



Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie  
Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

**Roman Erwin Bathelt**

Nr albumu: 1088

**Ocena tolerancji mieszańców owsa z kukurydzą  
na stres suszy glebowej**

Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk rolniczych  
w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo

Praca wykonana pod kierunkiem  
promotor: dr hab. inż. Tomasz Warzecha, prof. URK  
promotor pomocniczy: dr Marzena Warchol

Kraków, 2023

Składam serdeczne podziękowania dla promotora  
dra hab. inż. Tomasza Warzechy, prof. URK  
za zaangażowanie, nieocenioną pomoc, cierpliwość,  
wrozumiałość i udzielanie cennych wskazówek  
oraz merytorycznych rad w trakcie prowadzonych badań  
i podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej.

Pragnę również podziękować Pani promotor pomocniczej  
dr Marzenie Warchoł, Pani prof. dr hab. inż. Edycie  
Skrzypek oraz pracownikom Katedry Fizjologii, Hodowli  
Roślin i Nasiennictwa Uniwersytetu Rolniczego  
im. H. Kołłątaja w Krakowie oraz Instytutu Fizjologii  
Roślin *im. Franciszka Górskiego* w Krakowie  
za pomoc i wsparcie w przeprowadzaniu badań  
i przygotowywaniu rozprawy doktorskiej.

Niniejsza rozprawa doktorska została wykonana w oparciu o fundusze Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie oraz częściowo w oparciu o fundusze projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr PBS3/B8/17/2015 i zawiera wyniki niepublikowane oraz opublikowane przez autora w formie następującego artykułu:

Warzecha T. Bathelt R. Skrzypek E. Warchoł M. Bocianowski J. Sutkowska A. 2023. Studies of Oat-Maize Hybrids Tolerance to Soil Drought Stress. *Agriculture*, 13: 243.

# SPIS TREŚCI

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW .....                                    | 5  |
| 2.     | WSTĘP .....  | 7  |
| 3.     | PRZEGLĄD LITERATURY .....  | 9  |
| 3.1.   | Znaczenie gospodarcze owsa .....                                   | 9  |
| 3.1.1. | Odmiany owsa .....   | 13 |
| 3.1.2. | Hodowla owsa.....  | 14 |
| 3.2.   | Znaczenie podwojonych haploidów w hodowli roślin.....              | 17 |
| 3.3.   | Krzyżowanie oddalone zbóż .....                                    | 19 |
| 3.3.1. | Wykrywanie mieszańców owsa z kukurydzą i badanie introgresji ..... | 21 |
| 3.4.   | Znaczenie stresu suszy w produkcji roślinnej.....                  | 23 |
| 3.5.   | Fizjologiczno-biochemiczne reakcje roślin na suszę .....           | 28 |
| 3.5.1. | Test utraty wody .....   | 28 |
| 3.5.2. | Zawartość cukrów rozpuszczalnych .....                             | 29 |
| 3.5.3. | Zawartość białek i związków fenolowych.....                        | 30 |
| 3.5.4. | Zawartość barwników fotosyntetycznych .....                        | 31 |
| 3.5.5. | Badanie fluorescencji chlorofilu <i>a</i> .....                    | 32 |
| 3.5.6. | Analiza elementów plonu i biomasy.....                             | 33 |
| 4.     | CEL PRACY.....   | 34 |
| 5.     | MATERIAŁ I METODY .....  | 35 |
| 5.1.   | Identyfikacja linii OMA .....                                      | 35 |
| 5.2.   | Identyfikacja chromosomów kukurydzy .....                          | 39 |
| 5.3.   | Doświadczenie szklarniowe .....                                    | 40 |
| 5.4.   | Doświadczenie tunelowe.....  | 43 |
| 5.5.   | Test utraty wody.....  | 45 |

