wynosiła -2,2. Suszy meteorologicznej towarzyszyła susza glebowa i hydrologiczna, która istotnie wpłynęła na rozwój i plonowanie roślin uprawnych. Od połowy czerwca zapasy wody dostępne dla roślin całkowicie się wyczerpały, wilgotność gleb spadła

poniżej wartości krytycznej i rośliny znalazły się na granicy trwałego wędnięcia. Na intensywność suszy glebowej i hydrologicznej miała wpływ temperatura, znacznie wyższa od przeciętnej z wielolecia. Np. średnia temperatura w sierpniu osiągnęła 20,8°C i przekroczyła średnią z wielolecia, która wynosiła 17,5°C. Spowodowało to zwiększenie potencjalnej ewapotranspiracji roślin, w związku z czym rejon Kujaw był porównywalny z obszarem klimatycznym Słowacji, a nawet Węgier [KACA, STĄPEL, ŚNIADOWSKI, 1993]. W latach 1954-2003 stwierdzono słaby ujemny i nieistotny statystycznie trend wartości wskaźnika *SPI* w okresie wegetacji, podczas gdy ujemny trend liniowy opadów *P* (rys. 6.1.1), też statystycznie nieistotny na poziomie $p = 0,05$, pokazywał większe zmiany sum opadów w okresie wegetacji buraka cukrowego w badanym wieloleciu. Jako prawdopodobną przyczynę tej rozbieżności można przyjąć fakt, że znormalizowane sumy opadów różnią się między sobą mniej, niż sumy pomierzonych opadów, a otrzymany w wyniku normalizacji ciąg pomiarowy jest bardziej wygładzony, niż ciąg sum opadów.

W badaniach nad suszą w okresie wegetacyjnym (IV-IX) w rejonie Wielkopolski i Kujaw w latach 1954-1998 wykazano, że spośród 6 stacji leżących na tym obszarze (Bydgoszcz, Toruń, Polanowice, Koło i Poznań), najwięcej miesięcy z suszą i z suszą ekstremalną zanotowano w Polanowicach [BAK, ŁABĘDZKI, 2002]. Tutaj też w 1989 r. zanotowano rekordową wartość wskaźnika *SPI* = -3,5 w okresie wegetacyjnym (IV-IX).

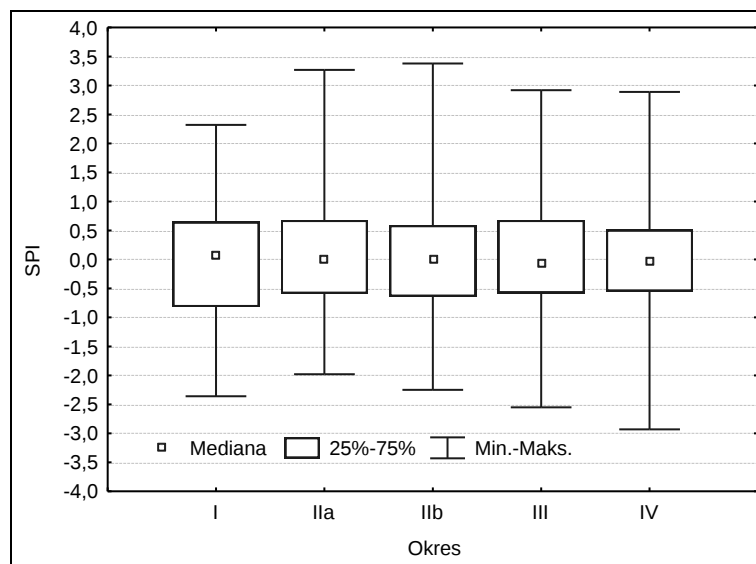
Susze w Polsce i na Kujawach w drugiej połowie XX w. były przedmiotem wielu badań i analiz [m. in. BAK, ŁABĘDZKI, 2002, 2004; BOBIŃSKI, MEYER, 1992a, 1992b; FARAT, KĘPIŃSKA-KASPRZAK, MAGER, 1994; KUŹNIAR, TWARDY, KOSTUCH, 2001; MAGER i in., 1999; ŁABĘDZKI, 2000a; ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI, 1996; ROJEK, WIERCIOCH, 1995; WOŚ, 1994, 2003].

W przebiegu susz w Polsce w drugiej połowie XX wieku wyraźnie zaznaczył się przełom w latach osiemdziesiątych. Począwszy od drugiej połowy 1982 r. rozpoczął się ciąg lat o znacznym łącznym deficycie odpływu, co doprowadziło do szczególnie głębokiej suszy hydrologicznej w latach 1982-1984 i 1989-1992. Mimo opadów zimowych w roku 1982 i bardziej mokrych lat 1986, 1987 i 1988, nie zmienił się ogólnie suchy charakter tego okresu. W latach 1989-1991 suszę powodowały wyże atmosferyczne i towarzyszące im ciepłe powietrze utrzymujące się przez znaczną część roku [BOBIŃSKI, MEYER, 1992a, 1992b].

Jednym z powszechnie stosowanych wskaźników wyznaczania okresów suchych są kryteria opadowe Kaczorowskiej [KACZOROWSKA, 1962; TOMASZEWSKA, 1994] (tab. 2.1). Na ich podstawie stwierdzono, że w rejonie Wielkopolski i Kujaw w latach 1954-1998 okresy z

suszą stanowiły około 40% całego sezonu letniego [BAK, ŁABĘDZKI, 2002]. Najmniejszy udział miały okresy skrajnie suche, których było w regionie przeciętnie 12. Trzykrotnie więcej (36) było okresów bardzo suchych. Największy udział stanowiły miesiące suche - ok. 59. Najwięcej miesięcy z suszą notowano w Polanowicach (113). Powyższe dane oraz wyniki uzyskane przez autora na podstawie wartości wskaźnika *SPI* wskazują na dużą ilość występowania susz meteorologicznych na Kujawach i na duże zagrożenie pojawiania się susz meteorologicznych.

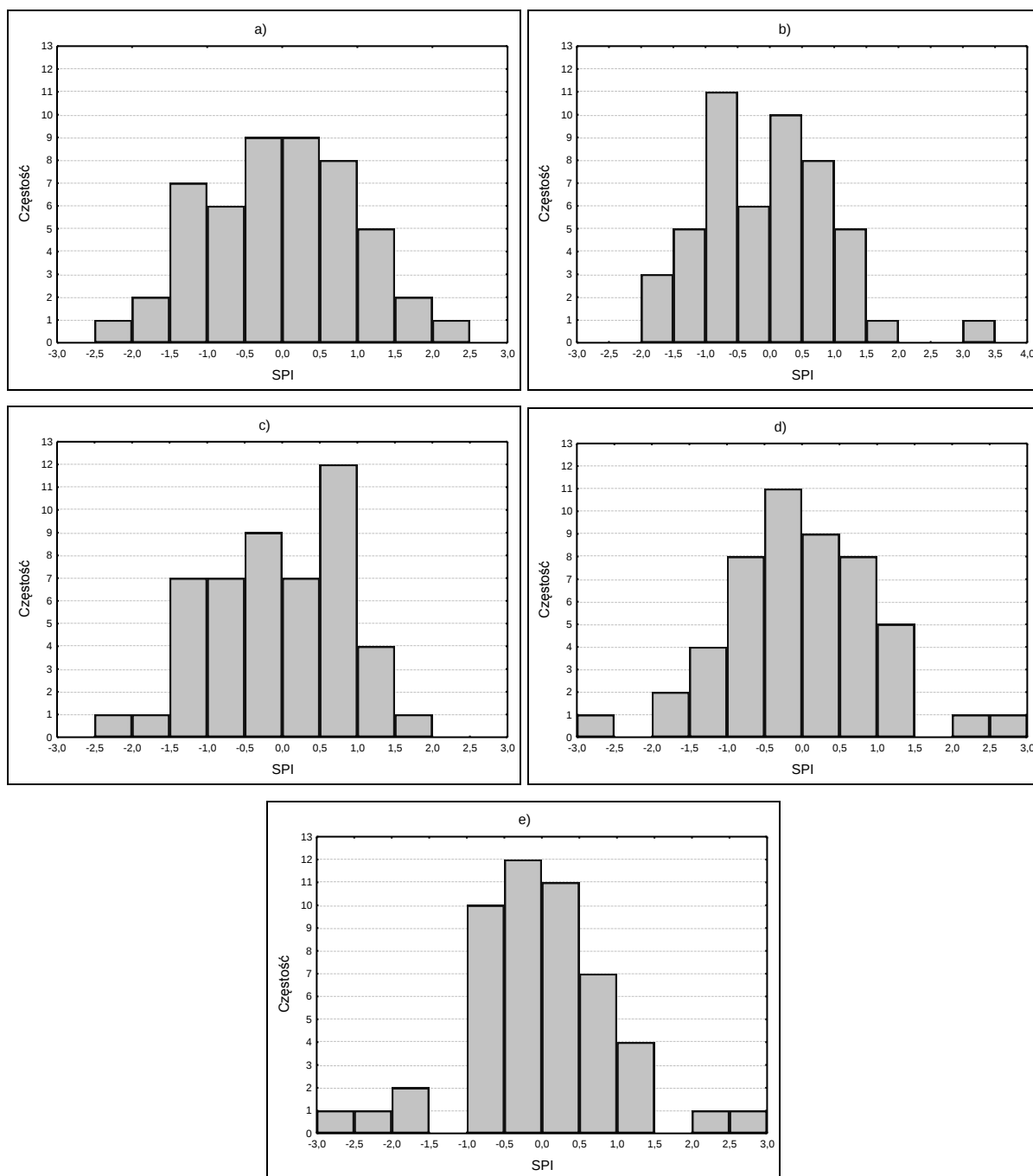
Wybrane statystyki *SPI*, takie jak zakres wartości wskaźnika, dolny i górny kwartył oraz medianę w poszczególnych okresach, przedstawiono w postaci wykresów skrzynkowych na rysunku 6.2.2.



Rys. 6.2.2. Statystyki wartości *SPI* w okresach

Różnice w położeniu dolnego i górnego kwartyła oraz mediany w poszczególnych okresach świadczą o niepełnym dopasowaniu przekształconych ciągów sum opadów do rozkładu normalnego standaryzowanego. Taki rozkład charakteryzuje się stałymi parametrami: wartością średnią równą medianie i równą 0 oraz średnim odchyleniem standardowym równym 1, z czego wynika równość wartości zmiennej dla danego prawdopodobieństwa przekroczenia lub nieosiągnięcia (kwartyle). Normalność przekształconych rozkładów sum opadów w okresach I, IIa, IIb, III, IV została zbadana testem normalności Lillieforsa zawartym w pakiecie *STATISTICA* [KOBUS, PIETRZYKOWSKI, ZIELIŃSKI, 2001] i nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu na poziomie $p = 0,05$.

Położenie wartości minimalnej, czyli dolnego wąsa poniżej wartości -2,0 i górnego powyżej 2,0 świadczy o tym, że w każdym okresie w badanym wieloleciu wystąpił co najmniej jeden okres suszy ekstremalnej i jeden okres ekstremalnie wilgotny. Rozkład częstości wskaźnika *SPI* przedstawiono na rysunku 6.2.3, a częstości klas suszy *SPI* zestawiono w tabeli 6.2.1.



Rys. 6.2.3. Rozkład częstości wartości wskaźnika *SPI* w okresach:
a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV

Na początku okresu wegetacji buraka cukrowego (okres I) obserwowano prawie symetryczny rozkład okresów suchych i wilgotnych. Spośród susz dominowały susze umiarkowane, ale ponad dwukrotnie więcej było okresów normalnych, w których pojawiały się susze łagodne ($-1,0 < SPI < 0$). W następnym okresie IIa susze łagodne również wyraźnie dominowały nad pozostałymi, sklasyfikowanymi rodzajami suszy. W tym okresie brak było suszy ekstremalnej. Okres IIb charakteryzował się koncentracją wartości *SPI* w zakresie od -1,5 do 1,0 i pojedynczymi przypadkami wystąpienia suszy silnej i ekstremalnej. W okresie III nastąpiło jeszcze wyraźniejsze zgrupowanie wartości *SPI* w zakresie od -1,0 do 1,0. Pojawiły się wszystkie klasy susz, przy czym ilość susz łagodnych była kilkukrotnie większa od ilości susz umiarkowanych. Podobny rozkład częstości obserwowano w całym okresie wegetacji. Wyróżnikiem tego okresu jest brak suszy umiarkowanej.

Łącznie najwięcej susz zanotowano w okresie I i stanowiły one 20% badanego wielolecia. W następnych okresach susz meteorologicznych było coraz mniej: w okresie IIb - 18%, IIa - 16%, III - 14%, IV - 8% (tab. 6.2.1). W badanym wieloleciu nie stwierdzono suszy ekstremalnej (*D3*) w okresie IIa, w pozostałych okresach pojawiały się one 1-2 razy w całym wieloleciu. Najczęściej pojawiały się susze umiarkowane (*D1*), zwłaszcza w okresie I i IIb. Z tego zestawienia wynika, że we wszystkich okresach obejmujących kolejne fazy rozwoju buraka cukrowego dominowały okresy normalne oraz wilgotne. W tabeli 6.2.1 podano również częstości susz łagodnych, które rozpoczynają się przy wartości *SPI* < 0 . Po ich uwzględnieniu ogólny udział susz meteorologicznych wzrósł do 52% w okresie I, III i IV, oraz 50% w okresie IIa i IIb.

Tabela 6.2.1. Częstości klas suszy według wskaźnika *SPI*

Klasa suszy	Wartość progowa <i>SPI</i>	Okres				
		I	IIa	IIb	III	IV
<i>D3</i>	-2,0	1	0	1	1	2
<i>D2</i>	-1,5	2	3	1	2	2
<i>D1</i>	-1,0	7	5	7	4	0
	0,0	16	17	16	19	22
<i>D1 + D2 + D3</i>		10	8	9	7	4

O wartości standaryzowanego wskaźnika opadów *SPI* decyduje nie tylko bieżąca suma opadów, ale także wartość średnia i zmienność w wieloleciu wyrażona średnim odchyleniem standardowym. Te dwie ostatnie statystyki zależą natomiast od długości badanego

historycznego ciągu opadów. Zaleca się, aby do badań wykorzystywać co najmniej 30-letnie ciągi pomiarowe [MCKEE, DOESKEN, KLEIST, 1993], chociaż niektórzy autorzy zalecają jeszcze dłuższe okresy [GUTMANN, 1999; ROJEK, ŻYROMSKI, 2004]. Stwierdzono, że im dłuższy jest ciąg pomiarowy, tym większe jest prawdopodobieństwo, że po zastosowaniu przekształcenia normalizującego nowo otrzymany ciąg wartości będzie spełniał warunek normalności i jednocześnie to dopasowanie będzie coraz lepsze [LLOYD-HUGHES, SAUNDERS, 2002]. Zbyt krótkie ciągi pomiarowe na ogół charakteryzują się dużą zmiennością wartości opadów, czasami więc trudno jest znaleźć właściwą funkcję przekształcającą badany ciąg do rozkładu normalnego i na ogół uzyskuje się negatywne wyniki testów statystycznych np. testu zgodności χ^2 lub testu normalności Lillieforsa. W wyniku standaryzacji nienormalizowanych ciągów opadowych lub standaryzacji normalizowanych ciągów, które jednak nie spełniają warunku normalności, nie otrzymuje się wartości *SPI*, lecz standaryzowane anomalie opadów (*Standardized Rainfall Anomaly*) [AGNEW, 1999]. W praktyce oznacza to różną klasyfikację badanego okresu i ocenę intensywności zjawiska.

Przykładem takich różnic są oceny okresów wegetacyjnych (IV-IX) w Bydgoszczy przeprowadzone przez autora oraz RZEKANOWSKIEGO i in. [2005] w rejonie Kruszyńska Krajeńskiego, miejscowości odległej o ok. 10 km od Bydgoszczy w wieloleciu 1986-1998. Według autora, na podstawie wartości wskaźnika *SPI* obliczonych w oparciu o ciąg pomiarowy z lat 1954-2003, we wspomnianym wieloleciu susza meteorologiczna pojawiła się w Bydgoszczy dwukrotnie w latach 1989 i 1992, a w pozostałych 11 latach wystąpiły okresy normalne. Natomiast w Kruszyńsku Krajeńskim stwierdzono wystąpienie 3 okresów wegetacji z suszą w latach 1989, 1992 i 1994, 7 okresów normalnych i 3 okresy wilgotne. Powstałe różnice biorą się z faktu, że w pierwszym przypadku wyróżniony okres badań był rozpatrywany na tle 50-letniego ciągu pomiarowego, a w drugim – 13-letniego.

Kolejny przykład niemetodycznego obliczania wartości standaryzowanego wskaźnika opadów można znaleźć w pracy dotyczącej analiz suszy w Północnej Karolinie. W tym przypadku autorzy obliczali wartości *SPI* w okresach jednomiesięcznych w latach 1994-1999, a więc bazując na bardzo krótkim, tylko 6-letnim ciągu [SIMS, NIYOGI, RAMAN, 2002].

Są też prace, w których autorzy opierali się na długich historycznych ciągach opadów. Przykładem jest opracowanie LLOYD-HUGHESA i SAUNDERSA [2002], w której analizę susz meteorologicznych w Europie w różnych skalach czasowych oparto na danych opadowych z lat 1901-1999. Z 50-letnich ciągów opadowych korzystali NAIN, KERSEBAUM i MIRSCHEL [2005], badając w oparciu o wartości wskaźnika *SPI* związki między suszą meteorologiczną i

plonowaniem pszenicy w północnych Niemczech w latach 1985-2001. Z ostatnio opublikowanych polskich prac warto również wymienić opracowanie dotyczące identyfikacji okresów suszy meteorologicznej w okolicach Szczecina na podstawie 30-letniego ciągu opadów w latach 1963-2002 [KALBARCZYK, KALBARCZYK, 2005].

Metoda sumowania opadów od początku okresu wegetacji do końca kolejnej fazy fenologicznej, jaką zastosowano przy obliczaniu wartości wskaźnika *SPI*, jest nowym podejściem w tematyce oceny suszy meteorologicznej w kontekście wpływu tej suszy na suszę rolniczą i nie ma odpowiednika w przeglądanej w literaturze. Obliczanie wskaźnika *SPI* dla kumulowanych sum opadów z kolejnych faz fenologicznych ma swoje uzasadnienie w tym, że przeprowadzona w dalszej części pracy analiza suszy rolniczej w danym okresie jest oparta na wielkości ewapotranspiracji rzeczywistej, która zależy od warunków meteorologicznych i glebowo-wodnych w okresach poprzednich.

Wykorzystując własność wskaźnika standaryzowanego, która pozwala na obliczenia w różnych skalach czasowych, susze meteorologiczne klasyfikowane wartością wskaźnika *SPI* były analizowane przez różnych autorów różnych okresach: dekadowych, miesięcznych, półrocznych, itd. [BAK, ŁABĘDZKI, 2002, 2004; ŁABĘDZKI, 2000; ŁABĘDZKI, BAK, 2004a, 2004b; RZEKANOWSKI i in., 2005] lub innych np. w okresie wzmożonego zapotrzebowania rośliny na wodę [ŻARSKI, DUDEK, RZEKANOWSKI, 2005], traktując każdy przedział czasowy osobno, bez uwzględnienia warunków opadowych w okresie poprzednim. W części prac konfrontowano uzyskane wyniki także z innymi metodami wyznaczania okresów suszy meteorologicznej np. na podstawie kryterium opadowego suszy Kaczorowskiej lub wskaźnika hydrotermicznego Sielianinowa [KALBARCZYK, KALBARCZYK, 2005].

BAK i ŁABĘDZKI [2002] na podstawie analizy częstości wskaźnika *SPI* w okresach miesięcznych stwierdzili, że na Kujawach i Wielkopolsce w latach 1954-98 wystąpiło średnio 41 miesięcy suchszych od normalnych ($D3 + D2 + D1$), które stanowiły 15% całego sezonu letniego. Najmniejszy udział miały okresy ekstremalnie suche *D3*, których było w regionie przeciętnie 6. Dwukrotnie więcej (11) było okresów bardzo suchych *D2*. Największa częstotliwość okresów suchych występowała na obszarze między Kołem, Polanowicami i Płockiem.

Na podstawie wskaźnika względnego opadu *RPI* i klasyfikacji KACZOROWSKIEJ [1962] stwierdzono dwukrotnie większą częstość miesięcy suchych. Znaczne różnice w częstościach występowania okresów suchych według wskaźnika *RPI* i *SPI* mają przyczynę w metodykach zaliczania poszczególnych miesięcy lub sezonów wegetacji do poszczególnych klas suszy.

Kryteria Kaczorowskiej, oparte na wskaźniku *RPI*, są łagodniejsze w ocenie okresów suszy i dlatego częstość susz badana tym wskaźnikiem jest prawie trzykrotnie większa niż w przypadku wskaźnika *SPI*. Wskaźnik *SPI* opiera się na ostrzejszych kryteriach zaliczania okresów niedoboru opadu, zwłaszcza do pierwszej klasy okresów suchych. Można powiedzieć, że wskaźnik *SPI* jest bardziej rygorystyczny w ocenie suszy, tzn. niedobór opadu musi być większy, aby zakwalifikować go do odpowiedniej klasy suszy.

Na zakończenie badań nad zmiennością wskaźnika *SPI* zbadano również relacje między wskaźnikiem *SPI* dla sumy opadów od początku okresu wegetacji do końca badanego okresu i *SPI* dla sumy opadów w badanej fazie fenologicznej (tab. 6.2.2). Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że zależności te były najsilniejsze i istotne statystycznie w okresie pod koniec wiosny i na początku lata (fazy IIa i IIb). Latem i na początku jesieni związki te stawały się coraz słabsze, a tym samym wpływ bieżących opadów w danej fazie fenologicznej na wartość wskaźnika *SPI* był coraz mniejszy. Świadczy to o malejącym udziale opadów i warunków wilgotnościowych opisanych wskaźnikiem *SPI* w danej fazie fenologicznej, w sumie opadów od początku okresu wegetacji do końca tej fazy i odpowiadającej jej wartości *SPI*. Jest to ważna – z uwagi na warunki rozwoju buraka cukrowego – charakterystyka warunków meteorologicznych na badanym obszarze. Wynika z niej, że decydujące znaczenie (z uwagi na ilość opadów) w kształtowaniu suszy meteorologicznej i wielkości przychodu wody z opadów w warunkach opadów mniejszych od średnich, mają opady występujące do końca okresu IIb, czyli do 20.06. W następnych fazach fenologicznych (IIb, III i IV) opady w mniejszym stopniu wpływają na sumy opadów obejmujące opady, które pojawiły się wcześniej i w danej fazie, a więc mają mniejszy wpływ na intensywność suszy meteorologicznej w tych okresach.

Tabela 6.2.2. Współczynniki korelacji między wskaźnikiem *SPI* w fazach i w okresach

Okres	Faza				
	I	IIa	IIb	III	IV
I	1,00				
IIa		0,87*			
IIb			0,80*		
III				0,45*	
IV					0,33*

* - statystycznie istotny z $p < 0,05$

6.3. WSKAŹNIKI SUSZY ROLNICZEJ (CROP DROUGHT INDEX): CDI I CDI_w

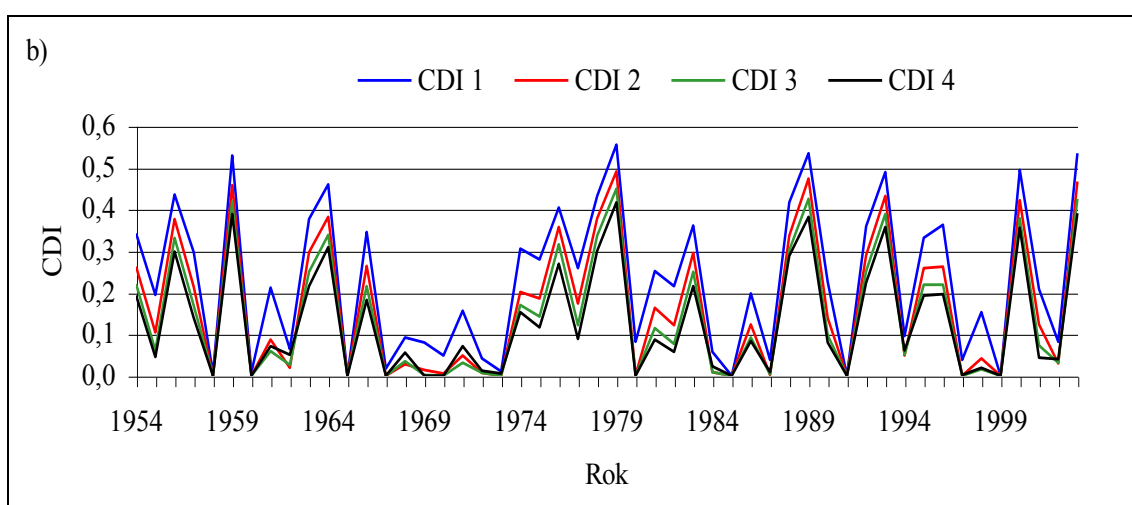
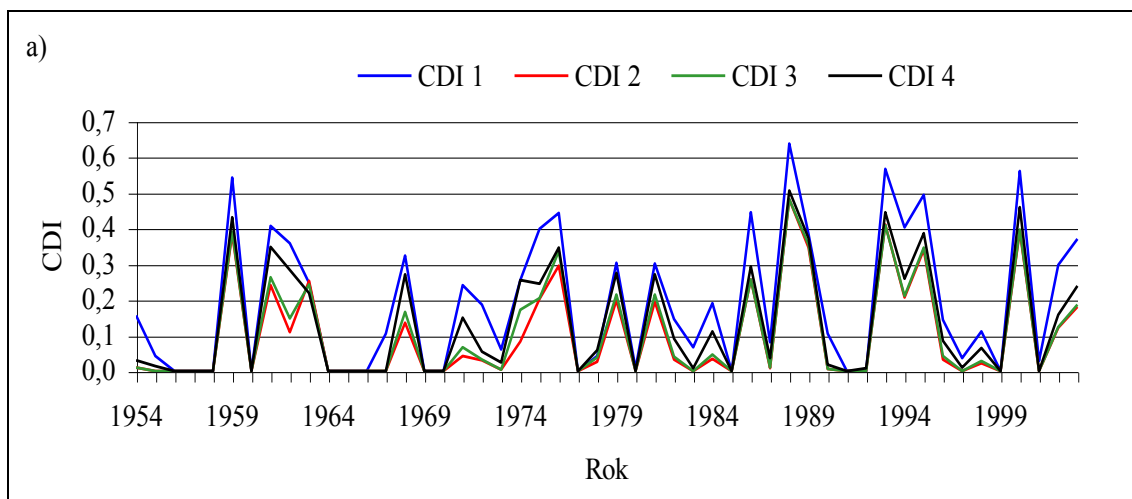
Przedmiotem analizy są wskaźniki suszy rolniczej (*Crop Drought Index*): CDI i CDI_w . Można analizować wartości CDI i CDI_w w poszczególnych fazach fenologicznych i taka analiza wniosłaby wiele informacji o przebiegu suszy rolniczej na danej glebie i uprawie. W pracy przyjęto jednak, że bardziej wiarygodna jest analiza obu wskaźników w okresach, które narastają przez dodanie kolejnych faz fenologicznych, zwłaszcza w kontekście porównania suszy rolniczej z suszą meteorologiczną. Warto w tym miejscu przypomnieć GUTTMANA [1998], który oceniając wpływ warunków meteorologicznych na zmianę bilansu wodnego w glebie w oparciu o wskaźnik suszy $PDSI$ (*Palmer Drought Severity Index*), zwany wskaźnikiem Palmera [ALLEY, 1984; GUTTMAN, 1998] stwierdził, że o intensywności suszy w badanym miesiącu decydują w 1/3 bieżące warunki opadowe i prawie w 9/10 warunki w poprzednich miesiącach. Proponowana przez autora analiza suszy rolniczej w okresach, podobnie jak zastosowana w poprzednim rozdziale analiza suszy meteorologicznej na podstawie kumulowanych sum opadów, pokazuje zarówno relacje ewapotranspiracji rzeczywistej w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej lub średniej ewapotranspiracji w wieloleciu w bieżącej fazie fenologicznej, jak również intensywność obu rodzajów suszy rolniczej w poprzednich fazach fenologicznych. Badania obu wskaźników suszy rolniczej polegać będą na analizie zmienności redukcji ewapotranspiracji w poszczególnych okresach w wieloleciu, wzajemnego przebiegu suszy meteorologicznej i susz rolniczych oraz częstości wskaźników na kolejnych glebach we wszystkich badanych okresach.