---

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.6.   | Analiza parametrów biochemicznych .....            | 46  |
| 5.7.   | Analiza fluorescencji chlorofilu <i>a</i> .....    | 47  |
| 5.8.   | Analiza wybranych elementów składowych plonu ..... | 48  |
| 5.9.   | Analiza statystyczna .....                         | 48  |
| 6.     | WYNIKI .....                                       | 49  |
| 6.1.   | Badania molekularne .....                          | 49  |
| 6.1.1. | Identyfikacja linii OMA .....                      | 49  |
| 6.1.2. | Identyfikacja chromosomów kukurydzy .....          | 53  |
| 6.2.   | Doświadczenie szklarniowe .....                    | 59  |
| 6.2.1. | Test utraty wody .....                             | 59  |
| 6.2.2. | Analiza parametrów biochemicznych .....            | 60  |
| 6.2.3. | Analiza fluorescencji chlorofilu <i>a</i> .....    | 70  |
| 6.2.4. | Analiza wybranych elementów składowych plonu ..... | 79  |
| 6.2.5. | Korelacje .....                                    | 82  |
| 6.2.6. | Różnice fenotypowe w reakcji na stres .....        | 87  |
| 6.3.   | Doświadczenie tunelowe .....                       | 90  |
| 6.3.1. | Analiza parametrów biochemicznych .....            | 90  |
| 6.3.2. | Analiza fluorescencji chlorofilu <i>a</i> .....    | 99  |
| 6.3.3. | Analiza wybranych elementów składowych plonu ..... | 107 |
| 6.3.4. | Korelacje .....                                    | 110 |
| 7.     | DYSKUSJA .....                                     | 113 |
| 8.     | PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....                       | 124 |
| 9.     | SPIS LITERATURY .....                              | 126 |

## 1. WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW

- Area** – wielkość pola akceptorów transportu elektronów z PSII
- ATP** – adenosyno-5'-trifosforan
- COBORU** – Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych
- CS** – wzbudzona powierzchnia fotosyntetycznej próbki
- DH** – podwojone haploidy (ang. *doubled haploids*)
- ELWL** – szybkość utraty wody z liści (ang. *Excised Leaf Water Loss*)
- ETo/CS** – tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS
- FAOSTAT** – Statystyczna Baza Danych Organizacji ds. Wyżywienia i Rolnictwa (ang. *Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database*)
- Fv/Fm** – maksymalna wydajność kwantowa PSII
- GISH** – genomowa hybrydyzacja *in situ* (ang. *genomic in situ hybridization*)
- GUS** – Główny Urząd Statystyczny
- HSP** – białka szoku cieplnego (ang. *heat shock proteins*)
- KBW** – klimatyczny bilans wodny
- LEA** – dehydryny, białka zapewniające odporność na wysuszenie (ang. *late embryogenesis abundant proteins*)
- LTR** – długie, powtarzalne sekwencje terminalne (ang. *long terminal repeat*)
- MTZ** – masa tysiąca ziaren
- NADPH** – forma zredukowana NADP<sup>+</sup> – estru fosforanowego dinukleotydu
- OMA** – mieszańce owsa z kukurydzą (ang. *oat × maize addition lines*)
- INUG** – Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa
- PAR** – promieniowanie fotosyntetycznie czynne (ang. *photosynthetically active radiation*)
- PCR** – łańcuchowa reakcja polimerazy (ang. *polymerase chain reaction*)
- PDO** – porejestrowe doświadczalnictwo odmianowe
- PEPC** – enzym karboksylaza fosfoenolopirogronianowa
- PI** – wskaźnik funkcjonowania PSII
- PPDK** – enzym dikinaza ortofosforanowa pirogronianu
- ppw** – połowa pojemność wodna
- PR** – białka odpowiedzialne za odporność na stres biotyczny (ang. *pathogenesis related*)
- PSII** – fotoukład II
- RC/CS<sub>o</sub>** – parametr charakteryzujący zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia

**ROS** – reaktywne formy tlenu (ang. *reactive oxygen species*)

**SMSR** – System Monitoringu Suszy Rolniczej

**SSR** – proste powtórzenia tandemowe (ang. *Simple Sequence Repeats*)

## 2. WSTĘP

Spośród uprawianych w Polsce zbóż zdecydowanie wyróżnia się owies zwyczajny *Avena sativa* L.. Mimo, że jego znaczenie gospodarcze w porównaniu do pszenicy czy jęczmienia jest mniejsze, a plony niższe, to na uwagę zasługuje skład chemiczny ziarna owsa, co sprawia, że gatunek ten doceniany jest jako roślina prozdrowotna. Mimo, że jego produkcja pod koniec XX wieku drastycznie spadła to obecnie utrzymuje się na stałym poziomie (FAOSTAT 2022). Początkowo owies wykorzystywano głównie jako paszę dla koni, natomiast obecnie staje się w coraz większym stopniu produktem konsumpcyjnym w postaci np. płatków owsianych. Zmiana kierunku użytkowania owsa pociąga za sobą zmianę oczekiwań względem hodowli roślin i wymaga od niej nowych odmian, które będą zdolne wytworzyć dostatecznie wysoki plon o zadowalających parametrach ziarna. Czynnikiem powodującymi pogorszenie składu ziarna, a przede wszystkim obniżenie plonu są głównie niesprzyjające warunki pogodowe panujące w trakcie sezonu wegetacyjnego (Budzyński i Szempliński 2003).