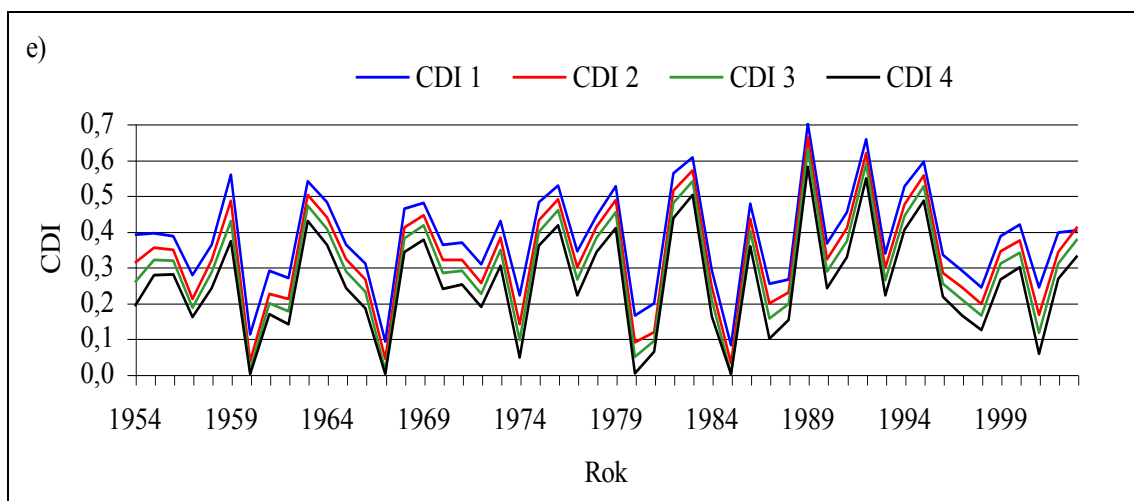
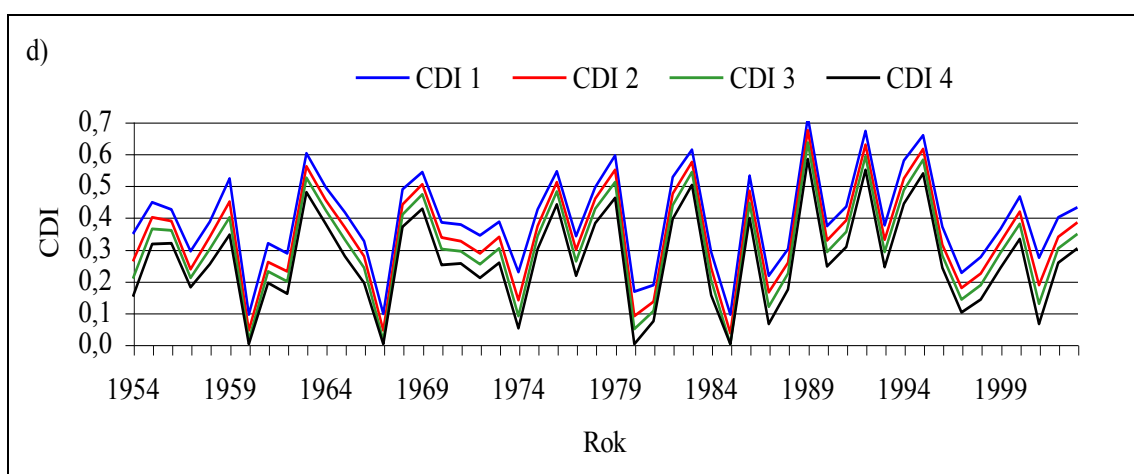
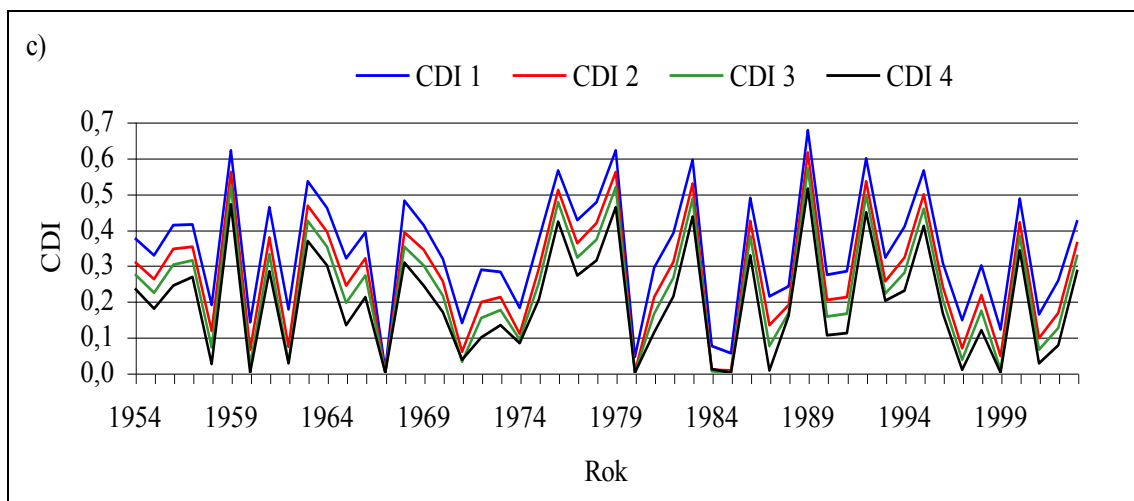
6.3.1. WSKAŹNIK SUSZY ROLNICZEJ CDI

Wartości wskaźnika suszy rolniczej CDI obliczano dla czterech gleb ($G1$, $G2$, $G3$, $G4$) zróżnicowanych zapasem wody użytecznej ZWU w 1-m profilu glebowym (103, 137, 165 i 203 mm) w tych samych okresach, w których analizowano zmienność opadów P i wartości wskaźnika SPI . Obliczenia wskaźnika wykonano na podstawie wzoru 5.2.1:

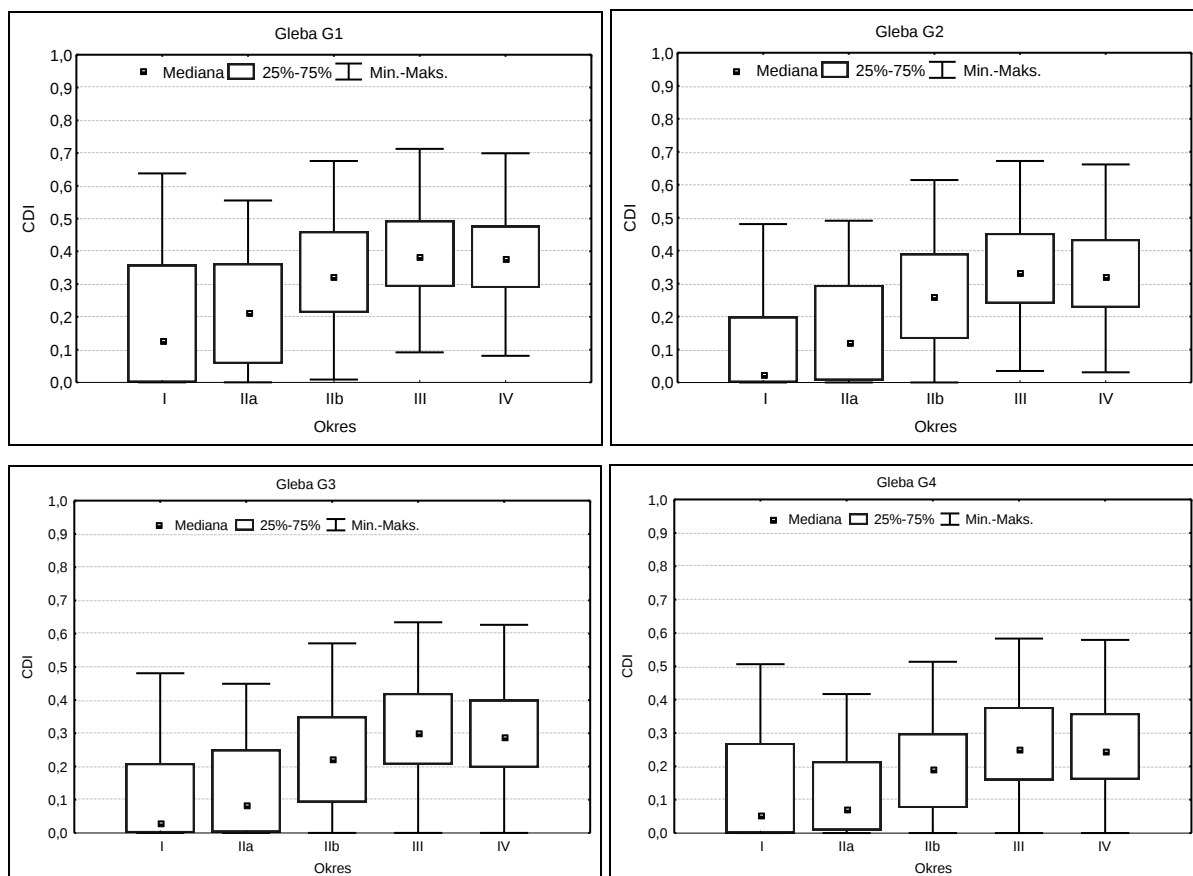
$$CDI = 1 - \frac{ET}{ET_p}$$

Wskaźnik *CDI* oznacza wielkość redukcji ewapotranspiracji rzeczywistej *ET* w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej *ET_p* w warunkach dostatecznego uwilgotnienia gleby. Przy przyjętym w pracy założeniu, że $ET \leq ET_p$, wartości $CDI > 0$ odpowiadają redukcji ewapotranspiracji spowodowanej niedoborem wody w glebie i mogą być uznane jako wskaźniki suszy rolniczej. O wielkości ewapotranspiracji potencjalnej *ET_p* decydują czynniki meteorologiczne i aktualny stan rozwoju buraka cukrowego, natomiast stan uwilgotnienia gleby wpływa na wielkość ewapotranspiracji rzeczywistej *ET*. Przebieg wartości wskaźnika *CDI* na glebach w badanym wieloleciu w kolejnych okresach przedstawiono na rysunku 6.3.1, a wybrane statystyki na rysunku 6.3.2.





Rys. 6.3.1. Zmienność *CDI* w okresach: a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV; *CDI 1*, *CDI 2*, *CDI 3*, *CDI 4* – wartości wskaźnika *CDI* na badanych glebach *G1*, *G2*, *G3*, *G4*



Rys. 6.3.2. Statystyki wartości wskaźnika *CDI* w okresach na badanych glebach *G1*, *G2*, *G3*, *G4*

W okresie I, pokrywającym się z fazą fenologiczną I, w której sieje się buraki cukrowe i następuje kiełkowanie rośliny, dolny kwartyl wartości wskaźnika *CDI* na wszystkich badanych glebach, pokrywał się z wartością minimalną wskaźnika, która wynosi 0 (rys. 6.3.2). Oznacza to, że w $\frac{1}{4}$ lat badanego wielolecia 1954-2003 roślina rozwijała się w warunkach nieograniczonego dostępu do wody lub ewapotranspiracja rzeczywista *ET* była równa się ewapotranspiracji potencjalnej *ET_p* (rys. 6.1.5). W pozostałych $\frac{3}{4}$ lat występowała redukcja ewapotranspiracji (*CDI* > 0), a tym samym susza rolnicza o różnym stopniu intensywności. Maksymalną redukcję ewapotranspiracji stwierdzono w 1988 r., kiedy przyjmowała ona wartości od 0,64 na glebie *G1*, czyli na glebie o najmniejszej wartości *ZWU*, do 0,48 na glebie *G2*. Redukcji tej sprzyjała silna susza meteorologiczna (*SPI* = -1,7), chociaż nie był to najbardziej suchy okres w badanym wieloleciu. Okres I charakteryzował się największymi wartościami współczynnika zmienności *V* wskaźnika *CDI*, przekraczającymi 100%; maksymalną wartość *V* = 137% zanotowano na glebie *G2* (tab. 6.3.1). W tym samym okresie zmienność opadów wynosiła 67%, ewapotranspiracji rzeczywistej *ET* - 20%,

ewapotranspiracji potencjalnej ET_p - 16%. Średnia wartość CDI w wieloleciu obliczona dla wszystkich gleb w tej fazie wynosiła 0,13. W I fazie fenologicznej nie zaznaczył się jeszcze wyraźny wpływ retencyjności gleby na wielkość redukcji ewapotranspiracji. Fakt ten można wytłumaczyć wpływem zapasów wody pozimowej w glebach. Mniejsza redukcja na glebie $G2$ niż na glebie $G4$ o większym zapasie wody użytecznej w 1-m profilu, wynika z tego, że zapas wody użytecznej w bilansowanej w tym okresie wierzchniej warstwie gleby wynoszącej 20 cm (tab. 4.2.1) był większy na glebie $G2$ niż na glebie $G4$ (tab. 4.3.1).

Tab. 6.3.1. Statystyki wartości wskaźnika CDI na badanych glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$

Statystyki	Okres				
	I	Ila	Ilb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
gleba $G1$					
$\bar{x}$ (mm)	0,19	0,23	0,34	0,39	0,38
V (%)	102	78	49	38	37
gleba $G2$					
$\bar{x}$ (mm)	0,10	0,17	0,28	0,34	0,33
V (%)	137	98	61	45	45
gleba $G3$					
$\bar{x}$ (mm)	0,11	0,14	0,24	0,31	0,30
V (%)	131	104	69	51	50
gleba $G4$					
$\bar{x}$ (mm)	0,14	0,13	0,20	0,26	0,26
V (%)	116	103	76	58	57

$\bar{x}$ – wartość średnia, V – współczynnik zmienności

W okresie Ila, w którym rozpoczynają się wschody buraka cukrowego, maksymalną redukcję ewapotranspiracji na wszystkich glebach zanotowano w 1979 r. w trakcie umiarkowanej suszy meteorologicznej ($SPI = -1,3$). Na glebie $G1$ wartość CDI wynosiła 0,56, na glebie $G4$ - 0,42. Wartość średnia wskaźnika CDI , obliczona podobnie jak w okresie poprzednim, wynosiła 0,17. Obserwowano nadal wysoką wartość współczynnika zmienności wskaźnika CDI , która na glebach $G3$ i $G4$ wciąż przekraczała 100%.

W kolejnym okresie Ilb obejmującym 3 fazy fenologiczne: I, Ila, Ilb, pojawia się 3 para liści i rozpoczyna się grubienie korzeni. Maksymalne wartości wskaźnika w wieloleciu 1954-2003 zanotowano w 1989 r. Na glebie $G1$, o najsłabszych zdolnościach retencyjnych, redukcja ewapotranspiracji w okresie Ilb wynosiła 0,68, a na glebie $G4$, o najlepszych

zdolnościach retencyjnych - 0,51. Wspomnianej suszy rolniczej towarzyszyła ekstremalna susza meteorologiczna ($SPI = -2,3$). Po raz pierwszy, ale tylko na glebie *G1*, we wszystkich latach badanego wielolecia stwierdzono redukcję ewapotranspiracji. To kolejny okres, w którym obserwowano wzrost średniej wartości *CDI*, która w tym okresie wynosiła 0,26. Wartość współczynnika zmienności wyraźnie zmniejszyła się; największą wartość zanotowano na glebie *G4* ($V = 76\%$), najmniejszą na glebie *G1* ($V = 49\%$). Położenie kwartyła górnego wskazuje, że na glebie *G1* w około 25% okresów redukcja ewapotranspiracji przekraczała 50% (rys. 6.3.2). Na glebach *G2*, *G3* i *G4* wartość ta w miarę wzrostu retencyjności tych gleb stopniowo obniżała się.

Zależność, że na glebie o najsłabszej zdolności do retencjonowania wody, wartość wskaźnika *CDI* jest największa, potwierdziła się również w kolejnych badanych okresach. Stwierdzono, że w okresie III, kończącym się 30.08, średnia wartość wskaźnika *CDI* na glebie *G1* wynosiła 0,39 i na następnych glebach stopniowo zmniejszała się do 0,26 na glebie *G4*. Średnia redukcja wynosiła 0,33. Największe redukcje ewapotranspiracji stwierdzono w wyjątkowo suchym 1989 r. Od 21.04 do 30.08 w Bydgoszczy spadło tylko 92 mm opadu, co spowodowało powstanie ekstremalnej suszy meteorologicznej ($SPI = -2,6$). Wartość wskaźnika *CDI* na glebie *G1* wynosiła 0,71, na pozostałych glebach 0,67 (*G2*), 0,63 (*G3*), 0,58 (*G4*). Zmniejszyła się wartość współczynnika zmienności. Największą wartość *V* zanotowano na glebie *G4* (58%), najmniejszą na glebie *G1* (38%). Na dwóch glebach *G1* i *G2* (o najsłabszej retencji) redukcja ewapotranspiracji ($CDI > 0$) wystąpiła już we wszystkich badanych okresach III w wieloleciu.

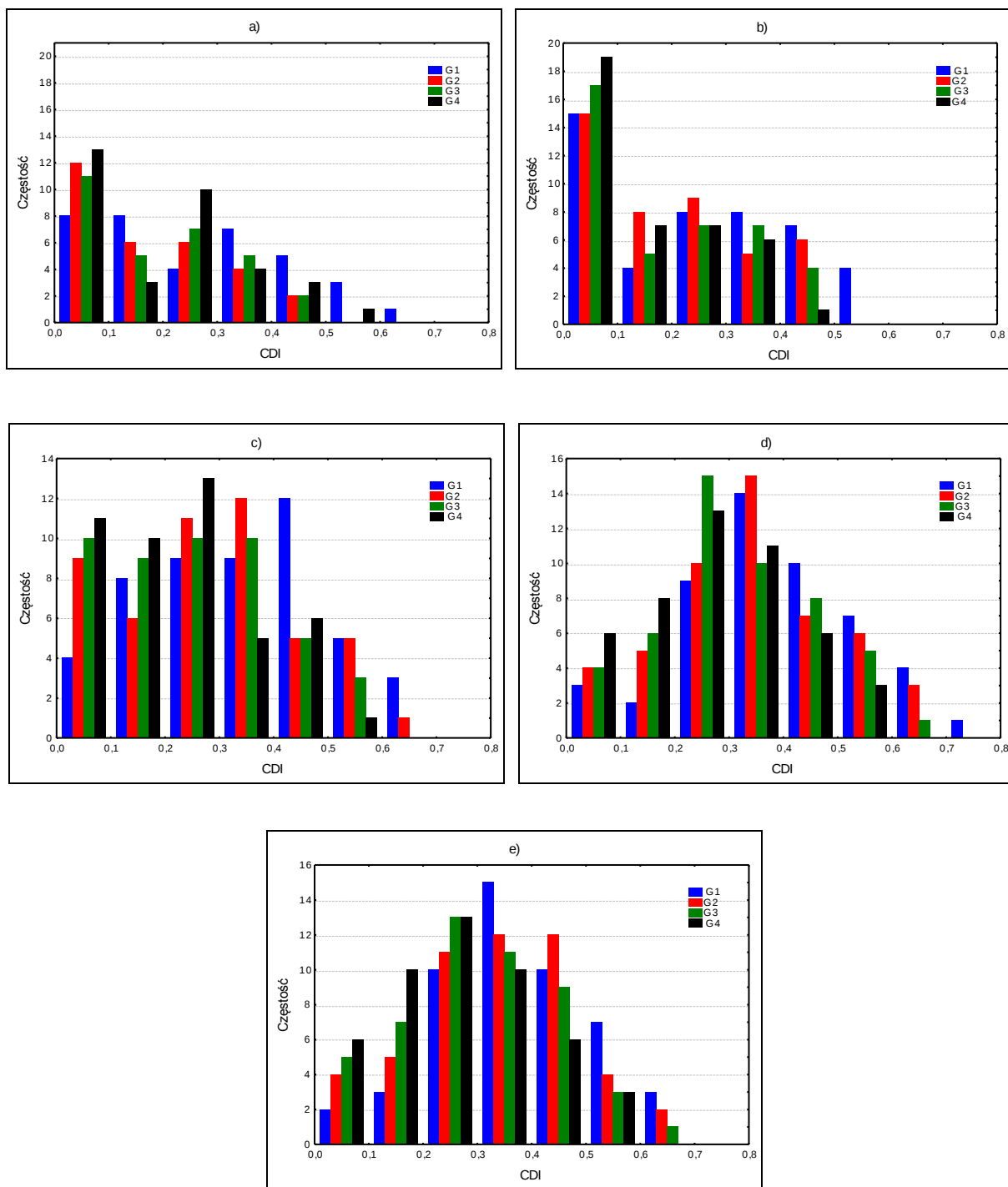
Okres III charakteryzował się maksymalnymi wartościami wskaźnika *CDI* spośród wszystkich badanych okresów w wieloleciu, a przyczyniły się do tego potrzeby wodne rośliny, jak i warunki meteorologiczne. Okres III kończy się fazą fenologiczną charakteryzującą się największymi potrzebami wodnymi buraków cukrowych, co potwierdzają różni autorzy [DZIEŻYC, 1989, 1993; ŁABĘDZKI, 1996] oraz ekstremalnymi wartościami takich czynników meteorologicznych jak temperatura, usłonecznienie, promieniowanie [ROGUSKI, KASPERSKA, ŁABĘDZKI, 1996; WOŚ, 1994]. Średnia wartość ET_p , która w okresie III w wieloleciu 1954-2003 wynosiła 463 mm, wyraźnie zwiększyła się w stosunku do okresu IIb o 173 mm (rys. 6.1.8).

W okresie IV, kończącym się 30.09, a obejmującym część fazy fenologicznej dojrzwania i zbioru buraka cukrowego, średnia wartość redukcji ewapotranspiracji zmieniała się od 0,38 na glebie *G1* do 0,26 na glebie *G4*; wartość średnia *CDI* wynosiła 0,32. Maksymalną redukcję

ewapotranspiracji obserwowano w 1989 roku. W tym najbardziej suchym okresie wegetacji w wieloleciu ($P = 107$ mm, $SPI = -2,9$; rys. 6.1.1) na glebie *G1* stwierdzono wartość wskaźnika $CDI = 0,70$, na pozostałych glebach, o większej zdolności retencjonowania wody, wartości maksymalne CDI stopniowo malały do 0,58 na glebie *G4*. Okres wegetacji okazał się najbardziej stabilnym pod względem zmienności wartości CDI ; wartość V zmieniała się od 57% na glebie *G4* do 37% na glebie *G1*. Podobnie, jak w okresie poprzednim, na glebach *G1* i *G2*, czyli na glebach o niższych zasobach wody użytecznej, redukcja ewapotranspiracji występowała we wszystkich latach wielolecia 1954-2003. Świadczy to o tym, że ewapotranspiracja na tych glebach w IV fazie fenologicznej jest niewielka (rys. 6.1.8) i że niedobór wody w tej fazie w nieznaczny sposób wpływa na wielkość redukcji ewapotranspiracji w całym okresie wegetacji.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że o wielkości redukcji ewapotranspiracji, a tym samym o wartości wskaźnika CDI , decyduje czynnik czasowy (faza fenologiczna) i zdolność retencjonowania wody w glebie. Na początku wegetacji rośliny, istotną rolę odgrywają zapasy wody pozimowej i bilansowanie kolejnych warstw gleby, mniejszy jest natomiast udział transpiracji, ponieważ w tym czasie rośliny nie są jeszcze wykształcone. W kolejnych okresach, na wielkość redukcji ewapotranspiracji coraz większy ma wpływ zdolność gleby do retencjonowania wody. Na glebach o mniejszych zapasach wody użytecznej prowadzi to do szybszego wyczerpywania się wody łatwo dostępnej, czego efektem jest przyspieszone przesuszanie się gleby, większa redukcja ewapotranspiracji, a w konsekwencji wzrost intensywności suszy rolniczej.

Analizę częstości wartości CDI na badanych glebach (*G1*, *G2*, *G3*, *G4*) przeprowadzono w kolejnych okresach (rys. 6.3.3), a zestawienie łącznej ilości susz rolniczych na badanych glebach przedstawiono w tabeli 6.3.2.



Rys. 6.3.3. Częstość wartości *CDI* na glebach *G1*, *G2*, *G3*, *G4* w okresach: a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV

Tab. 6.3.2. Ilość susz rolniczych na badanych glebach na podstawie wskaźnika *CDI*

Okres	Gleba				%
	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>	<i>G4</i>	
I	36	30	30	34	65
IIa	46	43	40	40	85
IIb	50	49	47	46	96
III	50	50	49	47	98
IV	50	50	49	48	99

Stwierdzono występowanie prawidłowości polegającej na tym, że w każdym okresie badawczym na glebach o mniejszym *ZWU* jest mniej susz słabych ($CDI < 0,3$), a więcej silnych ($CDI > 0,4$); na glebach o większym *ZWU* - odwrotnie. Zagrożenie silną suszą rolniczą, opisaną wskaźnikiem *CDI*, jest większe na glebach o mniejszych zdolnościach retencyjnych, a słabszą suszą na glebach o większych *ZWU*. Brak w literaturze klasyfikacji intensywności suszy rolniczej na podstawie wartości *CDI* powoduje, że na tym etapie rozważań podane powyżej wartości progowe należy traktować w sposób orientacyjny i nie są to kryteria ostateczne. Wartości wskaźnika $CDI < 0,3$ świadczą o małej redukcji ewapotranspiracji, czyli o słabej intensywności suszy rolniczej, a wartości $CDI > 0,4$ o suszy silnej. W praktyce rolniczej oznacza to, że im większa wartość *CDI*, tym większa jest redukcja plonów.

W okresie I, na wszystkich badanych glebach wyraźnie dominowały najsłabsze susze rolnicze ($0 < CDI < 0,1$). Oznacza to, że redukcja ewapotranspiracji nie przekraczała 10%. Najwięcej takich susz pojawiło się na glebie *G4* (38% wszystkich susz), a najmniej na glebie *G1* (22%). Większa liczba susz na glebie *G4* była spowodowana faktem, że w I fazie fenologicznej bilans wodny dotyczył tylko wierzchniej warstwy gleby, w której zapas wody użytecznej w glebie *G1* był większy niż na glebie *G4* (tab. 4.3.1), chociaż całkowity zapas wody użytecznej na glebie *G4* w 1-metrowym profilu jest dwukrotnie większy. Najwięcej wszystkich susz pojawiło się w okresie I na glebie *G1*. Ich częstotliwość wynosiła 72%. Na glebach *G2* i *G3* częstotliwość ta wyniosła 60%, a na glebie *G4* - 68%. W wieloleciu tylko sporadycznie (lata 1959, 1988, 1993, 2000) pojawiały się też silne susze rolnicze, w czasie których $CDI > 0,5$. Średnio na wszystkich glebach susze rolnicze pojawiały się w 65% wszystkich okresów I w latach 1954-2003 (tab. 6.3.2).

W następnym okresie IIa nadal dominowały najsłabsze susze, odpowiadające wartościom *CDI* w przedziale $<0;0,1>$. Do 85% wzrosła częstotliwość okresów IIa w wieloleciu, w

których $CDI > 0$. Susze na poszczególnych glebach pojawiały się z następującą częstotliwością: na glebie $G1$ - 92%, $G2$ - 86%, $G3$ i $G4$ - 80%.

W okresie IIb znów wzrosła łączna ilość susz rolniczych na wszystkich glebach, które pojawiały się ze średnią częstotliwością 96%. Na glebie $G1$, charakteryzującej się najslabszymi możliwościami retencjonowania wody, redukcja ewapotranspiracji wystąpiła we wszystkich okresach IIb wielolecia, a to oznacza, że każdego roku okres od 21.04 do 20.07 charakteryzował się różnym stopniem suchości. Na pozostałych glebach suche okresy IIb pojawiały się w 98, 94 i 92% wielolecia. Zmniejszyła się ilość najslabszych susz, a maksymalne częstości wskaźnika CDI skupiły się w przedziale wartości od 0,2 do 0,4.

Wydłużenie okresu badawczego o kolejną fazę fenologiczną spowodowało przesunięcie maksimum wartości częstości ku przedziałowi od 0,3 do 0,4, a rozkład częstości wartości CDI w okresie III przypominał swoim kształtem rozkład normalny. W 1989 r. na glebie $G1$ wystąpił jedyny przypadek w całym wieloleciu redukcji ewapotranspiracji większej od 0,7. Łącznie susze rolnicze zdominowały prawie wszystkie okresy III, bo wystąpiły średnio w 98% czasu. Na glebach $G1$ i $G2$, o najmniejszych ZWU, susza rolnicza wystąpiła w każdym okresie III wielolecia, czyli w terminie od 21.04 do 30.08. Susze rolnicze na glebach $G3$ i $G4$ pojawiły się z częstotliwością 98 i 94%. Zwraca uwagę liczba silnych susz rolniczych ($CDI > 0,5$) na glebie $G1$, których w 50-letnim okresie badawczym było 12.

W okresie IV, pokrywającym się z okresem wegetacji buraka cukrowego, kształt wykresu częstości wartości CDI nie odbiega zasadniczo od wykresu z okresu poprzedniego. Maksimum częstości także przypada na przedział wartości $CDI < 0,3; 0,4 >$. Do 99% wzrosła średnia częstotliwość susz rolniczych na wszystkich glebach. Podobnie jak w okresie III, na glebach $G1$ i $G2$ susza rolnicza wystąpiła w każdym okresie wegetacyjnym wielolecia, a susze rolnicze na glebach $G3$ i $G4$ pojawiały się odpowiednio z częstotliwością 98 i 96%. Należy jednak pamiętać, że w analizach uwzględniono wszystkie przypadki redukcji ewapotranspiracji, także takie, kiedy susza rolnicza nie towarzyszyła jednocześnie susza meteorologiczna. Na tym etapie badań można to stwierdzić analizując jednocześnie przebiegi wartości wskaźnika SPI (rys. 6.2.1) i wskaźnika CDI (rys. 6.3.1).

6.3.2. WSKAŹNIK SUSZY ROLNICZEJ CDI_w

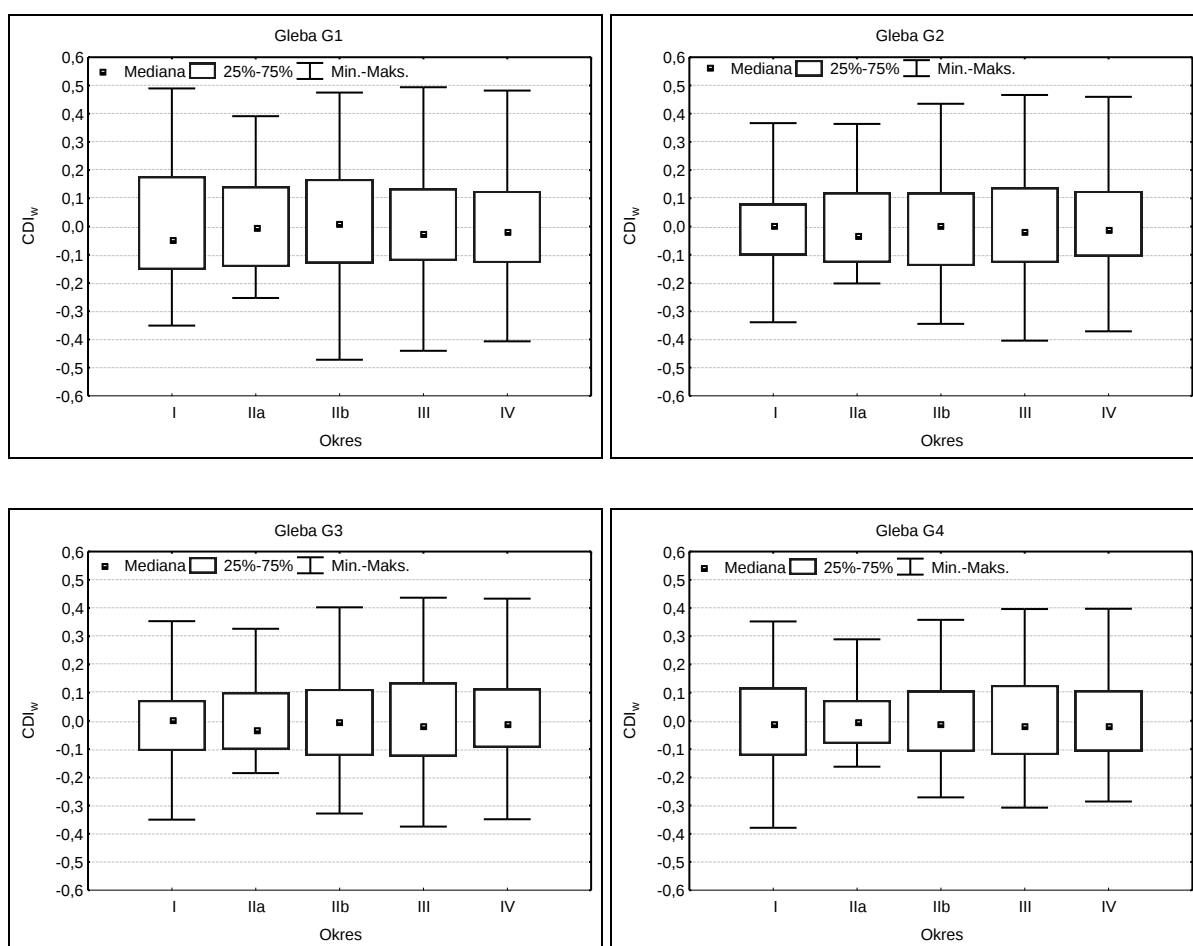
Wyniki badań dotyczące relacji między opadami P oraz ewapotranspiracją rzeczywistą ET i ET_{sr} oraz ewapotranspiracją potencjalną ET_p przeprowadzone w rozdziale 6.1, a także

uzyskane wyniki dotyczące zmienności wskaźnika CDI pokazują, że w badanym wieloleciu znacząco przeważały lata, w których rzeczywiste wartości ewapotranspiracji ET były znacznie mniejsze od potencjalnych możliwości ewapotranspiracji, która zapewnia wysoki plon. Przyczyną były zbyt niskie sumy opadów w poszczególnych okresach jak i w całym okresie wegetacji, w stosunku do potencjalnych potrzeb wodnych rośliny. Sugeruje to, że w warunkach Kujaw bardziej przydatnym do oceny suszy rolniczej może być wskaźnik CDI_w , który odnosi się do średniej wartości ewapotranspiracji w wieloleciu.

Wartości wskaźnika CDI_w były obliczane na podstawie wzoru 5.2.2:

$$CDI_w = 1 - \frac{ET}{ET_{\dot{s}r}}$$

Wskaźnik ten obliczano dla tych samych czterech gleb ($G1$, $G2$, $G3$, $G4$) i w tych samych okresach, w których analizowano zmienność wskaźnika CDI . Wskaźnik CDI_w przyjmował zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości (rys. 6.3.4).

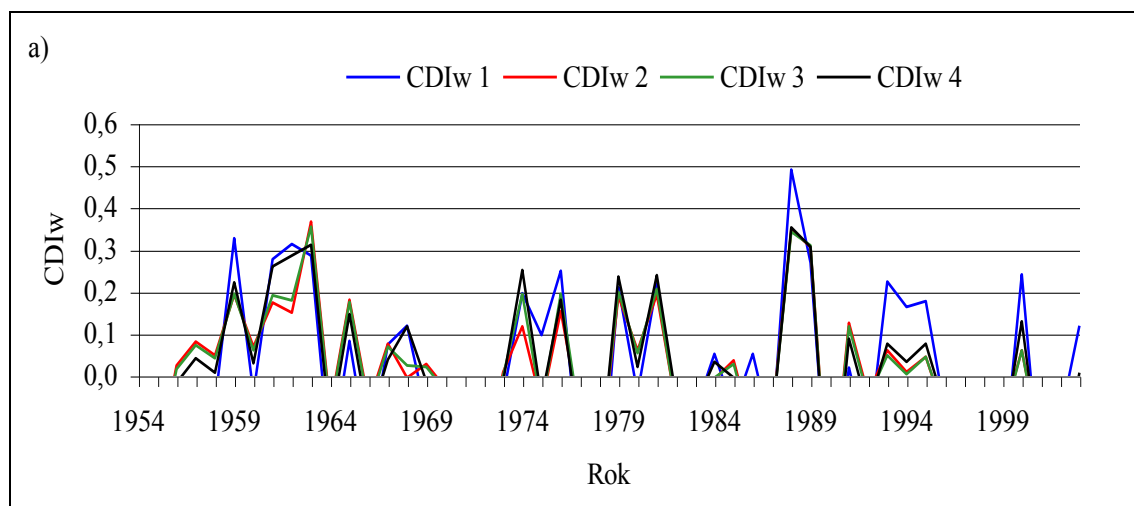


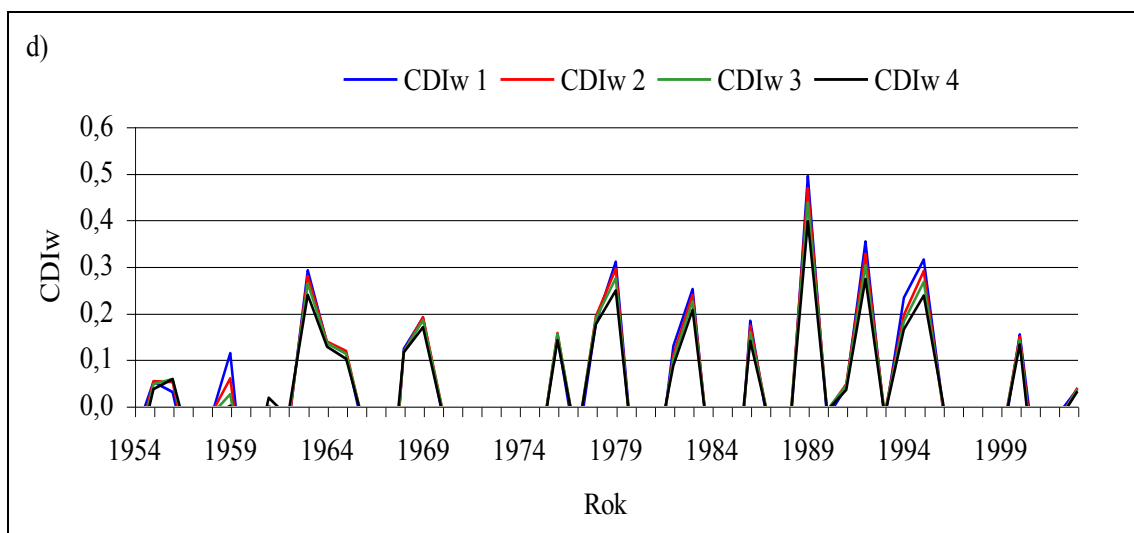
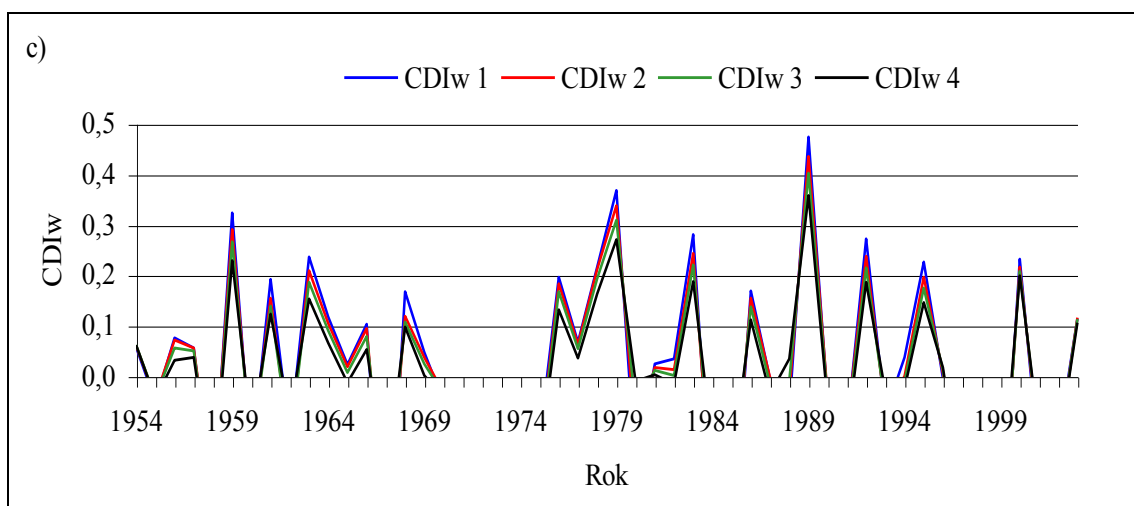
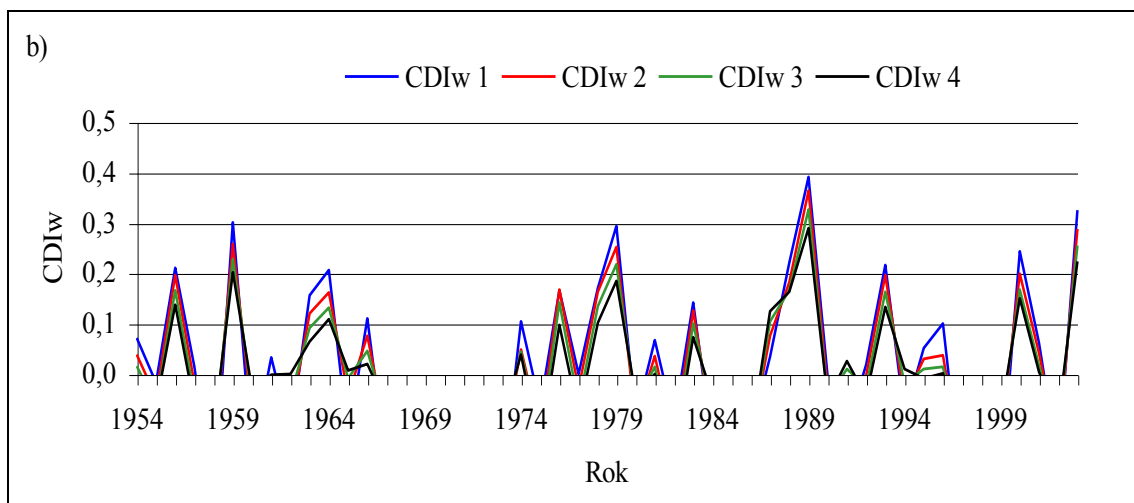
Rys. 6.3.4. Statystyki wartości wskaźnika CDI_w w okresach na badanych glebach

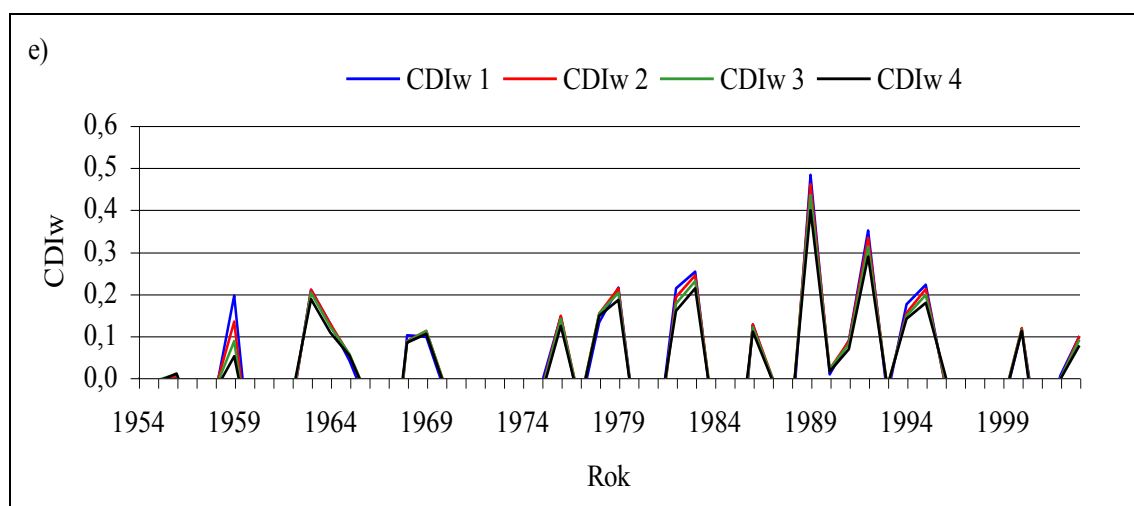
Obliczone wartości mediany we wszystkich okresach i na wszystkich glebach są prawie równe 0 i równe wartości średniej wskaźnika CDI_w . Można więc powiedzieć, że liczba okresów z suszami rolniczymi o różnej intensywności i okresów bez suszy była taka sama w badanym wieloleciu.

Dodatknie wartości CDI_w występują, kiedy $ET < ET_{sr}$, co oznacza, że ewapotranspiracja rzeczywista była mniejsza od średniej ewapotranspiracji w wieloleciu, czyli od ewapotranspiracji odpowiadającej przeciętnym warunkom na Kujawach. Należy więc rozumieć, że ET_{sr} jest granicą, poniżej której rozpoczyna się proces redukcji ewapotranspiracji i rozwój suszy rolniczej, a powyżej występują warunki nie powodujące redukcji plonu w stosunku do średniego plonowania w wieloleciu.

Badanie suszy rolniczej przeprowadzono więc w okresach, kiedy $CDI_w > 0$. Z tego też względu przebiegi wartości wskaźnika CDI_w w okresach pokazano tylko w tych latach, w których spełniony był powyższy warunek, przez co uzyskano czytelniejszy obraz susz rolniczych w kolejnych okresach w całym wieloleciu 1954-2003 (rys. 6.3.5). Stwierdzono, że maksymalne wartości wskaźnika CDI_w w poszczególnych okresach, czyli najbardziej intensywna susza rolnicza opisywana tym wskaźnikiem, pojawiała się jednocześnie na wszystkich badanych glebach w tym samym roku.







Rys. 6.3.5. Zmienność wartości wskaźnika CDI_w w okresach: a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV; $CDI_w 1$, $CDI_w 2$, $CDI_w 3$, $CDI_w 4$ – wartości wskaźnika CDI_w na badanych glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$

W okresie I susze na poszczególnych glebach występowały nie zawsze jednocześnie. Najdłuższe, ośmioletnie ciągi lat z suszą zanotowano w latach 1956-1963 i pojawiły się one jednocześnie na glebach $G2$ i $G3$; na glebie $G1$ ciąg susz trwał 3 lata, a na glebie $G4$ - 7 lat. Najdłuższy wspólny okres susz na wszystkich glebach trwał w latach 1993-1995, a po nich nastąpił czteroletni wspólny okres (również najdłuższy w wieloleciu), kiedy panowały warunki niepowodujące redukcji ewapotranspiracji w stosunku do średniej w wieloleciu. W większości przypadków suszy rolniczej nie towarzyszyła susza meteorologiczna, przeważały okresy normalne zarówno w zakresie nadmiaru, jak i niedoboru opadów. Tylko w 3 latach (1954, 1972 i 2002 r.) wystąpiła susza meteorologiczna, a brak było suszy rolniczej. Maksymalną wartość wskaźnika $CDI_w = 0,49$ w badanym wieloleciu stwierdzono na glebie $G1$ w 1988 r. Największe wartości CDI_w na pozostałych glebach wystąpiły także w tym roku i wynosiły: 0,37; 0,35; 0,35.

W okresie IIa najdłuższe, czteroletnie ciągi lat z suszą rolniczą stwierdzono tylko na glebie $G1$ (w latach 1976-1979) oraz na glebie $G4$ (1963-1966). W latach 1987-1989 susza wystąpiła jednocześnie na wszystkich glebach. Zaobserwowano, że nie było całkowitej zgodności lat, w których susza rolnicza i meteorologiczna występowały jednocześnie, za to częściej suszy rolniczej towarzyszyła łagodna susza meteorologiczna ($-0,99 < SPI < 0$). Podobnie jak w okresie poprzednim, największą wartość $CDI_w = 0,39$ obserwowano na glebie $G1$ (1989 r.), na pozostałych glebach zanotowano: 0,36; 0,33; 0,29.

W kolejnym okresie IIb w przebiegu wartości wskaźnika CDI_w uwagę zwraca kilkuletni okres bez suszy rolniczej, wspólny dla wszystkich gleb, który wystąpił w latach 1970-1975.

W innych latach wielolecia 1954-2003 dominowały susze rolnicze występujące jednocześnie na wszystkich glebach. Stwierdzono, że w tym okresie wszystkim suszom rolniczym towarzyszyły łagodne i silniejsze susze meteorologiczne. Największą wartość $CDI_w = 0,48$ obserwowano na glebie *G1* w 1989 r.; na pozostałych glebach wynosiła ona: 0,44; 0,41 i 0,36.

Podobnie jak w okresie IIb, także w okresie III, w latach 1970-1975 zaznaczył się wspólny dla wszystkich gleb okres bez susz, spowodowany zwiększonymi opadami w III fazie fenologicznej. Drugi, ale tym razem trzyletni okres bez susz, wystąpił w latach 1997-1999 i także przyczyną były zwiększone sumy opadów w okresie od 21.07 do 30.08. Badania pokazały, że okresie III prawie zawsze suszom rolniczym towarzyszyły susze meteorologiczne. W tym okresie stwierdzono największą wartość wskaźnika CDI_w we wszystkich okresach badanego wielolecia (podobnie jak wskaźnika CDI). W czasie suszy w 1989 r. na glebie *G1* zanotowano wartość $CDI_w = 0,49$, a na kolejnych glebach wartości: 0,46; 0,43 i 0,40.

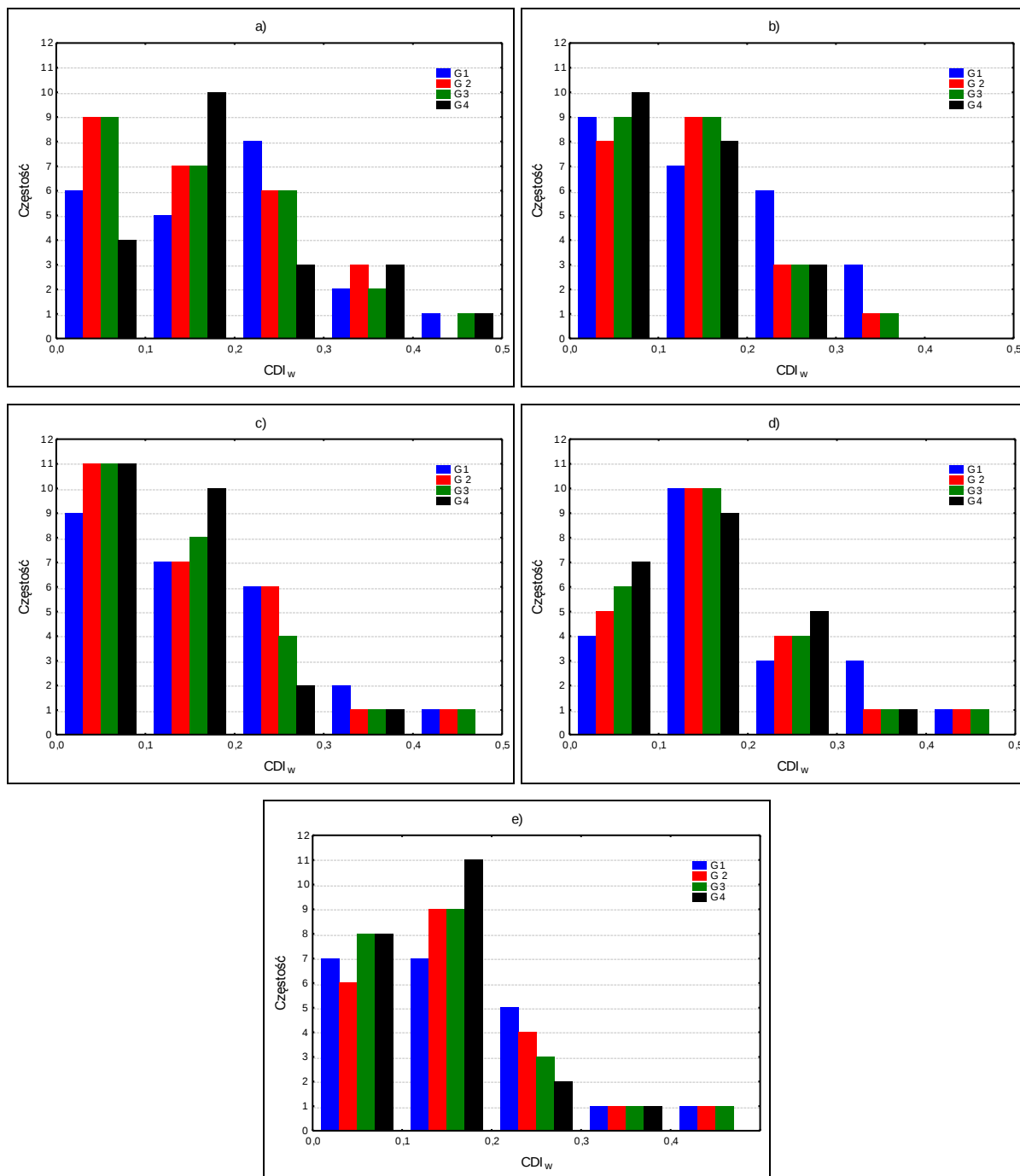
Ciąg lat bez suszy (1970-1975) widoczny był także w całym okresie wegetacyjnym. Susz nie stwierdzono również w kolejnych latach wielolecia 1997-1999. W przebiegu susz rolniczych wyraźnie zaznaczył się 20-letni okres (1976-1995), w którym wystąpiło 13 susz, w tym także te najbardziej intensywne w badanym wieloleciu, obejmujących wszystkie gleby. Każdej suszy rolniczej towarzyszyła, co najmniej łagodna susza meteorologiczna. Maksymalne wartości CDI_w w okresie wegetacyjnym zanotowano również w 1989 r., a ich wartości zmieniały się od 0,48 na glebie *G1* do 0,40 na glebie *G4*.