Spośród wszystkich niekorzystnych zjawisk wpływających na osiągnięte plony największy wpływ ma susza, czyli ilość opadów niewystarczająca do właściwego wzrostu i rozwoju roślin. Niezbędna ilość opadów uzależniona jest także między innymi od przebiegu temperatur czy wymagań wodnych uprawianych roślin w poszczególnych okresach wegetacji (Lal i in. 2012). Występowanie suszy w ostatnich dekadach staje się coraz częstsze. Interwencyjne zabiegi w trakcie jej trwania (jak np. deszczowanie) są bardzo kosztowne. Należy więc oszczędnie gospodarować wodą tj. stosować właściwe technologie uprawy czy starannie wybierać właściwe gatunki i odmiany roślin (Łabędzki i Leśny 2008). Każda odmiana oceniana jest ze względu na tolerancję suszy. Wzrost znaczenia tego ekstremalnego zjawiska pogodowego wymusza na hodowcach roślin tworzenie coraz bardziej tolerancyjnych czy odpornych na suszę odmian (Drzazga i in. 2011).

W hodowli roślin samopłodnych oprócz odnalezienia właściwego genotypu powstałego z zaplanowanych krzyżowań istotne jest także uzyskanie homozygotyczności i utrwalenie pożądanых cech. Osiągnięcie tego celu, a przy tym znaczne skrócenie czasu prac hodowlanych dają metody oparte na haploidyzacji, do których należy krzyżowanie oddalone, czyli zapylenie roślin pyłkiem pochodzącym od innego gatunku lub innego rodzaju. W wyniku krzyżowania powstają rośliny haploidalne, które po podwojeniu liczby chromosomów dają w pełni homozygotyczne linie podwojonych haploidów (DH) (Skrzypek i in. 2018).

W wyniku krzyżowania owsa z kukurydzą najczęściej dochodzi do całkowitej eliminacji chromosomów dawcy na wczesnych etapach embriogenezy, ale zdarza się, że niektóre chromosomy kukurydzy lub ich fragmenty są na stałe włączane do genomu owsa i w ten sposób powstają mieszańce. Uzyskane w ten sposób rośliny C3 mają w swoim genomie chromosomy kukurydzy, która przeprowadza fotosyntezę typu C4 i posiada jeden z niższych współczynników transpiracji spośród roślin uprawnych w Polsce. Z tego powodu uzasadnione jest poszukiwanie wśród nich źródeł większej tolerancji na niekorzystne zjawiska związane z suszą w celu uzyskania bardziej odpornych i tolerancyjnych odmian owsa. W pracy skupiono się na badaniu mieszańców owsa z kukurydzą wykonując wiele testów i pomiarów parametrów związanych z odpornością na stres suszy oraz określeniu korelacji zarówno pomiędzy nimi, jak i z uzyskanym plonem ziarna i biomasy. W ten sposób określono przydatność mieszańców do poszukiwania źródeł odporności na suszę oraz wybrano genotypy najbardziej predestynowane do dalszych prac nad odpornością roślin owsa na ten stres.



### 3. PRZEGLĄD LITERATURY

#### 3.1. Znaczenie gospodarcze owsa

Owies uważany jest za jedną z młodszych roślin uprawnych, a pierwsze znaleziska tego zboża pochodzą z epoki brązu (około 1500 lat p.n.e.). Początkowo występował w uprawach jako chwast, dlatego określany jest jako wtórna roślina uprawna. Pierwotnie uprawiano owies szorstki *Avena strigosa* Schreb., a później owies zwyczajny *Avena sativa* L., natomiast przodkiem owsa zwyczajnego prawdopodobnie był owies głuchy *Avena fatua* L., który od dawna uważany jest jedynie za pospolity chwast zbóż. Rodzaj owies *Avena* L. dzieli się na dwie sekcje: *Euavena* (jednoroczne zboża, gatunki dzikorosnące i chwasty) i *Avenastrum* (wieloletnie trawy) (Budzyński i Szempliński 2003). Główne gatunki sekcji *Euavena* zaprezentowano w Tabeli 1.

Tabela 1. Gatunki sekcji *Euavena*

| Podsekcja                          | Gatunki sekcji <i>Euavena</i> wraz z liczbą chromosomów   |   |  |
|------------------------------------|---|---|--|
|                                    | Gatunki dzikorosnące i chwasty  | Gatunki uprawne oplewione   | Gatunki uprawne nagie  |
| <i>Aristulatae</i><br>(ostkowate)  | <i>Avena barbata</i> Pott.<br>2n = 28   | <i>Avena strigosa</i> Schreb.<br>2n = 14<br><i>Avena brevis</i> Rothm.<br>2n = 14<br><i>Avena abissinica</i> Hochst.<br>2n = 28 | <i>Avena nuda</i> L.<br>2n = 14  |
| <i>Denticulatae</i><br>(ząbkowane) | <i>Avena fatua</i> L.<br>2n = 42<br><i>Avena sterilis</i> L.<br>2n = 42<br><i>Avena ludoviciana</i> Dur.<br>2n = 42 | <i>Avena byzantina</i> C. Koch.<br>2n = 42<br><i>Avena sativa</i> L.<br>2n = 42   | <i>Avena chinensis</i><br>(Fisch. ex Roem. & Schult.) Metzg.<br>2n = 42<br><i>Avena sativa</i> L.<br>2n = 42 |

Spośród wymienionych w Tabeli 1 gatunków owsa uprawiane są 3 oplewione: owies szorstki *Avena strigosa* Schreb., owies bizantyjski *Avena byzantina* C. Koch. i owies zwyczajny *Avena sativa* L. oraz jeden gatunek owsa nagiego *Avena nuda* L.. Najwięcej, bo 90% światowej powierzchni upraw rodzaju *Avena* L., zajmuje owies zwyczajny, który występuje w formie ozimej i jarej. W Polsce uprawiane są jare odmiany owsa zwyczajnego, a także w mniejszym stopniu owsa nagiego.

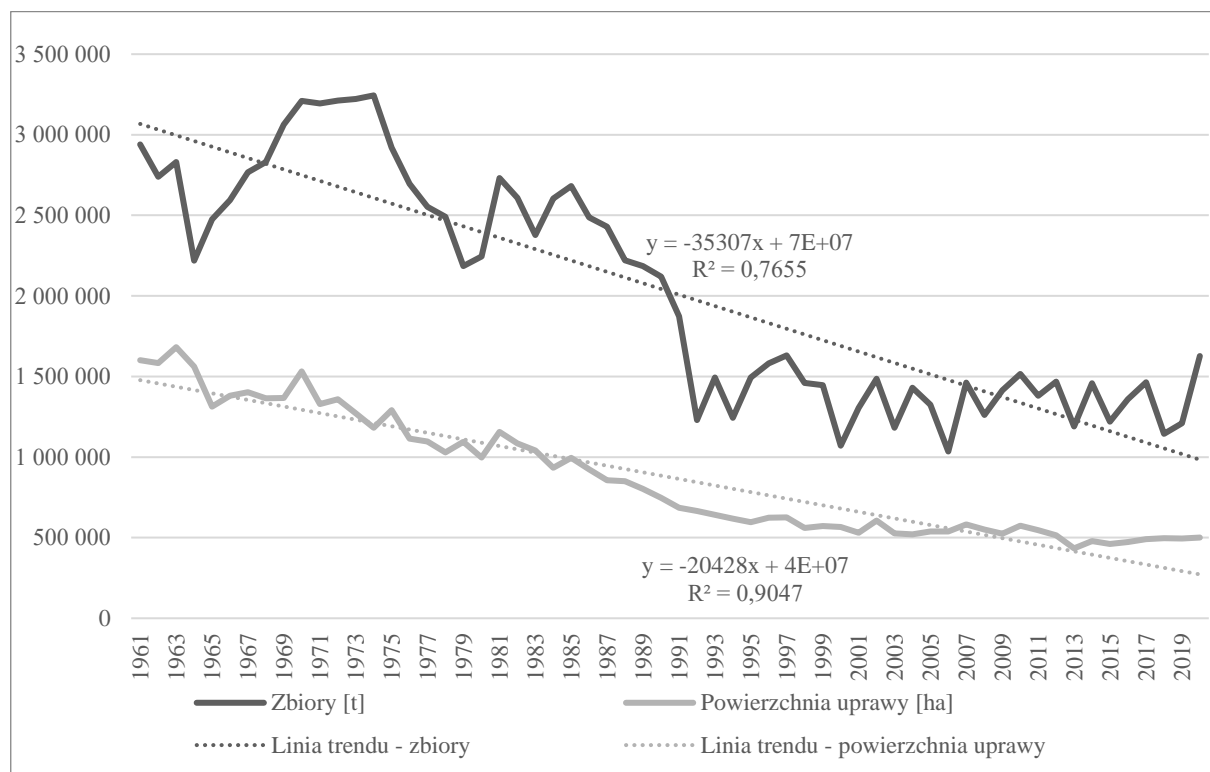
Gatunki rodzaju *Avena* L. wytwarzają wiązkowe systemy korzeniowe, puste wewnątrz źdźbła, lancetowatego kształtu liście i wiechy o długości 10-25 cm. Rośliny osiągają wysokość od 60 do 150 cm, a pojedyncze źdźbła składają się z 4-8 międzywęźli. Liście owsa w przeciwieństwie do innych gatunków zbóż są lewoskrętne. Wiechy występują w formie rozpierzchłej lub chorągiewkowatej. Osadka stanowiąca oś wiechy ulega rozgałęzieniom, które dzieli się na pierwszego i drugiego rzędu (Rycina 1). Na wierzchołku wiechy i wszystkich zakończeniach rozgałęzień bocznych znajdują się kłoski zawierające 2-3 obupłciowe kwiaty (Budzyński i Szempliński 2003).