Przeprowadzona analiza pokazuje, że wartości CDI_w są różne w okresach związanymi z fazami fenologicznymi, czyli etapem rozwoju rośliny oraz zależą od zdolności retencyjnych gleby. Maksymalna redukcja ewapotranspiracji w stosunku do średniej z wielolecia w kolejnych okresach była zawsze większa na glebie o najmniejszych zapasach wody użytecznej. Maksimum osiągnęła w okresie III, który obejmuje fazę III o największych potrzebach wodnych buraka cukrowego. Podobne prawidłowości w odniesieniu do wpływu niedoboru wody glebowej na plon obrazuje współczynnik k_v [DOOREBOS, KASSAM, 1979], który przyjmuje największe wartości w fazie fenologicznej III.

Analizę częstości wartości CDI_w na badanych glebach przeprowadzono w kolejnych okresach I, IIa, IIb, III i IV (rys. 6.3.6).

Na początku okresu wegetacyjnego (okres I) dominowały susze rolnicze skwantyfikowane redukcją ewapotranspiracji od 0 do 30%. ($0 < CDI_w < 0,3$). Bardziej intensywne susze pojawiały się znacznie rzadziej (rys. 6.3.6a). Zróżnicowanie między łączną liczbą susz

rolniczych na poszczególnych glebach było bardzo małe. Średnia częstotliwość susz rolniczych wynosiła 48%. Najmniej susz było na glebie *G1* (44%), a najwięcej na glebach *G2* i *G3* (50%) (tab. 6.3.3).



Rys. 6.3.6. Częstość wartości CDI_w na glebach *G1*, *G2*, *G3*, *G4* w okresach: a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV

Tab. 6.3.3. Ilość susz rolniczych na podstawie wskaźnika CDI_w

Okres	Gleba				%
	$G1$	$G2$	$G3$	$G4$	
I	22	25	25	24	48
IIa	25	21	22	21	45
IIb	25	26	25	24	50
III	21	21	22	22	43
IV	21	21	22	22	43

W kolejnym okresie IIa susze rolnicze dominowały na glebie $G1$ (50%). Mniej susz było na glebie $G3$ (44%) i na glebie $G4$ (42%). Średnia częstotliwość susz wynosiła 45%. Przeważały susze, którym odpowiadała wartość $0 < CDI_w < 0,2$.

Podobny rozkład częstości susz rolniczych obserwowano w okresie IIb. Jednocześnie wzrosła do 50% średnia częstotliwość susz rolniczych na wszystkich glebach. Na poszczególnych glebach ilość susz była prawie jednakowa. I w tym okresie wartości wskaźnika CDI_w koncentrowały się w przedziale $<0; 0,2>$.

W dwóch ostatnich dwóch okresach III i IV zróżnicowanie ilości susz na poszczególnych glebach było niewielkie (42-44%). Średnia częstotliwość susz była mniejsza niż w okresie poprzednim i wynosiła 43%. Również w tych przypadkach przeważały susze w zakresie wskaźnika CDI_w z przedziału $<0; 0,2>$.

Otrzymane wyniki, zwłaszcza dla wartości $CDI_w > 0,3$, bardzo przypominają rozkład częstości silnych i ekstremalnych susz meteorologicznych, klasyfikowanych na podstawie SPI (tab. 6.2.1). Zbadanie w dalszej części pracy wzajemnych związków obu susz da odpowiedź, czy to podobieństwo jest przypadkowe, czy ma swoje wyjaśnienie w przebiegu susz i ich wzajemnych związkach przyczynowo-skutkowych.

Porównując wyniki analizy wskaźników CDI i CDI_w stwierdzono, że różnią się one wartościami w tych samych okresach i w tych samych latach, zakresem zmienności i rozkładem częstości. W związku z tym każdy z tych wskaźników daje inną ocenę suszy rolniczej. Sugeruje to, że ocena intensywności suszy rolniczej na podstawie przyjętej klasyfikacji zależy od przyjętej definicji suszy rolniczej i związanym z nią wskaźnikiem.

6.3.3. ZWIĄZEK MIĘDZY WSKAŹNIKAMI CDI i CDI_w

Porównując częstości susz rolniczych według obu wskaźników (por. tab. 6.3.2 i 6.3.3) można stwierdzić, że łączna ilość susz rolniczych wyznaczonych w odniesieniu do

potencjalnych możliwości ewapotranspiracji była prawie dwukrotnie większa od ilości susz rolniczych wyznaczonych w odniesieniu do średniej ewapotranspiracji w wieloleciu. W poszczególnych okresach i na glebach stosunek ten zmieniał się. Maksymalnie wynosił on 2,4:1, a minimalnie 1,2:1. Ponadto stwierdzono, że na tych samych glebach i w tych samych okresach wskaźniki CDI i CDI_w różnią się wartością, współczynnikiem zmienności i rozkładem częstości. W związku z tym każdy z nich, w zależności od przyjętej definicji suszy rolniczej, daje inną ocenę suszy rolniczej.

Stwierdzono, że związki korelacyjne między tymi wskaźnikami są silne, zwłaszcza od okresu IIa, i istotne statystycznie (tab. 6.3.4). Wyznaczono również równania regresji liniowej, a wyniki zestawiono w tabeli 6.3.5.

Tabela 6.3.4. Współczynniki korelacji wartości wskaźników CDI i CDI_w w okresach

Gleba	Współczynnik korelacji w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
$G1$	0,80*	0,94*	0,95*	0,95*	0,95*
$G2$	0,54*	0,91*	0,94*	0,94*	0,95*
$G3$	0,57*	0,87*	0,93*	0,94*	0,94*
$G4$	0,65*	0,82*	0,90*	0,92*	0,93*

* - statystycznie istotny z $p < 0,05$

Tab. 6.3.5. Równania regresji liniowej $CDI = a + b CDI_w$ w okresach

Gleba	Równanie regresji w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
$G1$	$0,19+0,76CDI_w$	$0,23+0,96CDI_w$	$0,34+0,77 CDI_w$	$0,39+0,72 CDI_w$	$0,37+0,76CDI_w$
$G2$	$0,10+0,48CDI_w$	$0,17+1,02 CDI_w$	$0,27+0,86 CDI_w$	$0,34+0,80 CDI_w$	$0,33 +0,84CDI_w$
$G3$	$0,11+0,50 CDI_w$	$0,23+0,90 CDI_w$	$0,26+0,90 CDI_w$	$0,31+0,84 CDI_w$	$0,30 +0,88CDI_w$
$G4$	$0,14+0,59 CDI_w$	$0,13+CDI_w$	$0,20+0,95 CDI_w$	$0,26+0,90 CDI_w$	$0,26 +0,94CDI_w$

Na podstawie otrzymanych równań można było określić, jakie są wzajemne relacje między intensywnością suszy rolniczej w odniesieniu do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji na uprawie buraka cukrowego na Kujawach (wskaźnik CDI), a intensywnością suszy rolniczej w odniesieniu do średniej ewapotranspiracji w danym okresie (wskaźnik CDI_w). Ważne jest pytanie, jak intensywna jest susza rolnicza w odniesieniu do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji w okresie, w którym ewapotranspiracja jest

równa średniej wieloletniej ($CDI_w = 0$). Odpowiedź na to pytanie daje tabela 6.3.6. Wartości redukcji ewapotranspiracji wyrażone wskaźnikiem CDI , większe od wartości zestawionych w tabeli 6.3.6, oznaczają jednoczesną suszę według obu wskaźników.

Tab. 6.3.6. Wartości CDI dla $CDI_w = 0$

Gleby	CDI w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
<i>G 1</i>	0,19	0,23	0,34	0,39	0,37
<i>G 2</i>	0,10	0,17	0,27	0,34	0,33
<i>G 3</i>	0,11	0,23	0,26	0,31	0,30
<i>G 4</i>	0,14	0,13	0,20	0,26	0,26

W poszczególnych okresach, przy tej samej wartości wskaźnika CDI_w , stwierdzono różnicowanie intensywności suszy rolniczej według wskaźnika CDI na badanych glebach. Najmniejsze różnice występowały w okresie I, największe w okresie IIb. Przykładowo w okresie wegetacji wartość $CDI_w = 0,2$ oznaczała 20% redukcję ewapotranspiracji w stosunku do średniej ewapotranspiracji w wieloleciu, a w stosunku do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji - redukcję ewapotranspiracji na kolejnych glebach wynoszącą 52%, 50%, 48% i 43%.

W przypadku buraka cukrowego można pokazać bezpośredni związek intensywności suszy rolniczej opisanej obydwoma wskaźnikami z redukcją plonu. W okresie wegetacji buraka cukrowego wartość współczynnika reakcji plonu na niedobory wody k_y wynosi $\approx 1,0$ [DOORENBOS, KASSAM, 1979; DRUPKA, KUŹNIAR, 1989; ŁABĘDZKI, 1995, 1996]. Tak więc równanie wyrażające relację między redukcją plonu a redukcją ewapotranspiracji (wzór 2.14)

można zapisać w postaci: $\left(1 - \frac{Y}{Y_p}\right) \approx \left(1 - \frac{ET}{ET_p}\right) = CDI$. W podanym powyżej przykładzie redukcja plonu w stosunku do plonu potencjalnego na kolejnych glebach wynosi 52%, 50%, 48% i 43%.

Posługując się wypracowanymi zależnościami można prognozować redukcję plonu w stosunku do plonu potencjalnego, znając intensywność suszy rolniczej, określoną na podstawie redukcji ewapotranspiracji w całym okresie wegetacji w stosunku do wartości średniej lub potencjalnej.

6.4. RELACJE MIĘDZY SUSZĄ METEOROLOGICZNĄ (*SPI*) I ROLNICZĄ (*CDI* i *CDI_w*)

Zbadanie związków między wskaźnikiem standaryzowanego opadu *SPI* jako wskaźnikiem suszy meteorologicznej oraz wskaźnikami suszy rolniczej *CDI* i *CDI_w* było najważniejszym zadaniem w tej pracy. W celu określenia wzajemnych relacji między obiema suszami oraz zbadania siły i istotności tych związków, przeprowadzono analizę statystyczną w postaci współczynników korelacji liniowej i równań regresji liniowej *SPI* i *CDI* oraz *SPI* i *CDI_w*. Wymienione badania przeprowadzono w każdym z przyjętych w pracy okresów związanych z fazami fenologicznymi.

6.4.1. RELACJA *SPI* - *CDI*

Siłę i istotność statystyczną związków pomiędzy wskaźnikami obu susz pokazują wartości współczynników korelacji liniowej zestawione w tabeli 6.4.1.

Tabela 6.4.1. Współczynniki korelacji wartości wskaźników *SPI* i *CDI* w okresach

Gleba	Współczynnik korelacji w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
<i>G1</i>	-0,64*	-0,77*	-0,81*	-0,88*	-0,86*
<i>G2</i>	-0,60*	-0,77*	-0,81*	-0,89*	-0,87*
<i>G3</i>	-0,58*	-0,78*	-0,79*	-0,89*	-0,87*
<i>G4</i>	-0,56*	-0,79*	-0,78*	-0,88*	-0,87*

* - statystycznie istotny z $p < 0,05$

Ujemna wartość współczynników korelacji wartości wskaźników *SPI* i *CDI* w okresach informuje, że zmniejszenie sumy opadów w badanym okresie powoduje spadek wartości wskaźnika suszy meteorologicznej *SPI* i wzrost redukcji ewapotranspiracji, a tym samym wzrost wskaźnika suszy rolniczej *CDI*. Wszystkie badane współczynniki korelacji okazały się istotne statystycznie z $p < 0,05$.

Najsłabszą zależność między suszą meteorologiczną i suszą rolniczą odniesioną do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji w uprawie buraka cukrowego na Kujawach obserwowano w początkowej fazie rozwoju rośliny (okres I). Najsilniejszy związek między obu suszami w tym okresie ($r = -0,64$) stwierdzono na glebie *G1* o najmniejszym zapasie

wody użytecznej. Na pozostałych glebach relacje były słabsze - najsłabszą zanotowano na glebie *G4* ($r = -0,56$). O zróżnicowaniu wartości współczynnika korelacji r na glebach decydowały możliwości retencjonowania wody oraz utrzymujące się w glebach różne zapasy wody pozimowej. W kolejnych okresach zapasy wody pozimowej odgrywały coraz mniejszą rolę w łagodzeniu niedoborów opadu, a wzrastało znaczenie opadów bieżących. Współczynniki korelacji wzrastały na wszystkich glebach i były one mało zróżnicowane. Największą wartość współczynnika korelacji i prawie równą na wszystkich glebach zanotowano w okresie III ($r = -0,88$). Prawie taką samą zanotowano w okresie IV ($r = -0,87$). Na podstawie współczynnika determinacji R^2 można stwierdzić, że w okresie I zmienność wskaźnika *CDI* była spowodowana opadami w 41% na glebie *G1*. Na pozostałych glebach zmniejszała się, na glebie *G4* była najmniejsza i równa 31%. Największe wyjaśnienie zmienności wskaźnika *CDI* opadami stwierdzono w okresie III (w 78-79% na wszystkich glebach).

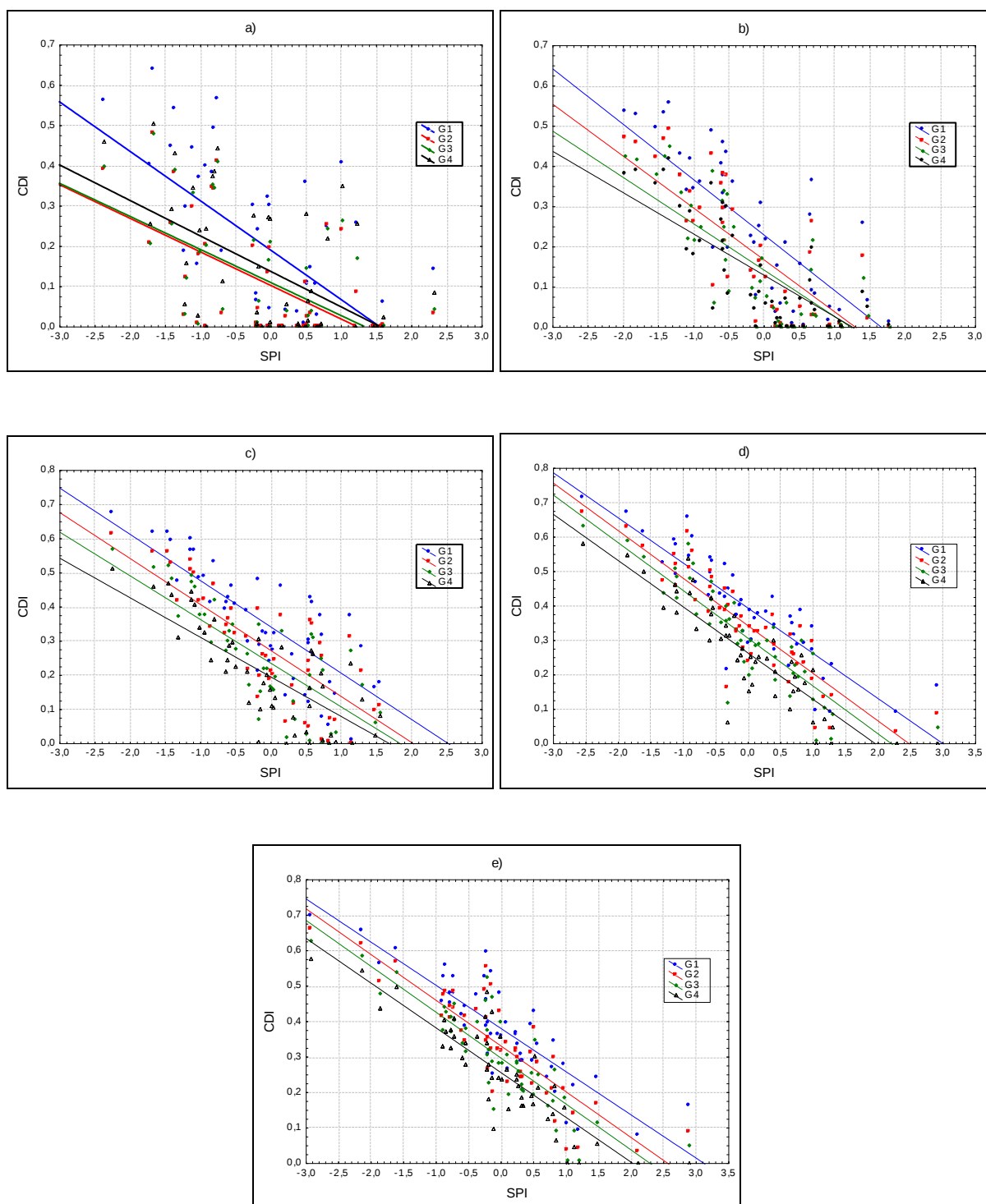
Na słabszą korelację *SPI* i *CDI* w okresie I oprócz czynników, które zostały wymienione wcześniej, mogły mieć też wpływ znaczne różnice w zmienności opadów P i redukcji ewapotranspiracji *CDI* oraz krótki okres (20 dni) (tab. 6.4.2). W następnych okresach, powiększanych o kolejne fazy fenologiczne, wspomniane różnice były coraz mniejsze, co mogło mieć też wpływ na wzrost korelacji obu wskaźników. Z oczywistych względów nie można było użyć do porównań zmienności wskaźnika *SPI*, ponieważ średnia wartość w wieloleciu wskaźnika standaryzowanego opadu wynosi zero.

Tabela 6.4.2. Współczynniki zmienności V (%) sum opadów P i wartości wskaźnika *CDI*

Parametr	Gleba	V (%) w okresie				
		I	Ila	Ilb	III	IV
		21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
<i>P</i>	-	67	47	45	34	30
<i>CDI 1</i>	<i>G1</i>	102	78	49	38	37
<i>CDI 2</i>	<i>G2</i>	137	98	61	45	45
<i>CDI 3</i>	<i>G3</i>	131	104	69	51	50
<i>CDI 4</i>	<i>G4</i>	116	103	76	58	57

CDI 1, CDI 2, CDI 3, CDI 4 - CDI na glebach G1, G2, G3, G4

Wzajemne relacje w badanych okresach między wskaźnikami *SPI* i *CDI* na badanych glebach przedstawiają równania regresji liniowej (rys. 6.4.1, tab. 6.4.3).



Rys. 6.4.1. Regresje liniowe wskaźnika *SPI* i *CDI* na glebach *G1*, *G2*, *G3*, *G4* w okresach: a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV

Tab. 6.4.3. Równania regresji liniowej $CDI = a + b SPI$ w okresach

Gleba	Równanie regresji w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
<i>G1</i>	0,19-0,13 <i>SPI</i>	0,23-0,14 <i>SPI</i>	0,34-0,14 <i>SPI</i>	0,40-0,13 <i>SPI</i>	0,39-0,12 <i>SPI</i>
<i>G2</i>	0,10-0,08 <i>SPI</i>	0,17-0,13 <i>SPI</i>	0,27-0,13 <i>SPI</i>	0,34-0,14 <i>SPI</i>	0,33-0,13 <i>SPI</i>
<i>G3</i>	0,11-0,08 <i>SPI</i>	0,14-0,12 <i>SPI</i>	0,24-0,13 <i>SPI</i>	0,31-0,14 <i>SPI</i>	0,30-0,13 <i>SPI</i>
<i>G4</i>	0,14-0,09 <i>SPI</i>	0,13-0,10 <i>SPI</i>	0,20-0,16 <i>SPI</i>	0,26-0,13 <i>SPI</i>	0,26-0,13 <i>SPI</i>

Badania pokazały, że susza rolnicza opisana wskaźnikiem $CDI > 0$ rozpoczynała się na wszystkich badanych glebach i we wszystkich okresach już w zakresie dodatnich wartości SPI (rys. 6.4.1). Wynika to z tego, że wskaźnik CDI jest odniesiony do ewapotranspiracji potencjalnej.

We wszystkich okresach susza rolnicza w pierwszej kolejności pojawiała się na glebie *G1*. W okresie I redukcja ewapotranspiracji rozpoczynała się przy wartości $SPI = 1,54$ (rys. 6.4.1). Według wskaźnika SPI (tab. 5.1.1) był to okres bardzo mokry W2 pod względem warunków opadowych. W kolejnych okresach progowa wartość wskaźnika SPI , przy której rozpoczynała się susza rolnicza na glebie o najsłabszych zdolnościach retencjonowania wody systematycznie wzrastała. W okresie IV susza rolnicza, kwantyfikowana wartością $CDI = 0$, pojawiała się przy wartości $SPI = 3,12$, która klasyfikowała okres jako ekstremalnie wilgotny pod względem opadów (W3).

Na pozostałych glebach (*G2*, *G3* i *G4*), które charakteryzowały się większymi zapasami wody użytecznej, redukcja ewapotranspiracji ($CDI > 0$) rozpoczynała się także przy wartościach $SPI > 0$. Wraz ze wzrostem retencji gleb wartości SPI były mniejsze. W okresach I, IIa, IIb susza rolnicza na tych glebach pojawiała się w okresie umiarkowanie mokrym (W1) lub w okresie bardzo mokrym (W2), natomiast w okresach III i IV w okresie ekstremalnie mokrym (W3).

Występowanie suszy rolniczej opisanej wskaźnikiem CDI przy braku suszy meteorologicznej opisanej wskaźnikiem SPI , należy tłumaczyć w sposób następujący. Klasyfikacja suszy meteorologicznej według SPI jest taka, że jej początek odpowiada medianie opadów wynoszącej na przykład w okresie IV 307 mm, natomiast początek suszy rolniczej według CDI jest odniesiony do ewapotranspiracji potencjalnej i wynoszącej w tym samym okresie 523 mm. Pokazuje to wyraźnie, że brak suszy rolniczej ($CDI = 0$) występuje przy opadzie o wiele większym niż wynikałoby to z kryterium suszy meteorologicznej.

Podobne zależności dotyczą też pozostałych badanych okresów. Te relacje są główną przyczyną wprowadzenia do opisu suszy rolniczej wskaźnika CDI_w , który klasyfikuje tę suszę w odniesieniu do średniej ewapotranspiracji wielolecia.

Z położenia punktów regresji badanych wskaźników (rys. 6.4.1) można ustalić, w jakich okresach opadowych susza rolnicza pojawiała się najczęściej. Największy rozrzut punktów było widać w okresie I. W następnych fazach fenologicznych, obserwowano tendencję do grupowania się punktów regresji w przedziale wartości $SPI <-1,5; 1,5>$, który obejmuje okresy suszy meteorologicznej umiarkowanej ($D1$) i silnej ($D2$) oraz okres normalny (N) i umiarkowanie mokry ($W1$). W okresie wegetacji dolna granica tego przedziału odpowiada redukcji ewapotranspiracji, która wynosi od 0,55 na glebie $G1$ do 0,45 na glebie $G4$. Analogicznie górna granica podanego przedziału wartości SPI odpowiada redukcji ewapotranspiracji 0,20 na glebie $G1$ i 0,1 na glebie $G4$. Wartościom SPI spoza podanego przedziału, zarówno ujemnym, jak i dodatnim, odpowiadały te przypadki suszy rolniczej, które pojawiały się w badanym wieloleciu znacznie rzadziej, a przy ekstremalnych wartościach SPI susza rolnicza pojawiała się 1-2 razy w całym badanym wieloleciu.

Korzystając z równań regresji (tab. 6.4.3) obliczono dla ustalonych wartości SPI odpowiadające im wartości CDI na badanych glebach w poszczególnych okresach (tab. 6.4.4). Przyjęte wartości SPI odpowiadają progom suszy meteorologicznej podanymi za HOW TO WORK... [1998], NDMC [2004] (tab. 5.1.1). Na podstawie tabeli 6.4.4 można stwierdzić, że największą wartość wskaźnika CDI , obliczonego za pomocą powyższych równań regresji liniowej, w danym okresie uzyskano na glebie $G1$ o najmniejszych zapasach wody użytkowej. Większą redukcję ewapotranspiracji notowano na glebach o mniejszych zapasach wody użytkowej, a mniejszą na glebach o większych możliwościach retencjonowania wody w glebie.

W okresie I umiarkowanej suszy meteorologicznej ($SPI = -1,0$) towarzyszyła na wszystkich badanych glebach susza rolnicza. Największą redukcję ewapotranspiracji stwierdzono na glebie $G1$ ($CDI = 0,31$), najmniejszą na glebie $G4$ ($CDI = 0,22$). Wzrost intensywności suszy meteorologicznej, wyrażający się coraz mniejszymi wartościami wskaźnika SPI , powodował jednoczesny wzrost intensywności suszy rolniczej (wzrost wskaźnika CDI). W czasie suszy silnej ($SPI = -1,5$) odpowiadające wartości CDI zmieniały się na kolejnych glebach od 0,37 do 0,27, a w czasie suszy ekstremalnej ($SPI = -2,0$) - od 0,43 do 0,31.

Tab. 6.4.4. *CDI* dla progów klas suszy meteorologicznej według *SPI*

Gleba	<i>CDI</i> w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
	<i>SPI</i> = -1,0				
<i>G 1</i>	0,31	0,37	0,48	0,52	0,50
<i>G 2</i>	0,18	0,30	0,41	0,48	0,46
<i>G 3</i>	0,19	0,26	0,36	0,44	0,43
<i>G 4</i>	0,22	0,23	0,31	0,40	0,38
	<i>SPI</i> = -1,5				
<i>G 1</i>	0,37	0,44	0,55	0,59	0,56
<i>G 2</i>	0,23	0,36	0,47	0,55	0,52
<i>G 3</i>	0,23	0,31	0,43	0,51	0,49
<i>G 4</i>	0,27	0,28	0,37	0,46	0,45
	<i>SPI</i> = -2,0				
<i>G 1</i>	0,43	0,50	0,61	0,66	0,62
<i>G 2</i>	0,27	0,43	0,54	0,62	0,59
<i>G 3</i>	0,27	0,37	0,49	0,58	0,56
<i>G 4</i>	0,31	0,33	0,43	0,53	0,51

W kolejnym okresie IIa, przy tych samych wartościach progowych suszy meteorologicznej obserwowano wzrost redukcji ewapotranspiracji. I tak wartości *SPI* = -1,0 odpowiadały wartości wskaźnika *CDI* od 0,37 do 0,23; *SPI* = -1,5 - od 0,44 do 0,28; *SPI* = -2,0 - od 0,50 do 0,33.

W okresie IIb obserwowano dalsze zwiększanie wartości wskaźnika *CDI*, odpowiadających charakterystycznym wartościom wskaźnika *SPI*. Początek umiarkowanej suszy meteorologicznej *SPI* = -1,0 powodował redukcję ewapotranspiracji od 0,48 do 0,31, suszy silnej *SPI* = -1,5 - od 0,55 do 0,37, a suszy ekstremalnej *SPI* = -2,0 - od 0,61 do 0,43.