Rycina 1. Rośliny owsa w trakcie wegetacji (źródło: W. Carter, [https://pl.wikipedia.org/wiki/Owies#/media/Plik:Oats\\_in\\_a\\_field.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Owies#/media/Plik:Oats_in_a_field.jpg) (dostęp 28.03.2022))

Światowe zbiory ziarna owsa w 2020 roku wyniosły 25,18 mln ton, co przy powierzchni zasiewów wynoszącej 9,77 mln hektarów dało średnie plony na poziomie 25,77 dt/ha. Na największej powierzchni owies uprawia się w Rosji, Kanadzie i Australii. Zasiwy w tych trzech krajach stanowiły w 2020 roku 45% całości światowej powierzchni uprawy. Wyższe od rosyjskich plony ziarna owsa w Kanadzie stawiają ją na pierwszym miejscu w wielkości zbiorów (odpowiednio 4,57 mln t do 4,13 mln t). Dwóch zdecydowanie największych producentów wytwarza 33,89% światowych zbiorów. Wyraźnie najwyższe plony uzyskuje się w Irlandii – 70,86 dt/ha, co stanowi 272,1% średniego plonu na świecie. Wysokie plony osiąga się także w Danii (56,94 dt/ha – 219%) oraz Nowej Zelandii (56,03 dt/ha – 215%). Najwięcej,

bo aż 59,8% ziarna owsa w 2020 roku zebrano w Europie. Najmniej (tylko 0,7%) zbiorów pochodzi z Afryki, a z Ameryki 30,4%, z czego większość pochodzi z Ameryki Północnej (72,1%), z Ameryki Południowej 27%, a tylko 0,9% amerykańskich zbiorów pochodzi z Ameryki Środkowej. W Azji zebrano 4,5% światowej produkcji owsa, a w Australii i Oceanii 4,6% (FAOSTAT 2022).