Największą redukcję ewapotranspiracji spowodowaną suszą meteorologiczną stwierdzono w okresie III. Wartość progowa umiarkowanej suszy meteorologicznej odpowiadała wartościom *CDI* od 0,52 do 0,40; suszy silnej od 0,59 do 0,46, a suszy ekstremalnej od 0,66 do 0,53.

Podobnie równie wysokie wartości *CDI* stwierdzono w okresie IV. Umiarkowana susza meteorologiczna w okresie wegetacji buraka cukrowego powodowała redukcję ewapotranspiracji na kolejnych glebach w zakresie od 0,50 do 0,38, susza silna - od 0,56 do 0,45, susza ekstremalna - od 0,62 do 0,51.

Otrzymane wyniki z jednej strony potwierdzają ogólnie znany fakt, że w tych samych warunkach atmosferycznych przebieg suszy rolniczej zależy od rodzaju gleby, na której ona występuje. Z drugiej strony szczegółowo kwantyfikują intensywność suszy rolniczej wyrażoną wartością wskaźnika *CDI* i jej relacje do intensywności suszy meteorologicznej wyrażoną wskaźnikiem *SPI*. Z braku klasyfikacji intensywności suszy rolniczej, jej ocenę można przeprowadzać kierując się właśnie tymi wartościami. Mniejsze wartości *CDI* oznaczają łagodniejszą suszę, a większe silniejszą.

Aby odpowiedzieć na pytanie, jaka susza meteorologiczna powoduje określoną redukcję ewapotranspiracji, zbadano jak zmienia się wartość wskaźnika *SPI* w każdym okresie i na każdej glebie w zależności od założonej wartości wskaźnika *CDI*. Obliczenia wykonano dla wartości *CDI* w zakresie $0,0 \div 0,5$ z krokiem co 0,1. Wyniki obliczeń przedstawia tabela 6.4.5.

Uzyskane wyniki pokazują, że w danym okresie, na glebach o zróżnicowanych zapasach wody użytecznej, tej samej wielkości redukcji ewapotranspiracji, czyli tej samej intensywności suszy rolniczej nie towarzyszy taka sama susza meteorologiczna. Na przykład redukcja ewapotranspiracji o wielkości *CDI* = 0,4 w okresie IIb na glebach *G1* i *G2* powstawała w warunkach łagodnej suszy meteorologicznej ($-0,99 < SPI < 0$), na glebie *G3* w czasie suszy umiarkowanej, a na glebie *G4* w czasie silnej suszy meteorologicznej.

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 6.4.5 zaobserwowano dwie prawidłowości. Po pierwsze, wartości *SPI*, odpowiadające określonym wartościom *CDI* na tej samej glebie, wzrastają wraz z długością badanego okresu, czyli przesuwają się od okresów suchych w kierunku okresów bardziej wilgotnych. Po drugie, począwszy od okresu IIa, ten sam poziom redukcji ewapotranspiracji jest spowodowany na glebach o mniejszych zapasach wody użytecznej słabszą suszą meteorologiczną, a na glebach o większych ZWU suszą silniejszą.

Tab. 6.4.5. *SPI* dla wybranych wartości *CDI*

Gleba	<i>SPI</i> w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
	<i>CDI</i> = 0,0				
<i>G 1</i>	1,47	1,59	2,45	2,92	3,04
<i>G 2</i>	1,10	1,22	1,95	2,41	2,49
<i>G 3</i>	1,20	1,15	1,76	2,13	2,22
<i>G 4</i>	1,44	1,16	1,60	1,88	1,95
	<i>CDI</i> = 0,1				
<i>G 1</i>	0,73	0,94	1,78	2,24	2,30
<i>G 2</i>	0,02	0,53	1,28	1,75	1,79
<i>G 3</i>	0,11	0,37	1,06	1,49	1,52
<i>G 4</i>	0,41	0,29	0,82	1,21	1,24
	<i>CDI</i> = 0,2				
<i>G 1</i>	-0,08	0,21	1,05	1,48	1,48
<i>G 2</i>	-1,18 (<i>D1</i>)	-0,25	0,54	1,03	1,02
<i>G 3</i>	-1,11 (<i>D1</i>)	-0,50	0,28	0,76	0,75
<i>G 4</i>	-0,72	-0,69	-0,04	0,47	0,44
	<i>CDI</i> = 0,3				
<i>G 1</i>	-0,90	-0,51	0,31	0,71	0,66
<i>G 2</i>	-2,38 (<i>D3</i>)	-1,03 (<i>D1</i>)	-0,20	0,31	0,24
<i>G 3</i>	-2,33 (<i>D3</i>)	-1,37 (<i>D1</i>)	-0,50	-0,04	-0,02
<i>G 4</i>	-1,86 (<i>D2</i>)	-1,66 (<i>D2</i>)	-0,90	-0,27	-0,35
	<i>CDI</i> = 0,4				
<i>G 1</i>	-1,72 (<i>D2</i>)	-1,24 (<i>D1</i>)	-0,43	-0,05	-0,16
<i>G 2</i>	-3,58* (<i>D3</i>)	-1,80 (<i>D2</i>)	-0,95	-0,42	-0,53
<i>G 3</i>	-3,55* (<i>D3</i>)	-2,24 (<i>D3</i>)	-1,29 (<i>D1</i>)	0,68	-0,80
<i>G 4</i>	-2,99 (<i>D3</i>)	-2,64 (<i>D3</i>)	-1,77 (<i>D2</i>)	-1,02 (<i>D1</i>)	-1,14 (<i>D1</i>)
	<i>CDI</i> = 0,5				
<i>G 1</i>	-2,53 (<i>D3</i>)	-1,97 (<i>D2</i>)	-1,17 (<i>D1</i>)	-0,81	-0,98 ($\approx D1$)
<i>G 2</i>	-4,78* (<i>D3</i>)	-2,58 (<i>D3</i>)	-1,69 (<i>D2</i>)	-1,14 (<i>D1</i>)	-1,31 (<i>D1</i>)
<i>G 3</i>	-4,76* (<i>D3</i>)	-3,11* (<i>D3</i>)	-2,07 (<i>D3</i>)	-1,40 (<i>D1</i>)	-1,57 (<i>D2</i>)
<i>G 4</i>	-4,13* (<i>D3</i>)	-3,61* (<i>D3</i>)	-2,63 (<i>D3</i>)	-1,76 (<i>D2</i>)	-1,93 (<i>D2</i>)

D1, *D2*, *D3* – klasy suszy meteorologicznej (tab. 5.1.1);

* - wartości spoza zakresu równań regresji

6.4.2. RELACJA SPI - CDI_w

Badanie związków między wskaźnikiem standaryzowanego opadu SPI meteorologicznej SPI jako wskaźnikiem suszy meteorologicznej oraz wskaźnikiem suszy rolniczej CDI_w przebiegało według tej samej metodyki, jaka była zastosowana w poprzednim podrozdziale.

Wartości współczynników korelacji świadczą, że w okresach IIa, IIb, III i IV siła związków pomiędzy wskaźnikiem SPI i CDI_w jest duża i istotna statystycznie (tab. 6.4.6).

Tabela 6.4.6. Współczynniki korelacji wartości wskaźników CDI_w i SPI w okresach

Gleba	Współczynnik korelacji w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
$G1$	-0,38*	-0,75*	-0,76*	-0,86*	-0,86*
$G2$	-0,06	-0,73*	-0,75*	-0,87*	-0,87*
$G3$	-0,06	-0,69*	-0,72*	-0,86*	-0,87*
$G4$	-0,12	-0,64*	-0,69*	-0,85*	-0,86*

* - statystycznie istotny z $p < 0,05$

Największą wartość współczynnika korelacji ($r = -0,87$) zanotowano w okresie III i IV. W wymienionych okresach, na wszystkich glebach, czynnik opadowy na suszę rolniczą wpływał w 75-76%. Najmniejszą zależność między wskaźnikami obu rodzajów susz stwierdzono w okresie IIa ($r = -0,64 \div -0,75$), co oznacza, że susza rolnicza była spowodowana czynnikiem opadowym w przedziale od 41% na glebie $G4$ do 56% na glebie $G1$. Z tymi wynikami wyraźnie kontrastują korelacje uzyskane w okresie I, a więc w fazie siewu i wschodów buraka cukrowego. Tylko na glebie $G1$ stwierdzono istotny statystycznie związek pomiędzy wskaźnikiem SPI i CDI_w , na pozostałych glebach takich związków nie było. Niskie i nieistotne współczynniki korelacji świadczą o tym, że inne czynniki niż opadowy wpływały w tym okresie znacząco na różnicę między ewapotranspiracją w danym roku i średnią wieloletnią. Czynnikiem tym są pozimowe zapasy wody w glebie.

Równania regresji liniowej wartości wskaźników SPI i CDI_w zestawiono w tabeli 6.4.7, a graficzne zobrazowanie otrzymanych relacji przedstawiono na rysunku 6.4.2. Okazało się, że w badanych zależnościach $CDI_w = a + b SPI$, wyraz wolny $a \approx 0$ i był nieistotny statystycznie, stąd w przyjętych równaniach został on pominięty. Można więc przyjąć, że początek redukcji ewapotranspiracji odnoszącej się do średnich wielkości ewapotranspiracji w wieloleciu na

każdej glebie i w każdym okresie rozpoczynał się przy $SPI = 0$. Oznacza to, że każdej meteorologicznej suszy łagodnej i silniejszej towarzyszyła susza rolnicza, której intensywność jest skwantyfikowana wartością wskaźnika CDI_w .

Tab. 6.4.7. Równania regresji liniowej $CDI_w = b SPI$ w okresach

Gleba	Równanie regresji w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
<i>G1</i>	$-0,07SPI$	$-0,13SPI$	$-0,16SPI$	$-0,17SPI$	$-0,15SPI$
<i>G2</i>	-	$-0,11SPI$	$-0,14SPI$	$-0,16SPI$	$-0,14SPI$
<i>G3</i>	-	$-0,09SPI$	$-0,12SPI$	$-0,15SPI$	$-0,13SPI$
<i>G4</i>	-	$-0,07SPI$	$-0,10SPI$	$-0,13SPI$	$-0,12SPI$

”-” – zależność nieistotna

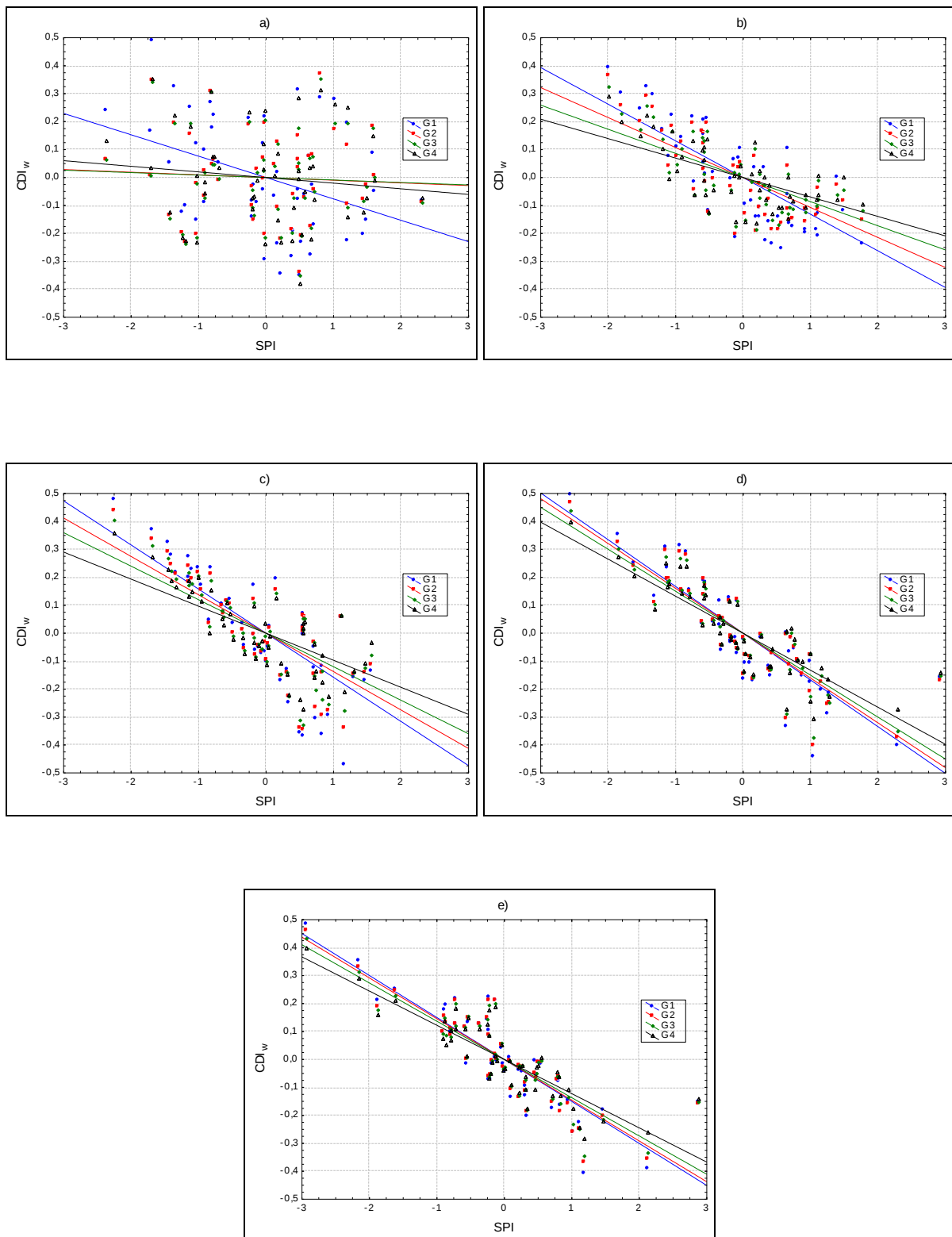
Korzystając z powyższych równań regresji liniowej, podobnie, jak w poprzednim rozdziale, obliczono wartości wskaźnika CDI_w w zależności od przyjętych wartości SPI (tab. 6.4.8). Do obliczeń wybrano wartości SPI , które charakteryzowały kolejne klasy intensywności suszy meteorologicznej.

W okresie IIa, przy $SPI = -1,0$ wartość wskaźnika CDI_w zmieniała się na poszczególnych glebach od 0,13 do 0,07. Analogicznie, przy $SPI = -1,5$ wartości te zmieniały się od 0,20 do 0,11; a przy $SPI = -2,0$ - od 0,26 do 0,14.

W okresie IIb, susza meteorologiczna powodowała nieco większą redukcję ewapotranspiracji. I tak na początku umiarkowanej suszy meteorologicznej wynosiła ona na kolejnych glebach od 0,16 do 0,10, suszy silnej - od 0,24 do 0,15, a suszy ekstremalnej - od 0,32 do 0,20.

W następnym okresie III w dalszym ciągu wzrastały wartości graniczne wskaźnika CDI_w . Przy $SPI = -1,0$ wartości CDI_w na kolejnych glebach zmieniały się w zakresie od 0,17 do 0,13; $SPI = -1,5$ - od 0,26 do 0,20; $SPI = -2,0$ - od 0,34 do 0,26.

W całym okresie wegetacji (okres IV) badane zależności były nieznacznie mniejsze. Umiarkowana susza meteorologiczna prowadziła do redukcji ewapotranspiracji na poziomie od 0,15 do 0,12; susza silna - od 0,23 do 0,18; susza ekstremalna - od 0,30 do 0,24.



Rys.6.4.2. Regresje liniowe wskaźnika SPI i CDI_w na glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$ w okresach: a) I, b) IIa, c) IIb, d) III, e) IV

Tab. 6.4.8. CDI_w dla progów klas suszy meteorologicznej według SPI

Gleba	CDI_w w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
	$SPI = -1,0$				
G 1	0,07	0,13	0,16	0,17	0,15
G 2	-	0,11	0,14	0,16	0,14
G 3	-	0,09	0,12	0,15	0,13
G 4	-	0,07	0,10	0,13	0,12
	$SPI = -1,5$				
G 1	0,11	0,20	0,24	0,26	0,23
G 2	-	0,17	0,21	0,24	0,21
G 3	-	0,14	0,18	0,23	0,20
G 4	-	0,11	0,15	0,20	0,18
	$SPI = -2,0$				
G 1	0,14	0,26	0,32	0,34	0,30
G 2	-	0,22	0,28	0,32	0,28
G 3	-	0,18	0,24	0,30	0,26
G 4	-	0,14	0,20	0,26	0,24

”-” - zależność nieistotna

Na podstawie otrzymanych wyników widać, że susza meteorologiczna w odniesieniu do średnich warunków opadowych na Kujawach powoduje znacznie mniejszą redukcję ewapotranspiracji na glebach (wskaźnik CDI_w) niż w odniesieniu do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji (wskaźnik CDI) (por. tab. 6.4.4 i 6.4.8). W większości przypadków wielkości te są 2-3-krotnie mniejsze. Otrzymane wyniki pokazują, że przy tej samej sumie opadów w danym okresie, susza rolnicza na poszczególnych glebach przebiegała z różną intensywnością. Na glebach o mniejszych zapasach wody użytkowej redukcja ewapotranspiracji była większa (bardziej intensywniejsza susza rolnicza), niż na glebach o większych ZWU. Ponadto przy tej samej intensywności suszy meteorologicznej, intensywność suszy rolniczej wzrastała na każdej glebie w kolejnych okresach od I do III, a w okresie IV nieznacznie zmniejszała się.

Zbadano też, jaka susza meteorologiczna powoduje założoną redukcję ewapotranspiracji określoną wskaźnikiem CDI_w . Obliczenia wykonano dla wartości CDI_w w zakresie $0,0 \div 0,5$ z krokiem co 0,1 (tab. 6.4.9).

Tab. 6.4.9. Wartości *SPI* w okresach przy ustalonej wartości *CDI_w*

Gleba	<i>SPI</i> w okresie				
	I	IIa	IIb	III	IV
	21.04-10.05	21.04-20.06	21.04-20.07	21.04-30.08	21.04-30.09
	<i>CDI_w</i> = 0,1				
<i>G 1</i>	-1,43 (<i>D1</i>)	-0,77	-0,63	-0,59	-0,67
<i>G 2</i>	-	-0,91	-0,71	-0,63	-0,71
<i>G 3</i>	-	-1,11(<i>D1</i>)	-0,83	-0,67	-0,77
<i>G 4</i>	-	-1,43 (<i>D1</i>)	-1,00 (<i>D1</i>)	-0,77	-0,83
	<i>CDI_w</i> = 0,2				
<i>G 1</i>	-2,86	-1,54 (<i>D2</i>)	-1,25 (<i>D1</i>)	-1,18 (<i>D1</i>)	-1,33 (<i>D1</i>)
<i>G 2</i>	-	-1,82 (<i>D2</i>)	-1,43 (<i>D1</i>)	-1,25 (<i>D1</i>)	-1,43 (<i>D1</i>)
<i>G 3</i>	-	-2,22 (<i>D3</i>)	-1,67 (<i>D2</i>)	-1,33 (<i>D1</i>)	-1,54 (<i>D2</i>)
<i>G 4</i>	-	-2,86 (<i>D3</i>)	-2,00 (<i>D3</i>)	-1,54 (<i>D2</i>)	-1,67 (<i>D2</i>)
	<i>CDI_w</i> = 0,3				
<i>G 1</i>	-4,29*	-2,31 (<i>D3</i>)	-1,88 (<i>D2</i>)	-1,76 (<i>D2</i>)	-2,00 (<i>D3</i>)
<i>G 2</i>	-	-2,73 (<i>D3</i>)	-2,14 (<i>D3</i>)	-1,88 (<i>D2</i>)	-2,14 (<i>D3</i>)
<i>G 3</i>	-	-3,33*	-2,50 (<i>D3</i>)	-2,00 (<i>D3</i>)	-2,31(<i>D3</i>)
<i>G 4</i>	-	-4,29*	-3,00*	-2,31 (<i>D3</i>)	-2,50 (<i>D3</i>)
	<i>CDI_w</i> = 0,4				
<i>G 1</i>	-5,71*	-3,08*	-2,50 (<i>D3</i>)	-2,35 (<i>D3</i>)	-2,67 (<i>D3</i>)
<i>G 2</i>	-	-3,64*	-2,86 (<i>D3</i>)	-2,50 (<i>D3</i>)	-2,86 (<i>D3</i>)
<i>G 3</i>	-	-4,44*	-3,33*	-2,67 (<i>D3</i>)	-3,10*
<i>G 4</i>	-	-5,71*	-4,00*	-3,08*	-3,33*
	<i>CDI_w</i> = 0,5				
<i>G 1</i>	-7,14*	-3,85*	-3,13*	-2,94 (<i>D3</i>)	-3,33*
<i>G 2</i>	-	-4,55*	-3,57*	-3,13*	-3,57*
<i>G 3</i>	-	-5,56*	-4,17*	-3,33*	-3,85*
<i>G 4</i>	-	-7,14*	-5,00*	-3,85*	-4,17*

D1, D2, D3 – klasy suszy meteorologicznej (tab. 5.1.1);

* - wartości spoza zakresu równań regresji; '-' - zależność nieistotna

Uzyskane wyniki pokazują, że - podobnie jak przy wskaźniku *CDI* - w danym okresie ustalona wartość redukcji ewapotranspiracji pojawia się na glebach o mniejszych zapasach wody użytecznej przy łagodniejszej suszy meteorologicznej i odwrotnie. Przy redukcji *CDI_w* = 0,3 i większej, pojawiają się wartości *SPI* wykraczające poza rzeczywiste wartości uzyskane w badanym wieloleciu. Są to wartości ekstrapolowane i mogą być obarczone dużym błędem.

6.4.3. PRZEGLĄD WYBRANYCH SUSZ NA KUJAWACH W LATACH 1954 – 2003

Na zakończenie rozdziału przedstawiono przykłady przebiegu kilku charakterystycznych w badanym wieloleciu 1954-2003 susz meteorologicznych i rolniczych na Kujawach. Wspólna analiza zmienności opadów (P), ewapotranspiracji rzeczywistej (ET) i potencjalnej (ET_p) oraz przebiegu suszy meteorologicznej (SPI) i rolniczej (CDI i CDI_w) w kolejnych okresach badawczych okresu wegetacji buraka cukrowego (21.04-30.09) pozwoli poznać szczegółowiej mechanizm powstawania obu rodzajów susz.

Analizie poddano susze w wybranych latach charakteryzujących się różnym przebiegiem suszy meteorologicznej.

- susza meteorologiczna trwająca w całym okresie wegetacji - 1989 r. (rys. 6.4.3)

Suszę w okresie wegetacji w 1989 r. charakteryzowały opady w kolejnych okresach niższe od średniej z wielolecia. Z okresu na okres wzrastała intensywność suszy meteorologicznej - od $SPI = -0,8$ w okresie I do $SPI = -2,9$ w okresie IV. W całym okresie wegetacji sumie zanotowano tylko 105 mm opadów, czyli 34% średniej sumy opadów w wieloleciu 1954-2003. Niewystarczające opady były przyczyną wzrostu różnic pomiędzy ewapotranspiracją rzeczywistą (ET) i potencjalną (ET_p) i postępującej suszy. Na koniec okresu wegetacji różnice te wynosiły na kolejnych glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$ odpowiednio 385, 364, 349 i 319 mm. Najintensywniejsza susza rolnicza powstała na glebie $G1$ o najmniejszych zapasach wody użytecznej - $CDI_w = 0,48$, a $CDI = 0,70$. Najłagodniejsza susza była na glebie $G4$ o największych zapasach wody użytecznej - $CDI_w = 0,40$, a $CDI = 0,57$.

Ten szczególnie suchy rok pokazał wyraźnie, że ocena suszy rolniczej w odniesieniu do potencjalnych możliwości parowania jest mało uzasadniona i mało miarodajna.

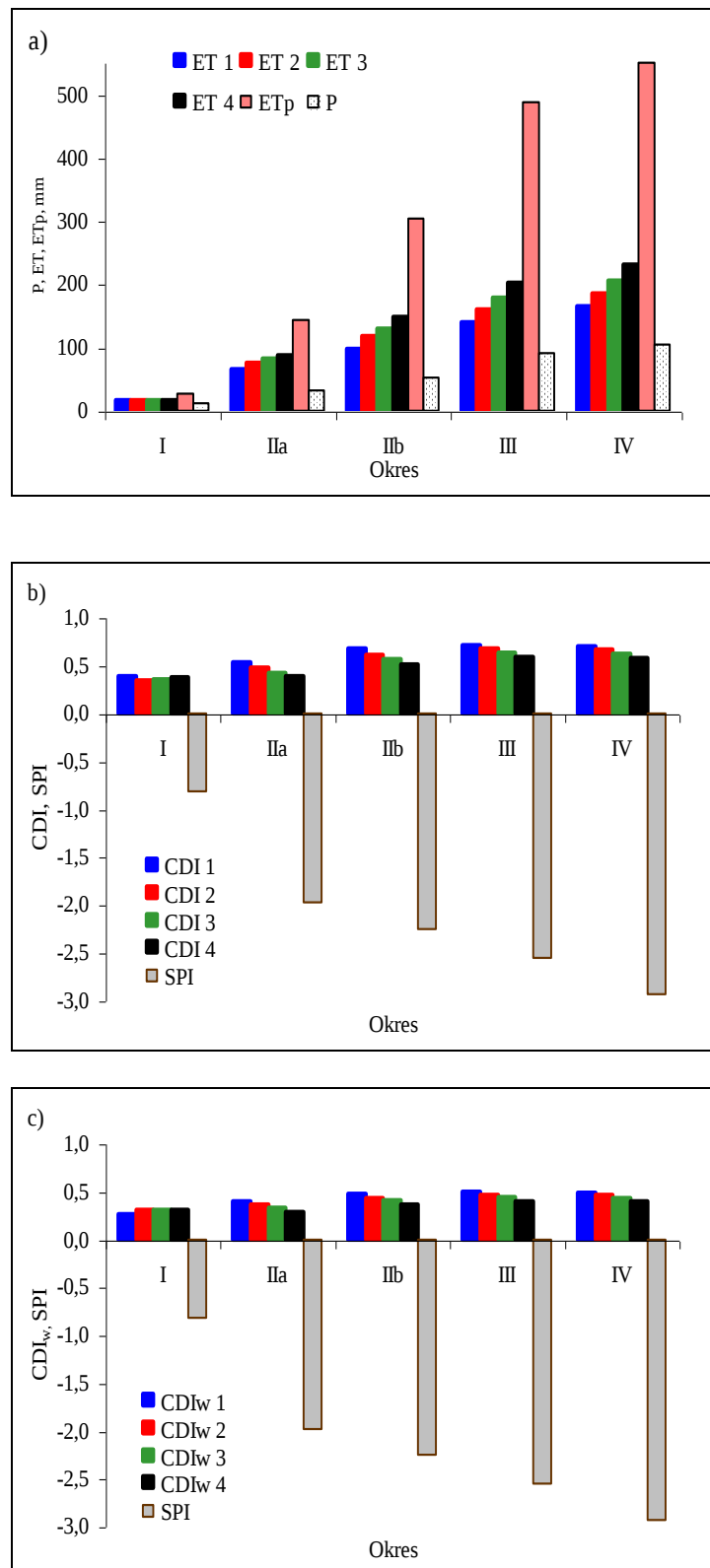
- wiosenna susza meteorologiczna - 2000 r. (rys. 6.4.4)

Okres wegetacji w 2000 r. z powodu wiosenno-letniej suszy meteorologicznej należał również do suchych (249 mm opadów). W okresie I była to susza ekstremalna ($P = 2$ mm, $SPI = -2,4$), w okresie IIa susza silna ($P = 43$ mm, $SPI = -1,5$), a w okresie IIb susza umiarkowana ($P = 105$ mm, $SPI = -1,0$). Maksymalna redukcja ewapotranspiracji wystąpiła w okresie I. Na glebie $G1$ wartość wskaźnika CDI_w wynosiła 0,24 ($CDI = 0,56$), na

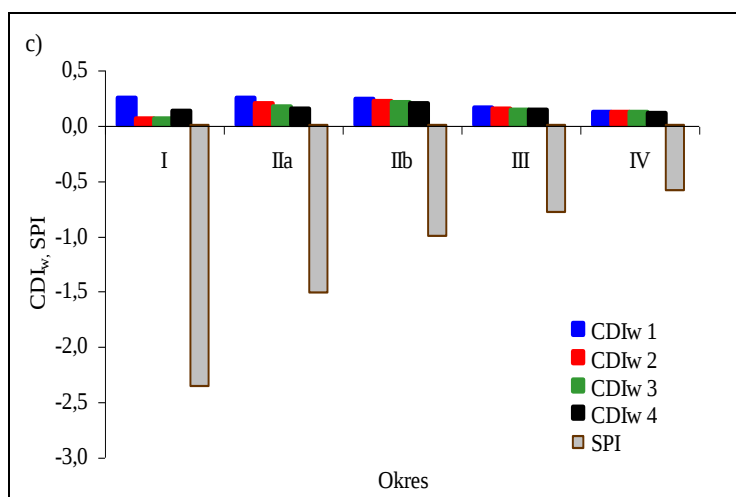
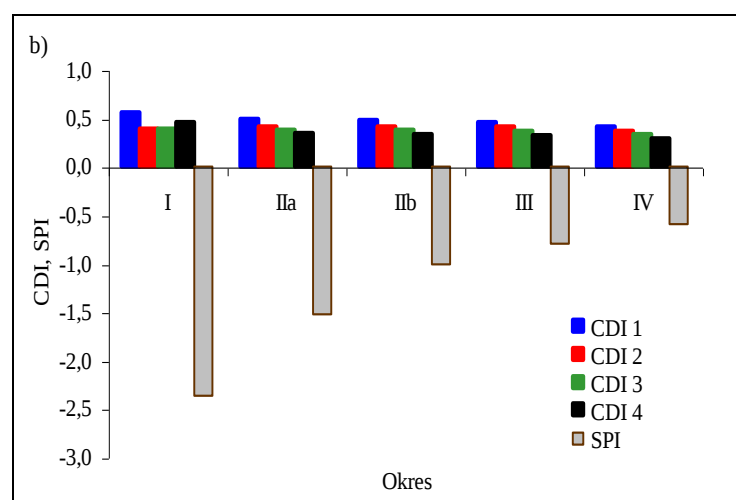
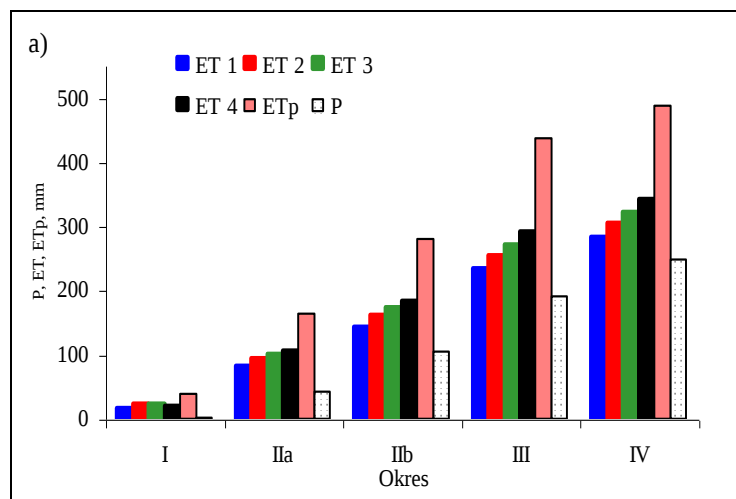
glebie *G4* była mniejsza - $CDI_w = 0,13$ ($CDI = 0,46$). W kolejnych fazach fenologicznych III i IV pojawiły się większe sumy opadów, które złagodziły susze powstałe w fazach poprzednich. Opady te spowodowały zwiększenie wartości *SPI* oraz zmniejszenie wartości CDI_w i CDI w okresie III i IV. Na koniec okresu wegetacji poziom redukcji ewapotranspiracji określony wskaźnikiem CDI_w był prawie jednakowy na wszystkich glebach, natomiast według wskaźnika CDI różnica między redukcją ewapotranspiracji na glebie *G1* i *G4* nie przekraczała 0,1.

▪ letnia susza meteorologiczna – 1982 r. (rys. 6.4.5)

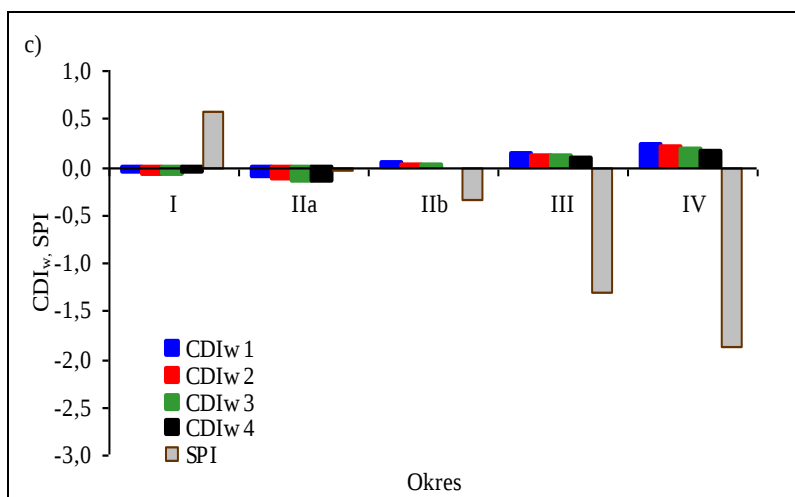
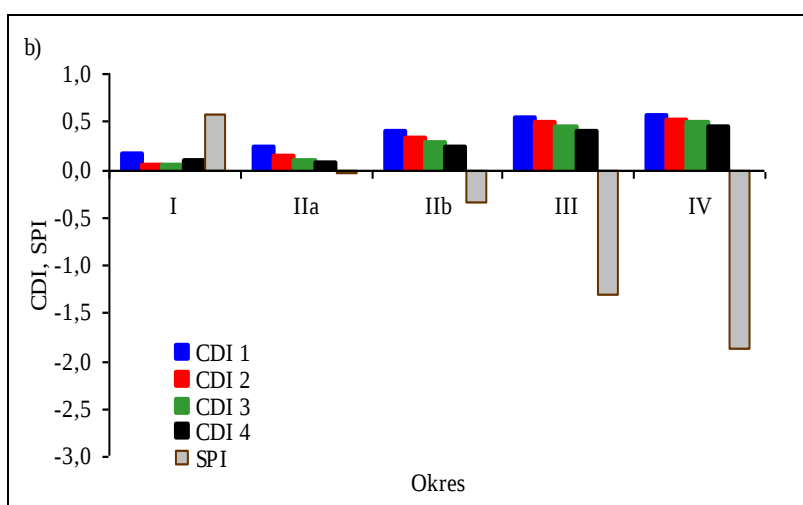
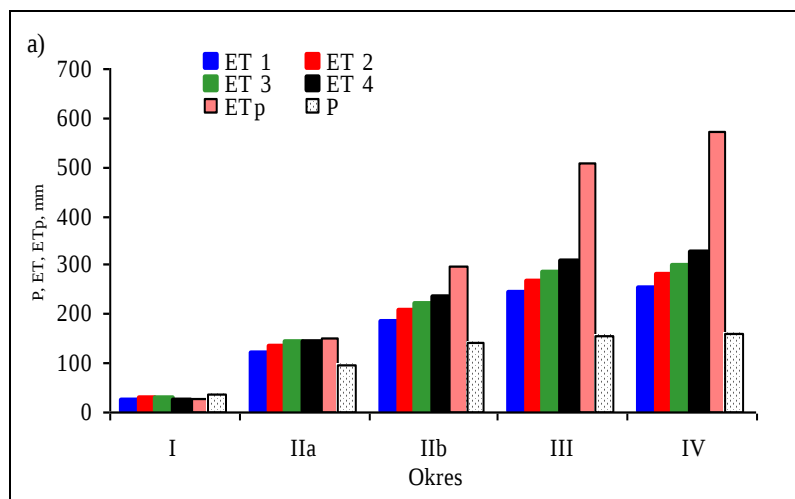
W 1982 r. początek okresu wegetacji (okresy I i IIa) był wilgotny. W tych okresach nie było redukcji ewapotranspiracji stosunku do średniej ewapotranspiracji wieloletniej ($CDI_w < 0$), a redukcja w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej (CDI) była mniejsza od średniej redukcji wieloletniej. Dopiero w okresie IIb rozpoczęła się łagodna susza meteorologiczna ($P = 143$ mm, $SPI = -0,3$). W okresie III stwierdzono już suszę umiarkowaną ($P = 157$ mm, $SPI = -1,3$), a w okresie IV suszę silną ($P = 161$ mm, $SPI = -1,9$). Tej meteorologicznej suszy letniej towarzyszyła również postępująca susza rolnicza. Począwszy od okresu IIb, zarówno wartości wskaźnika CDI_w , jak i CDI pokazywały jej rozwój. Maksymalną wartość suszy zanotowano w okresie IV. Na glebie *G1* stwierdzono wartość $CDI_w = 0,21$ ($CDI = 0,56$), na pozostałych glebach susza była łagodniejsza.



Rys. 6.4.3. Analiza okresu wegetacji buraka cukrowego w 1989 r.:
a) P , ET , ET_p ; b) SPI i CDI ; c) SPI i CDI_w ;
1, 2, 3, 4 – wartości ET , CDI , CDI_w na glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$



Rys. 6.4.4. Analiza okresu wegetacji buraka cukrowego w 2000 r.
Oznaczenia jak na rys. 6.4.3



Rys. 6.4.5. Analiza okresu wegetacji buraka cukrowego w 1982 r.
Oznaczenia jak na rys. 6.4.3

6.5. SPI JAKO WSKAŹNIK SUSZY ROLNICZEJ

Dotychczasowe analizy dotyczące związków pomiędzy suszą meteorologiczną i rolniczą pokazały pewne prawidłowości, które występowały w relacji pomiędzy *SPI* i wskaźnikami *CDI* i *CDI_w*, a także we wzajemnych relacjach pomiędzy *CDI* i *CDI_w*. Analizy te wskazują, że w warunkach Kujaw zasadne jest odnoszenie suszy rolniczej do przeciętnych warunków ewapotranspiracji buraka cukrowego, a nie do potencjalnych możliwości parowania. Klimat Kujaw nie zapewnia opadów wymaganych dla wysoko plonujących buraków cukrowych, a jeśli już się one pojawiają, to w krótkim okresie czasu i z bardzo małą częstotliwością. Ponadto okazało się, że w badanym wieloleciu 1954-2003 liczba lat, w których ewapotranspiracja była większa lub mniejsza od średniej ewapotranspiracji wielolecia była taka sama. Oznacza to, że co drugi rok występowała susza rolnicza, której determinantem była redukcja ewapotranspiracji w stosunku do ewapotranspiracji średniej w wieloleciu.

Przeprowadzona analiza częstości suszy meteorologicznej według *SPI* pokazała znaczną ich ilość w przedziale $0 < SPI < -1,0$ (tab. 6.2.1). Ponadto wykazano, że *CDI_w* = 0 odpowiada *SPI* = 0. W związku z tymi wynikami modyfikacji ulegnie dotychczas stosowana klasyfikacja susz meteorologicznych (tab. 5.1.1), którą należy rozszerzyć o jeszcze jedną klasę suszy łagodnej *D0*, która jest kwantyfikowana wartościami *SPI* z przedziału $0 < SPI < -1,0$ (tab. 6.5.1).

W literaturze brak jest odpowiedzi, jaki poziom redukcji ewapotranspiracji, czyli jaką wartość wskaźnika *CDI_w* można przyjąć za początek suszy rolniczej, jak również brak jest przyjętej klasyfikacji tej suszy według tego wskaźnika. Wobec tego, analogicznie do klasyfikacji suszy meteorologicznej według *SPI*, proponuje się wprowadzić 4 stopniową klasyfikację susz rolniczych w oparciu o wartości wskaźnika *CDI_w* (tab. 6.5.1). Jako podstawę do wyznaczania poszczególnych progów klas suszy rolniczej przyjęto rozkład częstości występowania wartości *CDI_w* (rys. 6.3.3). Najwięcej susz wystąpiło w przedziale $0 < CDI_w < 0,2$ i można je klasyfikować jako susze łagodne o największej częstotliwości. Kolejne klasy wyznaczają wartości progowe 0,2; 0,3 i 0,4, w których zmniejsza się częstotliwość susz rolniczych (tab. 6.5.1).

Tabela. 6.5.1. Klasyfikacja suszy meteorologicznej według SPI i suszy rolniczej na podstawie wskaźnika CDI_w

Klasa suszy meteorologicznej	Intensywność suszy	SPI	Klasa suszy rolniczej	Intensywność suszy	CDI_w
$D0$	Łagodna	$0,0 \div -0,99$	1	Łagodna	$0,0 \div 0,19$
$D1$	Umiarkowana	$-1,0 \div -1,49$	2	Umiarkowana	$0,2 \div 0,29$
$D2$	Silna	$-1,5 \div -1,99$	3	Silna	$0,3 \div 0,39$
$D3$	Ekstremalna	$\leq -2,0$	4	Ekstremalna	$\geq 0,4$

Korzystając z wcześniej obliczonych zależności liniowych pomiędzy badanymi wskaźnikami suszy meteorologicznej i rolniczej, zestawiono w tabeli 6.5.2 wartości SPI i CDI , przyjmując do obliczeń wartości progowe klas suszy rolniczej opisywanej wskaźnikiem CDI_w . Przykładowo w okresie III, 30% redukcję ewapotranspiracji (3 klasa) na glebie $G1$ spowoduje silna susza meteorologiczna ($SPI = -1,76$; $P = 130$ mm), a na glebie $G4$ ekstremalna susza meteorologiczna ($SPI = -2,31$; $P = 102$ mm). W odniesieniu do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji (wskaźnik CDI), redukcja ta wyniesie na glebie $G1$ - 61%, a na glebie $G4$ - 53%. W powyższym przykładzie wielkości sum opadów odczytano z tabeli 6.5.3. Sumy opadów P dla wartości progowych CDI_w zostały wyznaczone dla odpowiednich wartości SPI z tabeli 6.5.2, stosując odwrotne przekształcenie do wzoru (5.1.1):

$$P = (SPI \cdot \hat{\mu} + \hat{\sigma})^3 \quad (6.5.1)$$

Tabela 6.5.2. Zależności wskaźników suszy meteorologicznej i rolniczej na badanych glebach w poszczególnych okresach

Klasa suszy rolniczej	Wartości progowe CDI_w	SPI				CDI			
		G1	G2	G3	G4	G1	G2	G3	G4
Okres I (21.04 - 10.05)									
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,19	0,10	0,11	0,14
2	0,2	-2,86	-	-	-	0,34	0,20	0,21	0,26
3	0,3	-4,29*	-	-	-	0,42	0,24	0,26	0,32
4	0,4	-5,71*	-	-	-	0,49	0,29	0,31	0,38
Okres IIa (21.04 - 20.06)									
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,23	0,17	0,23	0,13
2	0,2	-1,54	-1,82	-2,22	-2,86	0,42	0,37	0,41	0,33
3	0,3	-2,31	-2,73	-3,33*	-4,29*	0,52	0,48	0,50	0,43
4	0,4	-3,08*	-3,64*	-4,44*	-5,71*	0,61	0,58	0,59	0,53
Okres IIb (21.04 - 20.07)									
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,34	0,27	0,26	0,20
2	0,2	-1,25	-1,43	-1,67	-2,00	0,49	0,44	0,44	0,39
3	0,3	-1,88	-2,14	-2,50	-3,00	0,57	0,53	0,53	0,49
4	0,4	-2,50	-2,86	-3,33*	-4,00*	0,65	0,61	0,62	0,58
Okres III (21.04 - 31.08)									
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,39	0,34	0,31	0,26
2	0,2	-1,18	-1,25	-1,33	-1,54	0,53	0,50	0,48	0,44
3	0,3	-1,76	-1,88	-2,00	-2,31	0,61	0,58	0,56	0,53
4	0,4	-2,35	-2,50	-2,67	-3,08*	0,68	0,66	0,65	0,62
Okres IV (21.04 - 30.09)									
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,37	0,33	0,30	0,26
2	0,2	-1,33	-1,43	-1,54	-1,67	0,52	0,50	0,48	0,45
3	0,3	-2,00	-2,14	-2,31	-2,50	0,60	0,58	0,56	0,54
4	0,4	-2,67	-2,86	-3,10*	-3,33*	0,67	0,67	0,65	0,64

* - poza zakresem pomiarowym; G1, G2, G3, G4 – badane gleby

Tabela 6.5.3. Relacje sum opadów P i wartości progowych klas suszy rolniczej według CDI_w

Klasa suszy rolniczej	Wartości progowe CDI_w	P (mm) dla gleby			
		G1	G2	G3	G4
Okres I					
1	0,0	24	24	24	24
2	0,2	1	-	-	-
3	0,3	0	-	-	-
4	0,4	0	-	-	-
Okres IIa					
1	0,0	93	93	93	93
2	0,2	42	36	28	18
3	0,3	26	19	12	4
4	0,4	15	9	4	0
Okres IIb					
1	0,0	166	166	166	166
2	0,2	92	84	74	61
3	0,3	65	56	45	31
4	0,4	45	35	24	13
Okres III					
1	0,0	251	251	251	251
2	0,2	164	160	155	142
3	0,3	130	124	117	102
4	0,4	100	94	86	71
Okres IV					
1	0,0	298	298	298	298
2	0,2	194	188	181	172
3	0,3	153	145	136	126
4	0,4	118	109	98	89

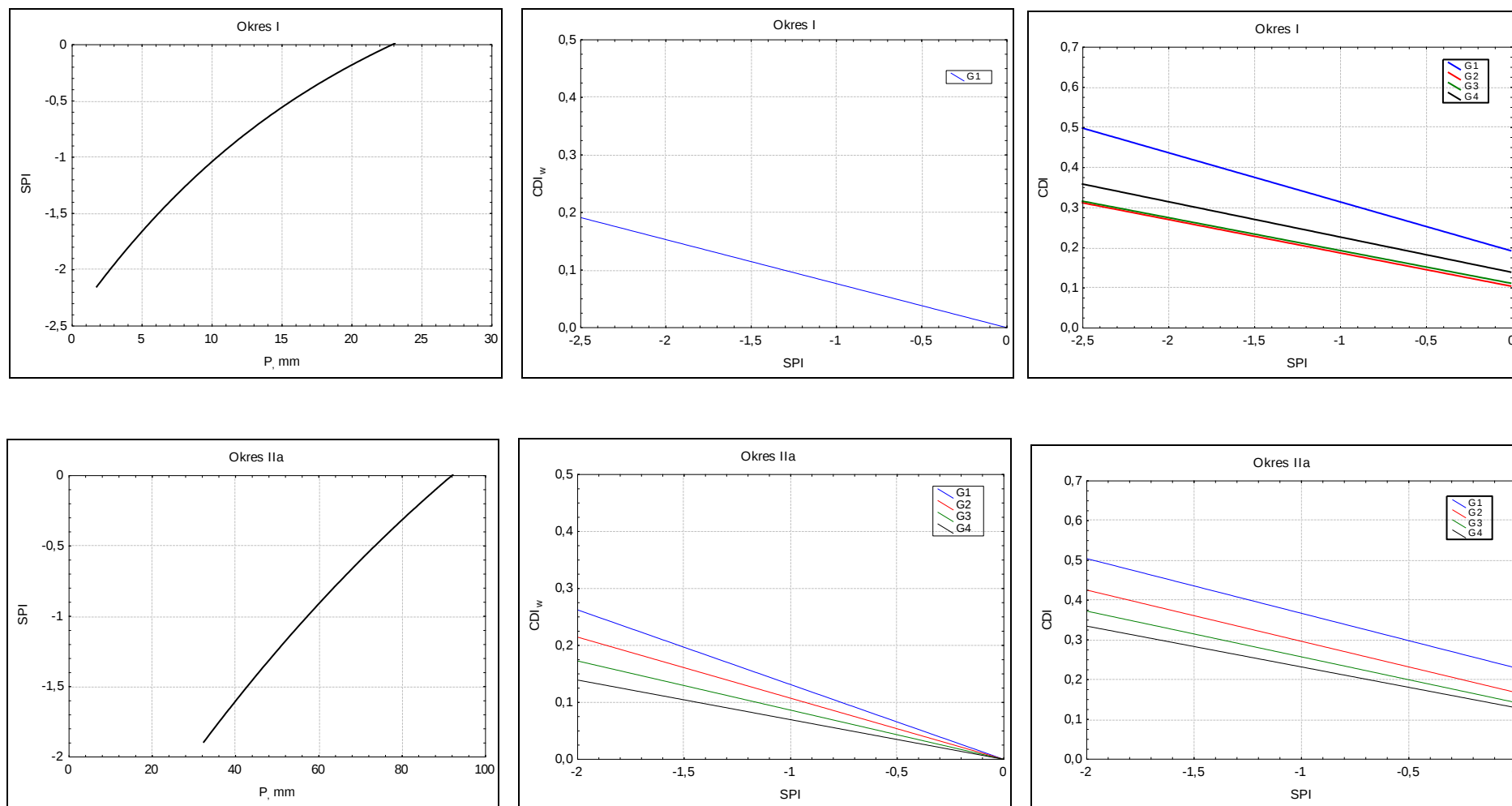
G1, G2, G3, G4 – badane gleby; '-' - zależność nieistotna

Uzyskane wzajemne relacje między wskaźnikami (tab. 6.5.2) pozwalają zastosować wskaźnik standaryzowanego opadu SPI jako wskaźnik suszy rolniczej, w odniesieniu do warunków Kujaw i uprawy buraka cukrowego. Przedstawione w tej tabeli wartości SPI , odpowiadające wartościom progowym CDI_w , różne dla różnych gleb i w różnych okresach związanych z fazami fenologicznymi, można traktować jako wartości progowe suszy rolniczej kwantyfikowanej wskaźnikiem SPI , a **wskaźnik SPI traktować jako wskaźnik suszy rolniczej i kryterium jej oceny**. Wskaźnik ten opisuje i kwantyfikuje suszę rolniczą w powiązaniu go z właściwościami retencyjnymi gleby i badanym okresem, co było przedmiotem hipotezy przyjętej w pracy, a wykazanie tego było głównym celem pracy.

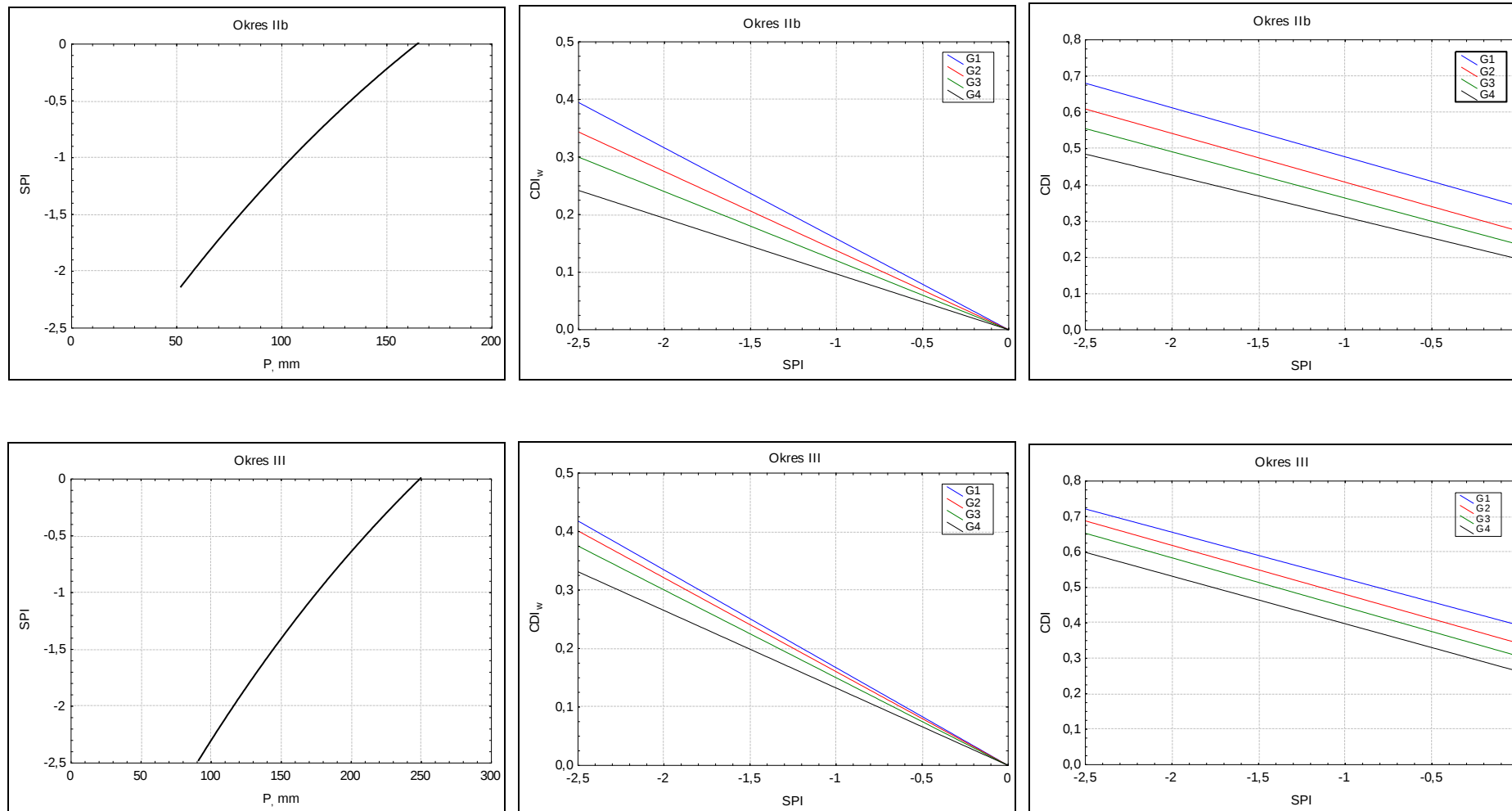
Dla praktycznego stosowania tych relacji sporządzono nomogramy (rys. 6.5.1), które pozwalają na ocenę intensywności suszy rolniczej na poszczególnych glebach i w okresach,

na podstawie zmierzonej sumy opadów P oraz wartości SPI w danym okresie. Ocenę tę można dokonać zarówno w odniesieniu do przeciętnej, jak i potencjalnej ewapotranspiracji.

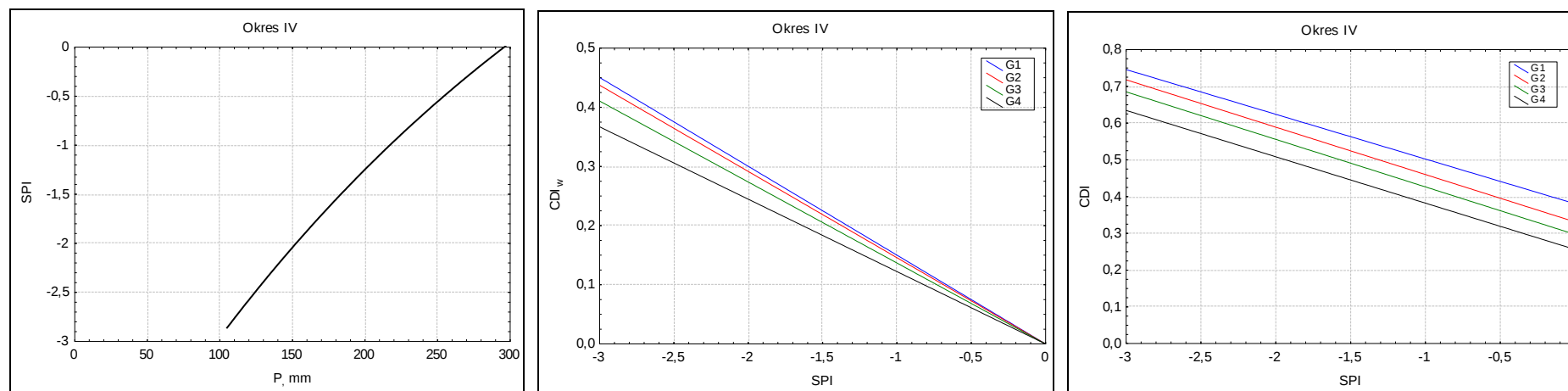
Traktując obliczone w pracy wartości CDI_w , jako wartości rzeczywiście występujące w danym roku, dokonano porównania tych wartości z wartościami odczytanymi z nomogramu (rys. 6.5.1). Uzyskane regresje liniowe i współczynniki korelacji liniowej wykazują dużą zgodność (przykładowe regresje dla gleb $G1$ i $G4$ w okresie wegetacji na rysunku (6.5.2), co wskazuje na przydatność metody oceny intensywności suszy rolniczej z wykorzystaniem opracowanych nomogramów.



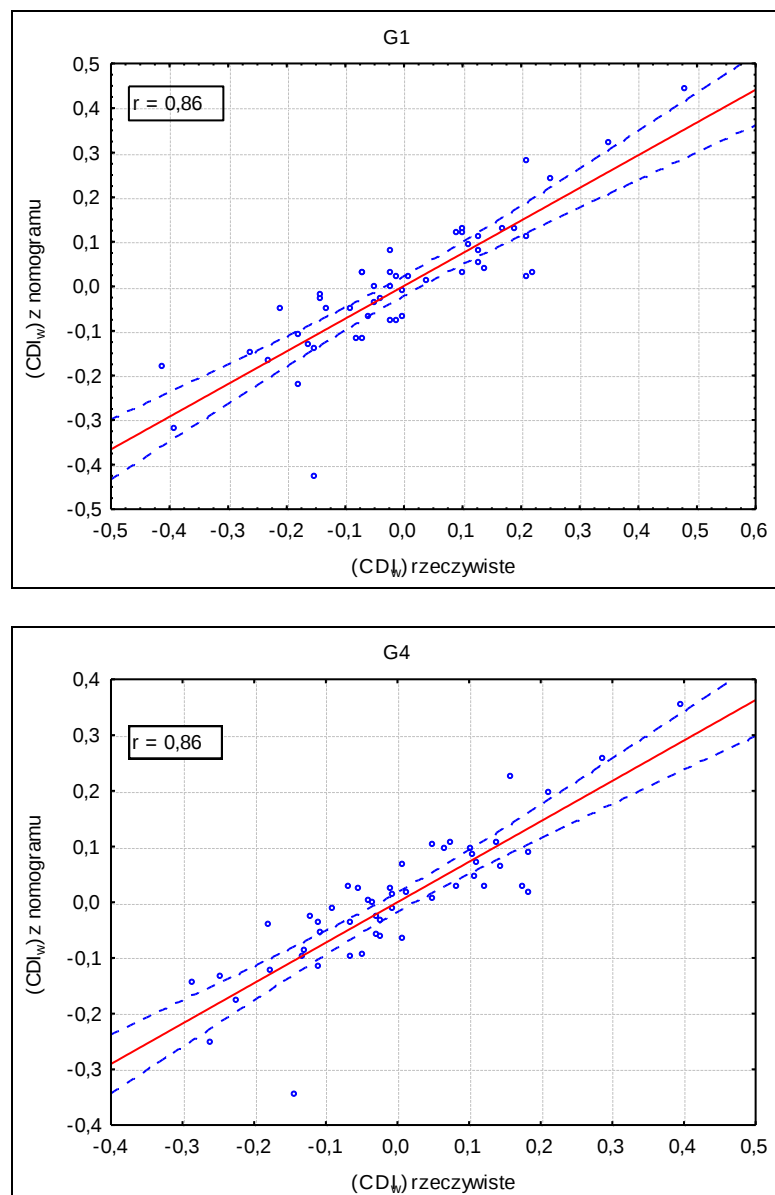
Rys. 6.5.1.a. Nomogramy do oceny intensywności suszy rolniczej na glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$ w okresach I i IIa



Rys. 6.5.1.b. Nomogramy do oceny intensywności suszy rolniczej na glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$ w okresach IIb i III



Rys. 6.5.1.c. Nomogramy do oceny intensywności suszy rolniczej na glebach $G1$, $G2$, $G3$, $G4$ w okresie IV



Rys. 6.5.2. Regresja liniowa pomiędzy wartościami rzeczywistymi CDI_w i odczytanymi z nomogramu na glebie G1 i G4 w okresie wegetacyjnym

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań nad związkami pomiędzy suszą meteorologiczną i rolniczą w warunkach uprawy buraka cukrowego na Kujawach. Roślina ta szczególnie nadaje się na przeprowadzenie takich badań, ponieważ jej długi okres wegetacji prawie pokrywa się z okresem wegetacyjnym (IV-IX), ponadto jest ona wrażliwa na deficyty wody w glebie i dobrze reaguje na nawodnienia, co zostało potwierdzone licznymi badaniami przeprowadzonymi w kraju i za granicą.

Do badań przyjęto, że okres wegetacji buraka cukrowego rozpoczyna się średnio na Kujawach 21.04, a kończy się 30.09. W okresie rozwoju badanej rośliny wyróżniono 5 okresów czasowych, powstałych przez dodanie kolejnych fazy fenologicznych buraka cukrowego. Fazy te to: I - siew i kiełkowanie (21.04 - 10.05), IIa – wschody (11.05 - 20.06), IIb - 3 para liści i początek grubienia korzeni (21.06 - 20.07), III - żółknięcie liści (21.07 - 31.08), IV – dojrzewanie i zbiór (01.09 - 30.09). W ten sposób uzyskano 5 okresów badawczych: okres I (21.04 - 10.05), okres IIa (21.04 - 20.06), okres IIb (21.04 - 20.07), okres III (21.04 - 31.08), okres IV (21.04 - 30.09).

Badanie relacji między suszą meteorologiczną i suszą rolniczą polegało na zbadaniu relacji między wskaźnikami obu rodzajów susz w podanych wyżej okresach. Suszę meteorologiczną charakteryzował wskaźnik standaryzowanego opadu *SPI* (*Standardized Precipitation Index*), który ze względu na normalizację i standaryzację ciągów pomiarowych opadu, umożliwia obiektywną i porównywalną ocenę suszy meteorologicznej w różnych warunkach klimatycznych i przedziałach czasowych. Jako wskaźniki suszy rolniczej przyjęto w pracy wielkość redukcji ewapotranspiracji w warunkach niedostatecznego uwilgotnienia gleby w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej (wskaźnik *CDI*) i w stosunku do ewapotranspiracji średniej w wieloleciu (wskaźnik *CDI_w*).

Intensywność suszy meteorologicznej obliczano w pracy dla sumowanych opadów od początku okresu wegetacji do końca kolejnej fazy fenologicznej. Jest to nowe podejście w tematyce oceny suszy meteorologicznej w kontekście jej wpływu na suszę rolniczą i nie ma odpowiednika w przeglądanej w literaturze. Obliczanie wskaźnika *SPI* dla kumulowanych sum opadów z kolejnych faz fenologicznych ma swoje uzasadnienie w tym, że powstawanie i rozwój suszy glebowej (rolniczej) jest procesem ciągłym. O intensywności suszy w danej chwili decydują zarówno bieżące warunki meteorologiczne i glebowo-wodne, jak i w poprzednim okresie. W tym kontekście proces redukcji ewapotranspiracji, oparty na modelu symulacji ewapotranspiracji i zmian zapasów wody użytecznej w glebie, był także traktowany jako proces ciągły. Model ten bazuje na metodzie bilansu wodnego warstwy korzeniowej gleby.

Do badań wykorzystano elementy meteorologiczne pomierzone na stacji Bydgoszcz-IMUZ w okresie od 1954 do 2003 r. 50-letni okres pomiarowy spełniał warunek stosowania wskaźnika *SPI*, który wymaga, aby badany ciąg opadów wynosił co najmniej 30 lat. Wskaźniki suszy rolniczej były badane w tych samych okresach, na 4 glebach (*G1*, *G2*, *G3*, *G4*) występujących na Kujawach Czarnych o zróżnicowanych zapasach wody użytecznej,

wynoszących w 1-metrowym profilu glebowym 103, 137, 165 i 203 mm. Za pomocą odpowiednich testów statystycznych wykazano w pracy, że warunki opadowe na stacji Bydgoszcz-IMUZ i ewapotranspiracji wskaźnikowej ET_o są także reprezentatywne dla Kujaw Czarnych.

Na podstawie danych opadowych stwierdzono, że w ponad połowie okresów wegetacji buraka cukrowego wielolecia 1954-2003 zanotowano sumy opadów mniejsze od średniej z wielolecia wynoszącej 307 mm. Minimalną sumę opadów zanotowano w 1989 r - 105 mm. Współczynnik zmienności opadów wynosił w okresie wegetacji około 30%, co potwierdziło fakt, że Bydgoszcz leży na obszarze charakteryzującym się największą zmiennością opadów w Polsce.

W tych samych okresach, w których analizowano sumy opadów P , badano zmienność ewapotranspiracji rzeczywistej ET i ewapotranspiracji potencjalnej ET_p . Stwierdzono, że w okresie wegetacji średnie wieloletnie sumy ET na poszczególnych glebach wynosiły: 319 mm na glebie $G1$, 345 mm – $G2$, 363 mm – $G3$, 384 mm – $G4$, a ewapotranspiracji potencjalnej ET_p - 523 mm. Przyjęto założenie, że ewapotranspiracja w zakresie wody łatwo dostępnej w glebie nie zależy od wilgotności gleby i jest równa ewapotranspiracji potencjalnej ($ET = ET_p$), stąd ewapotranspiracja potencjalna była taka sama na każdej glebie, ale inna w każdym roku. Otrzymane wyniki dotyczące sum opadów i ewapotranspiracji oraz ich zmienności w badanym wieloleciu są zgodne z wykazanymi przez innych autorów.

W przeciętnych warunkach meteorologicznych na Kujawach, gdy średni deficyt opadów w okresie wegetacji w stosunku do ewapotranspiracji potencjalnej ($P - ET_p$) wynosił 216 mm, dominowała zależność $ET < ET_p$. Tylko 4 razy w całym 50-letnim okresie badawczym i tylko na glebie $G4$ o największym zapasie wody użytecznej, suma ewapotranspiracji rzeczywistej w okresie wegetacji była równa ewapotranspiracji potencjalnej ($ET = ET_p$). Stąd pojawił się wniosek, że ewapotranspiracja potencjalna nie charakteryzowała przeciętnych warunków rozwoju buraka cukrowego na Kujawach i że analizę redukcji ewapotranspiracji należy również prowadzić w odniesieniu do warunków przeciętnych, charakteryzowanych przez średnią wielkość zużycia wody przez rośliny w wieloleciu (ET_{sr}), a nie pod kątem tylko potencjalnych możliwości uzyskiwania wysokich plonów i ewapotranspiracji potencjalnej (ET_p). Badanie to potwierdziło również podawany przez innych autorów fakt, że w przeciętnych warunkach opadowych na Kujawach w okresie wegetacji nie ma możliwości uzyskiwania wysokich plonów bez nawodnień.

Badanie zmienności wskaźnika *SPI* w wieloleciu wykazało, że w oparciu o powszechnie stosowaną klasyfikację, łącznie najwięcej susz meteorologicznych zanotowano w okresie I i stanowiły one 20% badanego wielolecia. W następnych okresach susz było coraz mniej: w okresie IIb - 18%, IIa - 16%, III - 14%, IV - 8%. W badanym wieloleciu nie stwierdzono suszy ekstremalnej (*D3*) w okresie IIa, w pozostałych okresach pojawiały się one 1-2 razy w całym wieloleciu. Najczęściej pojawiały się susze umiarkowane (*D1*), zwłaszcza w okresie I i IIb. Rozkład częstości wskaźnika pokazał dużą ilość nieklasyfikowanych łagodnych susz meteorologicznych ($0 < SPI < -1,0$), po ich uwzględnieniu ogólny udział susz meteorologicznych wzrósł do 52% w okresie I, III i IV, oraz 50% w okresie IIa i IIb.

Badania wskaźnika suszy rolniczej *CDI* pokazały, że wielkość redukcji ewapotranspiracji zależała od opadów i zdolności retencjonowania wody w glebie. Na początku wegetacji rośliny, istotną rolę odgrywają zapasy wody pozimowej i bilansowanie kolejnych warstw gleby, mniejszy jest natomiast udział transpiracji, ponieważ w tym czasie rośliny nie są jeszcze wykształcone. W kolejnych okresach, na wielkość redukcji ewapotranspiracji coraz większy ma wpływ zdolność gleby do retencjonowania wody. Na glebach o mniejszych zapasach wody użytecznej prowadzi to do szybszego wyczerpywania się wody łatwo dostępnej, czego efektem jest przyspieszone przesuszanie się gleby, większa redukcja ewapotranspiracji, a w konsekwencji wzrost intensywności suszy rolniczej. Stwierdzono, że na glebie o najsłabszej zdolności do retencjonowania wody, wartość wskaźnika *CDI* była największa w kolejnych badanych okresach. Rozkład częstości suszy rolniczej pokazał, że w kolejnych badanych okresach wzrastała systematycznie częstotliwość wszystkich susz. W okresie I wynosiła ona 65%, w okresie IIa – 85%, w okresie IIb – 96%, w okresie III – 98% i w okresie IV – 99%.

Stwierdzono występowanie prawidłowości polegającej na tym, że w każdym okresie badawczym na glebach o mniejszych zapasach wody użytecznej *ZWU* jest mniej susz słabych, a więcej silnych; na glebach o większym *ZWU* - odwrotnie. Zagrożenie silną suszą rolniczą, opisaną wskaźnikiem *CDI*, jest większe na glebach o mniejszych zdolnościach retencyjnych, a słabszą suszą na glebach o większych *ZWU*. W praktyce rolniczej oznacza to, że im większa wartość *CDI*, tym można przewidywać większą redukcję plonów.

Wartości wskaźnika CDI_w obliczano dla tych samych czterech gleb i w tych samych okresach, w których analizowano zmienność wskaźnika *CDI*. Wskaźnik CDI_w przyjmował zarówno dodatnie, jak i ujemne wartości. Badanie suszy rolniczej przeprowadzono w okresach, kiedy $CDI_w > 0$, co oznacza $ET < ET_{sr}$. Są to warunki, kiedy ewapotranspiracja

rzeczywista była mniejsza od średniej ewapotranspiracji w wieloleciu, czyli od ewapotranspiracji odpowiadającej przeciętnym warunkom na Kujawach.

Stwierdzono, że maksymalne wartości wskaźnika CDI_w w poszczególnych okresach, czyli najbardziej intensywna susza rolnicza opisywana tym wskaźnikiem, pojawiała się jednocześnie na wszystkich badanych glebach w tym samym roku. Ponadto stwierdzono, że wartości CDI_w również zależą w dużym stopniu od zdolności retencyjnych gleby. Maksymalna redukcja ewapotranspiracji w stosunku do średniej z wielolecia w kolejnych okresach była zawsze większa na glebie o najmniejszych zapasach wody użytecznej. Maksimum osiągnęła w okresie III, który obejmuje fazę III o największych potrzebach wodnych buraka cukrowego.

Analiza częstości wskaźnika CDI_w pokazała, że łączna ilość susz rolniczych wyznaczonych w odniesieniu do średniej ewapotranspiracji w wieloleciu była prawie dwukrotnie mniejsza od ilości susz rolniczych wyznaczonych w odniesieniu do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji. W poszczególnych okresach i na glebach stosunek ten zmieniał się. Ponadto stwierdzono, że na tych samych glebach i w tych samych okresach wskaźniki CDI i CDI_w różnią się wartością, współczynnikiem zmienności i rozkładem częstości. W związku z tym każdy z nich, w zależności od przyjętej definicji suszy rolniczej, daje inną ocenę suszy rolniczej.

W celu określenia, jakie są wzajemne relacje pomiędzy intensywnością suszy rolniczej w odniesieniu do potencjalnych możliwości ewapotranspiracji na uprawie buraka cukrowego na Kujawach (wskaźnik CDI), a intensywnością suszy rolniczej w odniesieniu do średniej ewapotranspiracji w danym okresie (wskaźnik CDI_w), wyznaczono odpowiednie równania regresji liniowej wartości obu wskaźników. W poszczególnych okresach, przy tej samej wartości wskaźnika CDI_w , stwierdzono zróżnicowanie intensywności suszy rolniczej według wskaźnika CDI na badanych glebach.

Najważniejszym zadaniem w tej pracy było zbadanie związków między wskaźnikiem standaryzowanego opadu SPI jako wskaźnikiem suszy meteorologicznej oraz wskaźnikami suszy rolniczej CDI i CDI_w . Siłę i istotność tych związków oceniono za pomocą analizy statystycznej (współczynniki korelacji liniowej i równania regresji liniowej SPI i CDI oraz SPI i CDI_w). Podobnie jak w przypadku poprzednich analiz wymienionych wskaźników, również wzajemne relacje między nimi przeprowadzono w każdym z przyjętych w pracy okresów związanych z fazami fenologicznymi.

Ujemne wartości współczynników korelacji wartości wskaźników *SPI* i *CDI* oraz *SPI* i *CDI_w* w okresach świadczyły, że zmniejszenie sumy opadów w badanym okresie powodowało spadek wartości wskaźnika suszy meteorologicznej *SPI* i wzrost redukcji ewapotranspiracji, a tym samym wzrost wskaźników suszy rolniczej *CDI* i *CDI_w*. Najslabsze zależności między suszą meteorologiczną i suszą rolniczą obserwowano w początkowej fazie rozwoju rośliny (okres I), przy czym w przypadku wskaźnika *CDI_w* istotny statystycznie związek z *SPI* stwierdzono tylko na glebie *G1*. W przypadku wskaźników *SPI* i *CDI* największą wartość współczynnika korelacji i prawie równą na wszystkich glebach zanotowano w okresie III ($r = -0,88$). Prawie taką samą wartość zanotowano w okresie IV ($r = -0,87$). Podobnie wysokie wartości współczynnika korelacji ($r = -0,87$) obserwowano w tych samych okresach dla relacji wskaźników *SPI* i *CDI_w*.

Badania pokazały, że susza rolnicza opisana wskaźnikiem $CDI > 0$ rozpoczynała się na wszystkich badanych glebach i we wszystkich okresach już w zakresie dodatnich wartości *SPI*. Jest to spowodowane faktem, że wskaźnik *CDI* jest odniesiony do ewapotranspiracji potencjalnej. W przypadku wskaźnika *CDI_w* stwierdzono, że początek redukcji ewapotranspiracji odnoszącej się do średnich wielkości ewapotranspiracji w wieloleciu na każdej glebie i w każdym okresie rozpoczynał się przy $SPI = 0$. Tak więc każdej meteorologicznej suszy łagodnej i silniejszej towarzyszyła susza rolnicza, której intensywność jest skwantyfikowana wartością wskaźnika *CDI_w*. Zależność ta, jak i rozkład częstości wartości wskaźników *SPI* i *CDI_w*, były powodem zaproponowania klasyfikacji susz rolniczych oraz zmodyfikowania dotychczas stosowanej klasyfikacji susz meteorologicznych. Na podstawie wykazanych zależności liniowych między wskaźnikami *SPI* i *CDI_w*, przyjmując za wartości progowe klas suszy rolniczej wartości $CDI_w = 0,2; 0,3; 0,4$, obliczono odpowiadające im wartości wskaźnika *SPI*, które są jednocześnie wartościami progowymi suszy meteorologicznej powodującej taki poziom redukcji ewapotranspiracji w stosunku do średniej ewapotranspiracji wielolecia. Wartości *SPI*, odpowiadające wartościom progowym *CDI_w*, są różne dla różnych gleb i w różnych okresach związanych z fazami fenologicznymi, ponieważ są powiązane z właściwościami retencyjnymi gleby i badanym okresem.

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. W warunkach klimatycznych Kujaw obserwuje się dużą częstotliwość łagodnych susz meteorologicznych, których nie obejmuje dotychczas stosowana klasyfikacja susz meteorologicznych według wskaźnika *SPI*. Uzasadnia to wprowadzenie do tej klasyfikacji klasy suszy kwantyfikowanej wartościami $-1,0 < SPI < 0$.
2. Analizy wskaźników suszy rolniczej *CDI* i *CDI_w* przeprowadzone w pracy wskazują, że w warunkach Kujaw zasadne jest odnoszenie suszy rolniczej do przeciętnych warunków ewapotranspiracji buraka cukrowego, a nie do potencjalnych możliwości parowania. Klimat Kujaw nie zapewnia opadów wymaganych dla wysoko plonujących buraków cukrowych, a jeśli już się one pojawiają, to w krótkim okresie czasu i z bardzo małą częstotliwością.
3. Wskaźniki *CDI* i *CDI_w* różnią się wartościami, współczynnikiem zmienności i rozkładem częstości na tych samych glebach i w tych samych okresach. W związku z tym każdy z nich, w zależności od przyjętej definicji suszy rolniczej, daje inną ocenę suszy rolniczej.
4. Istnieje duża zależność między suszą meteorologiczną i rolniczą, opisanymi tymi wskaźnikami. Siła tych zależności systematycznie wzrasta w miarę wydłużania okresu o kolejne fazy fenologiczne i osiąga maksimum ($r = -0,87$) w okresie, który obejmuje fazę o największym zapotrzebowaniu rośliny na wodę.
5. Susza rolnicza według wskaźnika *CDI_w* powstaje, gdy pojawia się łagodna susza meteorologiczna ($SPI = 0$). To wspólne kryterium początku obu susz, wyznaczone zależności między wskaźnikami *SPI* i *CDI_w*, jak również rozkład częstości wartości *CDI_w*, pozwoliły wprowadzić 4 stopniową klasyfikację susz rolniczych w oparciu o wartości wskaźnika *CDI_w*.
6. Wzajemne relacje między wskaźnikami pokazują możliwość zastosowania wskaźnika standaryzowanego opadu *SPI* do diagnozowania i klasyfikacji suszy rolniczej, w odniesieniu do warunków Kujaw i uprawy buraka cukrowego. Wskaźnik ten opisuje i kwantyfikuje suszę rolniczą w powiązaniu go z właściwościami retencyjnymi gleby i fazami fenologicznymi.

8. LITERATURA

- AGNEW C.T., 1999-2000. Using the SPI to Identify Drought. Drought Network News. Vol. 12 No. 1. s. 6-11.
- ALLEN R.G., JENSEN M.E., WRIGHT J.L., BURMAN R.D., 1989. Operational estimate of reference evapotranspiration. *Argon. J.* vol. 81 s. 650-662.
- ALLEN R.G., SMITH M., PEREIRA L.S., PERRIER A., 1994a. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* vol. 43, nr 2 s. 35-92.
- ALLEN R.G., SMITH M., PERRIER A., PEREIRA L.S., 1994b. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* vol. 43, nr 2 s. 1-34.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage* no. 56 ss. 300.
- ALLEY W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. *J. of Clim. and Appl. Meteo.* Vol. 23 Issue 7, s. 1100-1109.
- BAC S. (red.) 1982. *Agroklimatyczne podstawy melioracji rolnych w Polsce*. Warszawa: PWRiL, ss. 315.
- BAC S., KOŹMIŃSKI C., ROJEK M., 1993. *Agrometeorologia*. Warszawa: PWN ss. 250.
- BĄK B., 2004. Warunki klimatyczne Wielkopolski i Kujaw. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie Zesz. Specj.* Nr 9 s. 14-38.
- BĄK B., ŁABĘDZKI L., 2002. Assessing drought severity with the relative precipitation index (*RPI*) and the standardized precipitation index (*SPI*). *J. Water Land Develop.* no. 6 s. 89-105.
- BĄK B., ŁABĘDZKI L., 2004. Monitorowanie suszy w okresie dekadowym metodą wskaźnika *SPI* i prognozowanie dalszego jej rozwoju. W: *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego*. Red. Nauk. M. Kejna, J. Uscka. *Bibl. Monitoringu Środowiska* s. 77-83.
- BELMANS C., WESSELING J.G., FEDDES R.A., 1983. Simulation model of the water balance for a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.* no 63. s. 271-286.
- BIĘNKIEWICZ P., ROGUSKI W., ŁABĘDZKI L. 1983a. Wilgotność krytyczna dla traw w profilach gleb hydrogenicznych. *Wiad. IMUZ* t. 15 z. 1 s. 59-73.
- BOBIŃSKI E., MEYER W., 1992a. Susza w Polsce w latach 1982-1992. Ocena hydrologiczna. *Wiad. IMGW.* t. XV z. 4 s. 3-23.
- BOBIŃSKI E., MEYER W., 1992b. Susza hydrologiczna w Polsce w latach 1989-1992 na tle wielolecia 1982-1992. *Gospodarka wodna*, nr. 12, s. 267-277.

- BOKEN V.K., 2005. Agricultural Drought and Its Monitoring and Prediction: Some Concepts. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. A Global Study. Oxford Univ. s. 3-10.
- BOKEN V.K.; CRACKNELL A.P.; HEATCOTE R.L. 2005. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. A Global Study. Oxford Univ. ss. 450.
- BRANDYK T., 1990. Podstawy regulowania uwilgotnienia gleb dolinowych. Warszawa: Wydaw. SGGW-AR, Rozpr. Nauk. i Monogr. ss. 120.
- BRUNINI O., PINTO H. S., ZULLO JR J., BARBANO M.T., CAMARGO M.B.P., ALFONSI R.R., BLAIN G.C., PEDRO JR M.J., PELLEGRINO G.Q., 2000. Drought Quantification and Preparedness in Brazil – The Example of São Paulo State. Expert Group Meeting on Early Warning Systems For Drought Preparedness and Drought Management, Part II, Lisbon, Portugal, s. 101-117.
- BRUNINI O., DA SILVA DIAS P., GRIMM A.M., ASSAD E.D., BOKEN V.K., 2005. Agricultural Drought Phenomenon in Latin America with Focus on Brazil. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. A Global Study. Oxford Univ. s. 157-168.
- BYCZKOWSKI A., MEYER W., 1999. Objective criteria of hydrological droughts evaluation. Roczn. AR. Poznań, CCCX, s. 369-381.
- BYCZKOWSKI A., MEYER W., 2001. Hydrological drought: objective criteria of its evaluation. Proc. 19th Regional Conference of ICID. Brno-Prague, 4-8 June 2001.
- CANARACHE A., DUMITRU S., 2000. Impact Of Soil/Land Properties On The Effects Of Drought And On Soil Rating. Proceedings Of The Central And Eastern Workshop On Drought Mitigation. Budapest. 12-15 April 2000. s. 135-142.
- CHOMICZ K., 1976. Opady rzeczywiste w Polsce (1931-60). Przegl. Geof. R. XXI (XXXIX) z.1. s. 19-25.
- CIOŁKOSZ A., PODLACHA K., OSTROWSKI J., 2004. Zastosowania teledetekcji i kartografii w badaniach obszarów wiejskich. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 4, Zesz. Nr. 2a (11), s. 157-173.
- CZAPLAK I., 1996. Posucha 1992 roku w Polsce, a ogólne prawidłowości rozkładu dni bezopadowych. Wiadomości IMUZ. t. XVIII z. 4 s. 85-93.
- DEMIDOWICZ G., DOROSZEWSKI A., GÓRSKI T., 1996. Wpływ niedoboru opadów na straty w produkcji ziemniaka i buraka cukrowego. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 438 s. 43-52.
- DOBZJAŃSKI B. (red.), ZAWADZKI S. (red.), 1995. Gleboznawstwo. Podręcznik dla studentów akademii rolniczych. Warszawa, PWRiL, ss. 562.
- DOORENBOS J., KASSAM A.H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper no.

33. Rome: FAO ss. 176.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper no. 24. Rome: FAO ss. 156.
- DOWNING T.E., BAKKER K., 2000. Drought Risk in a Changing Environment. Kluwer Academic Publishers, s. 79–90.
- DRUPKA S., 1976. Techniczna i rolnicza eksploatacja deszczowni. Warszawa: PWRiL. ss 310.
- DRUPKA S., GRUSZKA J., 1974. Znaczenie deszczowania w uprawie buraków cukrowych. Biul. Inst. Hod. i Akl. Rośl., nr. 3-4.
- DRUPKA S., KUŹNIAR A., 1989. Zależność plonu od ewapotranspiracji rzeczywistej przy niepełnym pokryciu niedoborów wody glebowej w warunkach ograniczonych zasobów wody do nawodnień. Załącznik do Instrukcji wyznaczania potrzeb i niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych. Falenty: IMUZ.
- DRUPKA S., KRYŃSKA D., KUŹNIAR A., 1997. Klimatyczno-rolnicze kryteria oceny potrzeb nawadniania w Polsce. Konf. Nauk.-Techn. Woda jako czynnik warunkujący wielofunkcyjny i zrównoważony rozwój wsi i rolnictwa. Falenty, 19-21.11.1997, s. 9-18.
- Drought Preparedness Planning. 2005. <http://www.drought.unl.edu/plan/plan.htm>.
- DUMITRU M., MUNTANEU I., 2000. Desertification and Drought Control in Romania. Resear. Inst. For Soil & Agrochem., Bucharest.
- DZIEŻYC J. (red)., 1989. Potrzeby wodne roślin uprawnych. Praca zbiorowa. PWN. Warszawa. s. 419.
- DZIEŻYC J. (red)., 1993. Czynniki plonotwórcze - plonowanie roślin. Praca zbiorowa. PWN. Warszawa-Wrocław, ss. 476.
- FARAT R., KĘPIŃSKA-KASPRZAK M., MAGER P., 1994. Susze w Polsce w latach 1951-1990. Gospodarka Wodna, nr 10, s. 229-231.
- FEDDES R.A., LENSELNIK K.J., 1994. Evapotranspiration W: Drainage Principles and Applications. Praca zbiorcza pod redakcją H.P. Rizemy. ILRI Publikation no. 16 Wageningen s.145-173.
- FEDDES R.A., KOWALIK P., ZARADNY H., 1978, Simulation of Field Water Use and Crop Yield, Mon. Wageningen: PUDOC, ss. 189.
- GĄSOWSKI A., OSTROWSKA D., 1993. Klucz do oznaczania stadiów rozwojowych niektórych gatunków roślin rolniczych. Wyd. SGGW. Warszawa, ss. 52.
- GENERAL ASSEMBLY UN, 1994. <http://www.un.org/documents/ga/res/49/a49r115.htm>; <http://www.unic.un.org.pl/kalendarium/obchody.php#srodowisko>.

- GRUSZKA J., 1996. Produkcyjne i ekonomiczne efekty deszczowania roślin pastewnych i pastwisk w rejonie Kujaw. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 438 s. 111-116.
- GUTTMAN N.B., 1998. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. Jour. Amer. Water Resours. Assoc. Vol. 34 no. 1 s. 113-121.
- GUTTMAN N. B., 1999: Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm. J. Amer. Water Resour. Assoc., 35(2), s. 311-322.
- How to work out a drought mitigation strategy. An ICID Guide. 1998. DVWK Guidelines nr 309. ss. 39
- IEM, 2005. IOWA ENVIRONMENTAL MESONET, <http://www.mesonet.agron.iastate.edu>.
- IGWMC, 2005. International Ground Water Modeling Center. <http://typhoon.mines.edu/>.
- IGRAS J., JANKOWIAK J., 1998. Zależność pomiędzy polowym zużyciem wody, ewapotranspiracją potencjalną i plonowaniem wybranych gatunków roślin. Fragmenta Agronomica 1998 (XV), Nr 2(58), ss. 87-93.
- JRC, Join Research Center. 2004. <http://ies.jrc.cec.eu>.
- KABAT P., BROEK VAN DEN B. J., FEDDES R.A., 1992. SWACROP: a water management and crop production simulation model. ICID Bull. vol. 41. no. 2 s. 61-84.
- KACA E., STĄPEL Z., ŚNIADOWSKI Z. 1993. Gospodarka wodna w rolnictwie w świetle suszy 1992 roku. Mat. Inf. IMUZ nr 22 ss. 55.
- KACZMAREK Z., 1970. Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii. Wyd. Komunik. i Łączn. Warszawa ss. 312.
- KACZOROWSKA Z., 1962. Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. Polska Akademia Nauk. Instytut Geografii. Prace Geograficzne Nr 33. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne. ss. 109.
- KALBARCZYK E., KALBARCZYK R., 2005. Identyfikacja okresów suszy atmosferycznej w okolicy Szczecina w latach 1963-2002. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie t.5 Zesz. Spec. (14), s. 171-183.
- KASPERSKA W., 1996. Warunki meteorologiczne w Bydgoszczy. W: Środowisko przyrodnicze Bydgoszczy. Pr. zbior. red. J. Banaszak. Bydgoszcz: Wyd. TANAN, s. 66-72.
- KASPERSKA-WOŁOWICZ W., ŁABĘDZKI L., BĄK B., 2003. Okresy posuszne w rejonie Bydgoszczy. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie Zesz. Specj. Nr 9 s. 39-48.
- KASPERSKA-WOŁOWICZ W., ŁABĘDZKI L., 2004. Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski. Woda-Środowisko-

- Obszary Wiejskie t.4 Zesz. 2a (11), s. 123-136.
- KĘDZIORA A., 1995. Podstawy agrometeorologii. PWRiL. Poznań, ss. 264.
- KĘDZIORA A., 2005. Przyrodnicze podstawy gospodarowania wodą w Polsce. W: Ochrona środowiska w gospodarce przestrzennej. Pr. zbior. red. L. Ryszkowski i A. Kędziora. Poznań, Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN, s. 75-113.
- KLESCHENKO A.D., ZOIDZE E. K., BOKEN V.K., 2005. Monitoring Agricultural Drought in Russia. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. A Global Study. Oxford Univ. s. 196-207.
- KOBIERSKI M., DĄBKOWSKA-NASKRĘT H., 2003. Skład mineralogiczny i wybrane właściwości fizykochemiczne zróżnicowanych typologicznie gleb Równiny Inowrocławskiej. Cz. I. Morfologia oraz właściwości fizyczne wybranych gleb. Roczn. Glebozn., Warszawa, t. LIV nr 4, s. 17-27.
- KOBUS P., PIETRZYKOWSKI R., ZIELIŃSKI W., 2001. Statystyka z pakietem *STATISTICA*. Fund. Rozwój SGGW, Warszawa. ss. 100.
- KONOPKO S., 1988. Częstotliwość występowania okresów posusznych w rejonie Bydgoszczy na podstawie wieloletnich obserwacji. Wiad. IMUZ t. 15 z. 4 s. 103-113.
- KOROHODA W., 1985. Pobieranie i transport wody u roślin. W: Fizjologia roślin. Pr. zbior. pod red. J. Zurzyckiego i M. Michniewicza. Warszawa: PWRiL s. 410-428.
- KOWALIK P., 1973. Zarys fizyki gruntów. Wydaw. Polit. Gdań. ss. 130.
- KOWALIK P., 1989. Relacja między zaopatrzeniem roślin w wodę a plonem roślin. W: Potrzeby wodne roślin uprawnych. Pr. zbior. pod red. J. Dzieżyca. Warszawa: PWN s. 36-49.
- KOŹMIŃSKI C., 1983. Agroklimat województwa szczecińskiego. Szczec. Tow. Nauk. Wydz. Nauk Przyr.-Rol. t. 1. Szczecin ss. 194.
- KOŹMIŃSKI C., 1986. Przestrzenny i czasowy rozkład okresów bezopadowych trwających ponad 15 dni na terenie Polski. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 268 s. 17-36.
- KOŹUCHOWSKI K., 2004. Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w XX i XXI wieku. Praca zbiorowa pod red. Krzysztofa Kożuchowskiego. Zakład Dynamiki Środowiska i Bioklimatologii Uniwersytetu Łódzkiego. Łódź. s. 47-57.
- KOŹUCHOWSKI K., ŻMUDZKA E., 2001. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. Przegl. Geof. R. XXI (XLVI) z.1-2. s. 81-90.
- KULANDAIVELU R., JAYACHANDRAN K., 1994. Drought Classifications and Crop Plans

- Developed for Tamilnadu. Drought Network News. Adobe's web site, <http://www.drought.unl.edu/pubs/dnn/dnnarchive.htm>.
- KUŹNIAR A., 2001. Wpływ retencyjności wodnej gleb na niedobory wodne roślin uprawnych. Mat. Semin. nr 47 IMUZ Falenty s. 54-64.
- KUŹNIAR A., TWARDY S., KOSTUCH M., 2001. An evaluation of the drought in Poland using soil-water balance methods. International Commission on Irrigation and Drainage, 19th European Regional Conference, 4-8 June 2001, Brno and Prague, the Czech Republic.
- LOMAS J., 2000. Drought Mitigation Strategies – A Dynamic Approach. Kluwer Academic Publishers, Natural Hazards 25, s. 247–252.
- LLOYD-HUGHES B., SAUNDERS A., 2002. A Drought Climatology for Europe. Int. J. Climatol. 22, s. 1571-2002.
- LORENC H., GĄSIOROWSKA E., LASKOWSKA A., STRZELCZAK A., ŻÓRAWSKA K., 2000. Initial Assessment of the Drought in 2000. Internation.Conf. Present and Future Requirements for Agrometeorological Information. Poznań, 11-15.09.2000, s. 14-27.
- ŁABĘDZKI L., 1988. Model matematyczny krótkoterminowej prognozy zapotrzebowania wody do nawodnień. 1988. Pr. dokt. maszyn. Falenty: IMUZ ss.138.
- ŁABĘDZKI L. 1990a. Model krótkoterminowej prognozy potrzeb nawadniania. Opracowanie tematu CPBR 10.8.7.1.B.13. Falenty: IMUZ maszyn.
- ŁABĘDZKI L., 1990b. Niedobory wodne użytków zielonych w różnych rejonach północnej Polski. Zeszyty Prob. Postęp. Nauk Roln. PAN, z. 387. s. 159-163.
- ŁABĘDZKI L., 1992. Susza w Europie i jej wpływ na plony w świetle 16-tej Europejskiej Konferencji Regionalnej ICID Budapeszt 1992. Biul. Inf. Melioracje Rolne nr 1/2 s. 11-14.
- ŁABĘDZKI L. 1995., Ewapotranspiracja upraw rolniczych. Opracowanie końcowe badań grantu KBN nr 5 S308 025 04 "Gospodarowanie wodą na obiektach nawadnianych z wykorzystaniem modeli matematycznych" cz. 1. Falenty: IMUZ maszyn.
- ŁABĘDZKI L. 1996., Potrzeby wodne i redukcja plonu roślin przy ograniczonych zasobach wody do nawodnień. Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW z. 10 s. 311-318.
- ŁABĘDZKI L., 1997. Potrzeby nawadniania użytków zielonych – uwarunkowania przyrodnicze i prognozowanie. Rozpr. Habil. Falenty: IMUZ ss. 121.
- ŁABĘDZKI L., 2000. Ocena zagrożenia suszą w regionie bydgosko-kujawskim przy użyciu wskaźnika standaryzowanego opadu (SPI). Wiad. Mel. i Łąk. t. 43 nr 3 s. 102-103.

- ŁABĘDZKI L., BĄK B. 2002. Monitoring suszy za pomocą wskaźnika standaryzowanego opadu. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 2 z. 2(5) s. 9-19.
- ŁABĘDZKI L., BĄK B., 2004a. Metodyka monitorowania i oceny suszy na obszarach rolniczych. Raport naukowy. Falenty: IMUZ maszyn., s. 48.
- ŁABĘDZKI L., BĄK B., 2004b. Zróżnicowanie wskaźnika suszy *SPI* w okresie wegetacji w Polsce. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie t. 4 z. 2a (11) s. 111-122.
- ŁABĘDZKI L., ROGUSKI W., 2001. Wpływ zużycia wody przez rośliny uprawne na wyczerpanie retencji wodnej gleb w rejonie Bydgoszczy. Konf. Naukowa „Produkcyjne zużycie wody przez agrocenozy i jego wpływ na środowisko wodno-glebowe”, Jaworki 24-25.04.2001. Mat. Semin., IMUZ Falenty, nr 47, s. 75-83.
- ŁYKOWSKI B., 1986. Wskaźnik suchości klimatu P-E w nowym ujęciu. Problematyka melioracji w nauczaniu i badaniach naukowych. Warszawa: Wydaw. SGGW s. 59-68.
- MAGER P., KUŹNICKA M., KĘPIŃSKA-KASPRZAK M., FARAT R., 1999. Zmiany natężenia i częstości pojawiania się susz w Polsce (1891-1995). Ogólnopol. Konf. Nauk. Zmiany i zmienność klimatu Polski. Łódź, s. 159-164.
- MARACCHI G., 2000. Agricultural Drought – A Practical Approach to Definition, Assessment and Mitigation Strategies. Kluwer Academic Publishers, Natural Hazards 25, s. 247–252.
- MARCILONEK S., 1978. Zmienność zapasów wody w glebie w okresie wegetacji. Zeszyty Probl. Post. Nauk Roln., z. 205, s.103-114
- MARCILONEK S., KOSTRZEWA S., PŁYWACZYK A., 1980. Oddziaływanie drenowania na stosunki wodne gleb ornych średnio zwięzłych w latach 1970-1978. Zesz. Nauk. AR Wroc. Melior. z. 23 nr 128 s. 81-84.
- MIATKOWSKI Z., 1986. Oddziaływanie zabiegów agromelioracyjnych na stosunki wodne i właściwości fizyczne czarnoziemów kujawskich czarnych ziem gniewskich. Rozprawa dokt. Maszyn. MUZ Falenty, ss. 106.
- MCKEE T.B., DOESKEN N.J., KLEIST J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proc. of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California, s. 179-184.
- Miesięczny Przegląd Agrometeorologiczny. 1992. IMGW. Warszawa.
- MILLER D., TAYLOR S.E., ARMITT R., W., TODEY D., SHERMANN P.J., 2003. Displaying an Aridity Index as Tool for Mid-season evaluation of Midwest Corn Yield. 19th Conference on International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology. 9-13 February 2003, Long

- Beach, California. P1.7. ss. 11.
- MOSIEJ J., 1994. The relationship between relative grassland yield decrease and evapotranspiration deficit. Proc. 17th ICID European Regional Conference, Varna 1994 vol. 1 s. 163-180.
- MOSIEJ J., 1996. Metoda oceny wpływu wilgotności gleby i ewapotranspiracji na wysokość plonów w warunkach nawodnień. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 438 s. 141-146.
- NAIN A., KERSEBAUM K-CH., MIRSCHEL W., 2005. Are Meteorological Parameters Based Drought Indices Enough for Agricultural Drought Monitoring: A Comparative Study of Drought Monitoring with SPI and Crop Simulation Model. ICID 21st European Regional Conference 2005, 15-19 May Frankfurt (Oder) and Słubice. s. 9.
- NARASIMHAN B., SRINIVASA R., 2002. Development Of A Soil Moisture Index For Agricultural Drought Monitoring Using A Hydrologic Model (SWAT), GIS And Remote Sensing. Texas Water Monitoring Congress. September 9-11, 2002. Austin, TX.
- NDMC, 2005. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln. <http://www.drought.unl.edu/>.
- NEO, 2005. Netherlands Geomatics & Earth Observation B.V. <http://www.neo.nl/english/drymon-e/>.
- NOAA, 2005. National Oceanic And Atmospheric Administration, Drought Information Center. <http://www.drought.noaa.gov/palmer.html>.
- NOWAK L., 1986. Wpływu niedoboru i nadmiaru opadów na plonowanie roślin okopowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 268 s. 127-145.
- NWS, 2005. National Weather Service, Hydrologic Information Center. <http://www.nws.noaa.gov>.
- OLECHNOWICZ-BOBROWSKA B., 1979. Charakterystyka wskaźnika suchości w okresie wegetacyjnym w Polsce. Zesz. Nauk. AR Kraków nr 153 Melioracje z. 10 s. 3-17.
- ONRG, 2004. The Ojos Negros Research Group (San Diego State University, Universidad Autonoma de Baja California, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Southwest Center for Environmental Research and Policy). <http://threeissues.sdsu.edu>.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., 1994. Hydrologia stosowana. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 1994, ss. 324.
- PALFAI I., 2002. Probability of drought occurrence in Hungary. Quart. Jour. Of Hung. Meteo. Serv., Vol. 106, No. 3-4, s. 265- 275.

- PESZEK J., 1996. Uwarunkowania klimatyczno-przyrodnicze produkcji rolniczej w regionie bydgoskim. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 438 s. 19-32.
- POVERTY MAPPING, 2004. <http://www.povertymap.net/>.
- Program małej retencji dla województwa bydgoskiego do roku 2015. 1997. Pr. zbior. Red. L. Łabędzki. Bydgoszcz: IMUZ maszyn.
- REWUT I. B., 1980. Fizyka gleby. Warszawa. PWRiL. ss. 383.
- RODRÍGUEZ-PINEDA J.A., GIDDINGS L., GADSEN H., BOKEN V.K., 2005. Agricultural Drought in North-Central Mexico. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. A Global Study. Oxford Univ. s.132-143.
- ROGUSKI W., 1978. Parowanie terenowe kilku roślin uprawnych na glebach wytworzonych z piasków gliniastych mocnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. z. 205 s. 27-44.
- ROGUSKI W., 1980. Niedobory wodne roślin uprawnych i częstotliwość ich występowania w rejonie Kujaw. W: Problemy nawodnień użytków rolnych w Polsce. Mater. Konf. Nauk.-Techn. Bydgoszcz: NOT s. 183-203.
- ROGUSKI W., GABRYCH K., 1975. Parowanie terenowe łąk trzykośnych na glebie torfowo-murszowej w zależności od uwilgotnienia gleby, wysokości plonów i niektórych czynników klimatycznych. Wiad. IMUZ t. 12 z. 3 s. 27-52.
- ROGUSKI W., SARNACKA S., DRUPKA S., 1988. Instrukcja wyznaczania potrzeb i niedoborów wodnych roślin uprawnych i użytków zielonych. Mater. Instr. nr 66 Falenty: IMUZ.
- ROGUSKI W., ŁABĘDZKI L., 1988. Wpływ plonu z poszczególnych odrostów na wielkość sezonowych współczynników roślinnych k stosowanych do obliczeń ewapotranspiracji rzeczywistej łąki. Zesz. Nauk. ATR Bydgoszcz nr 158 Rolnictwo z. 27 s. 71-78.
- ROGUSKI W., KASPERSKA W., ŁABĘDZKI L., 1996. Warunki termiczne i opadowe w Bydgoszczy w latach 1945-1994 na tle lat 1848-1930. Wiad. IMUZ t. 19 z. 1 s. 7-20.
- ROJEK M., 1987. Rozkład czasowy i przestrzenny klimatycznych i rolniczo-klimatycznych bilansów wodnych na terenie Polski. Zesz. Nauk. AR Wroc. nr 62 ss. 67.
- ROJEK M., 1990. Ocena ilościowa parowania terenowego wybranych roślin na podstawie współczynników roślinnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. z. 390 s.77-90.
- ROJEK M., WIERCIOCH T., 1990. Współczynniki empiryczne do wyznaczania ewapotranspiracji aktualnej wybranych roślin w warunkach ekstremalnej wilgotności gleby. Zesz. Nauk. AR Wroc. nr 191 Melioracja z. 35 s. 67-76.
- ROJEK M., WIERCIOCH T., 1995. Zmienność czasowa i przestrzenna parowania

- wskaźnikowego, ewapotranspiracji aktualnej i niedoborów opadowych w Polsce nizinnej w okresie 1951-1990. Zesz. Nauk. AR Wroc. nr 238 ss. 51.
- ROJEK M., ŻYROMSKI A., 2004. Agrometeorologia i klimatologia. Wyd. AR Wroc. ss. 184.
- ROSSI G., 2000. Drought Mitigation Measures: a Comprehensive Framework. Kluwer Academic Publishers, s. 233-246.
- RUDNICKI F., SKINDER Z. (red.), 2001. Analiza strategiczna obszarów rolniczych w województwie kujawsko-pomorskim. Wyd. ATR Bydgoszcz. ss. 186.
- RZEKANOWSKI C., DUDEK S., ŻARSKI J., 1996. Potrzeby opadowe buraka cukrowego w świetle wieloletnich doświadczeń opadowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. z. 438 s. 61-68.
- SABĂU N.C., DOMUȚA C., MAN T.E., MARIA ȘANDOR, BREJEA R., 2005. Drought Analysis By The Climate Indexes In Link With The Yield Of The Main Crop From The Crișurilor Plain, Romania. <http://www.wg-crop.icidonline.org/>
- SALISBURY F.B., 1975. Fizjologia roślin. Warszawa. PWRiL, ss. 838.
- SCHMUCK A., 1969. Meteorologia i klimatologia dla WSR. Warszawa: PWN ss. 316.
- SIMS A.P., NIYOGI D., RAMAN S., 2002. Adopting drought indices for estimating soil moisture: A North Caroline case study. Geoph. Resear. Lett, Vol. 29, No. 0, 10.1029/2001gl013343.
- SŁOTA H., BOBIŃSKI E., DOBROWOLSKI A., FAŁ B., GAŁKA S. KOROL R., LORENC H., MIERKIEWICZ M., RUTKOWSKI T., TOMASZEWSKA T., ŻELAZIŃSKI J., 1992. Susza 1992: Zakres, intensywność, przyczyny i skutki, wnioski. Mater. Badawcze IMGW. Seria: Hydrologia i Oceanologia, Warszawa: IMGW.
- SMITH M., 1992a. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage Paper no. 46 Rome: FAO ss. 132.
- SMITH M., 1992b. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Land and Water Development Division. Rome: FAO ss. 54.
- SZALAI S., SZINELL CS., 2000. Comparison of Two Drought Indices for Drought Monitoring in Hungary – a Case Study. W: Drought and Drought Mitigation in Europe. Kluwer Academic Publishers, s. 161-166.
- SZALAI S., SZINELL CS., ZOBOKI J., 2003. Drought Monitoring in Hungary (maszynopis).
- TIAN G., BOKEN V.K., 2005. Monitoring Agricultural Drought In China. Monitoring and Predicting Agricultural Drought. A Global Study. Oxford Univ. s. 354-368.
- TOMASZEWSKA T., 1994. Susze atmosferyczne na przestrzeni czterdziestolecia. XXV Zjazd Meteorologów. Olsztyn – Mierki 27-29.09. 1994. ART Olsztyn, s. 169-178.

- TRYBAŁA M., 1996. Gospodarka wodna w rolnictwie. PWRiL. Warszawa, ss. 256.
- USGS, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, <http://geochange.er.usgs.gov>.
- VRÂNCEANU A.I., CANARCHE A., CÂRSTEA, 2000. State of art of the national drought mitigation strategy in Romania. Proc. Workshop on Drought Mitigation in Central and East Europe, Budapest, 12-15 April 2000, s. 81-90.
- What is Drought? 2002. U.S. National Drought Mitigation Center. Strona internetowa: <http://enso.unl.edu/ndmc>
- WIĘCKOWSKI S., 1985. Liść jako miejsce transpiracji. W: Fizjologia roślin. Pr. zbior. pod red. J. Zubrzyckiego i M. Michniewicza. Warszawa. PWRiL. s. 396-409.
- WILHELM O., V., WILHITE D., 2002. Assessing Vulnerability to Agricultural Drought: A Nebraska Case Study. Kluwer Academic Publishers, Natural Hazards 25, s. 37-58.
- WILHITE D.A., GLANTZ M.H., 1985. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water International no. 10 s. 111-120.
- WILHITE D.A., HAYES M.J., SVOBODA M.D., 2000. Drought Monitoring and Assessment: Status and Trends in the United States. Kluwer Academic Publishers, s. 149-160.
- WOŚ A., 1994. Klimat Niziny Wielkopolskiej. Wydawnictwo Naukowe UAM w Poznaniu. Poznań. ss. 192.
- WOŚ A., 2003. Klimat regionu środkowowielkopolskiego w świetle częstości występowania wybranych typów pogody i ich zmienności w latach 1951-2000. W: Józef Banaszak (red.) Stepowanie Wielkopolski pół wieku później. Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej. Bydgoszcz. ss. 27-42.
- WWF, The 3rd World Water Forum, 2003. <http://www.world.water-forum3.com>.
- ZANVETTOR R., RAVELO A., 2002. Using the SPI to Monitor the 1999-2000 Drought in Northeastern Argentina. Drought Network News, Vol.12, No. 3, ss. 3-4.
- ZIERNICKA A., ZAWORA T., 2002. Przestrzenno-czasowa dynamika suszy 2000 roku na obszarze Polski. Rocz. AR Pozn. CCCXLII, Melior. Inż. Środ., s. 571-577.
- ŻARSKI J., DUDEK S., KUŚMIEREK R., 2001. Zmienność warunków agrometeorologicznych okolic Bydgoszczy w latach 1951-2000 na przykładzie Mochelka. Prz. Nauk. Wydz. Inż. i Kształt. Środow. SGGW z. 21 s. 67-73.
- ŻMUDZKA E., 2003. Wielkość zachmurzenia w Polsce w drugiej połowie XX wieku. Przegl. Geof. R. XLVIII z.3-4. s. 159-186.