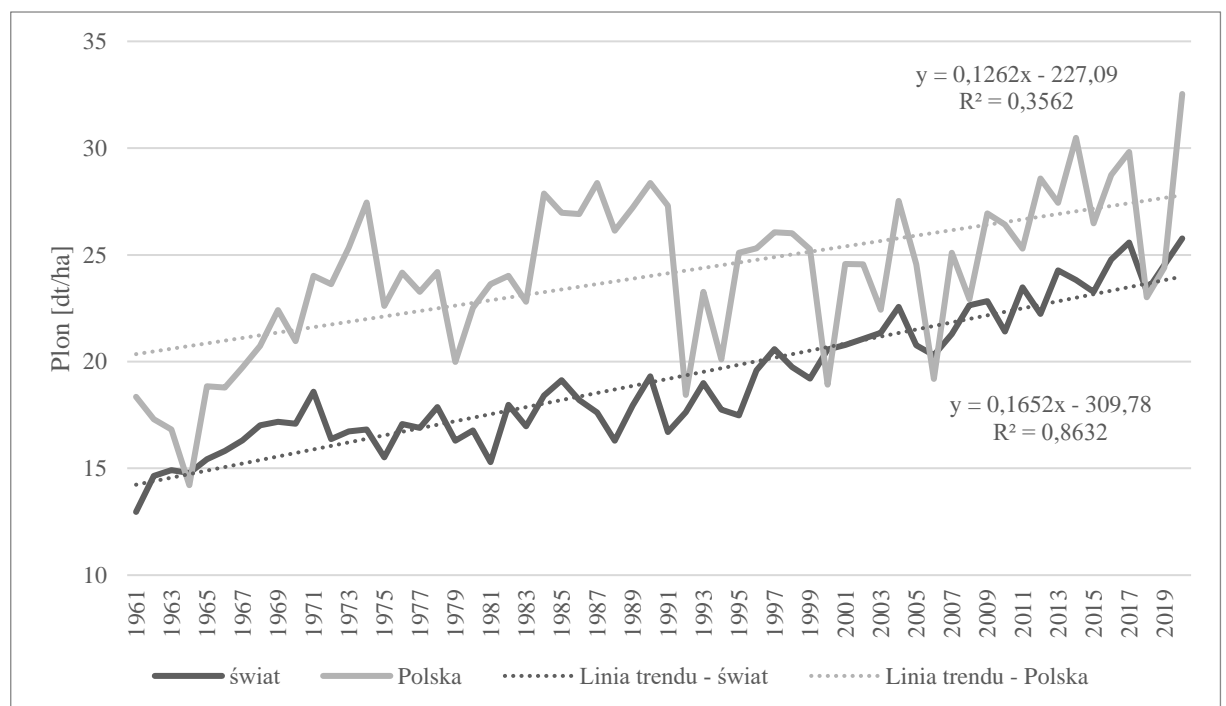


Rycina 2. Zbiory i powierzchnia zasiewów owsa w Polsce w latach 1961-2020 (FAOSTAT 2022)

Polska jest trzecim największym światowym producentem ziarna owsa oraz największym w Unii Europejskiej. Udział Polski w światowej produkcji wyniósł 6,3%. W 2020 roku owies uprawiano na 500,12 tys. ha, z czego 96,4% w gospodarstwach indywidualnych. Powierzchnia uprawy owsa w Polsce systematycznie spada, a w latach 1961-2020 spadek wyniósł średnio 20,428 tys. ha/rok, ale w ostatnich 20 latach utrzymuje się już stabilna powierzchnia uprawy. W 2020 roku zbiory wyniosły 1,66 mln t (96,1% w gospodarstwach indywidualnych), a średni plon z hektara 33,2 dt (33 dt w gospodarstwach indywidualnych). Tak wysoki średni plon uzyskano po raz pierwszy w historii. W latach 1961-2020 zbiory ziarna owsa spadały średnio o 35 307 t/rok. Spadek powierzchni uprawy nie jest wprost proporcjonalny do wielkości zbiorów z racji znacznej poprawy plonowania – średnio o 12,62 kg/ha/rok, co w perspektywie 60 lat daje 7,57 dt/ha (Rycina 2). Na świecie postęp hodowlany jest wyższy i w analogicznym okresie wyniósł 16,52 kg/ha/rok

(9,91 dt/ha/60 lat). Plon ziarna owsa w poszczególnych latach w Polsce i na świecie wraz z liniami trendu prezentuje Rycina 3.

Największą powierzchnię zasiewów owsa w 2019 roku w Polsce odnotowano w województwach: mazowieckim (92,5 tys. ha – 18,7% powierzchni zasiewów owsa w Polsce) i lubelskim (75,5 tys. ha – 15,2%). Największy udział owsa w strukturze zasiewów (blisko 10%) obserwuje się w województwach podlaskim, podkarpackim i mazowieckim. Średnia dla całej Polski wynosi 6,3% (GUS 2022, FAOSTAT 2022).



Rycina 3. Plon ziarna owsa na świecie i w Polsce w latach 1961-2020 (GUS 2022, FAOSTAT 2022)

Uprawa owsa skupiona jest na dwóch kierunkach: konsumpcyjnym i paszowym. Ziarno owsa przeznaczone do spożycia przez ludzi musi charakteryzować się wysoką zawartością białka i beta-glukanów, a niską zawartością tłuszczu, którego w ziarnie w porównaniu do innych zbóż jest wyjątkowo dużo, bo nawet 2-3 razy więcej niż w ziarnie pszenicy czy żyta. U odmian oplewionych jest go 4-7%, a u owsa nagiego nawet 9%. Skład kwasów tłuszczowych jest bardzo korzystny z przewagą pożądaných nienasyconych. Zawartość białka kształtuje się na poziomie 11-12%, a jego skład aminokwasowy jest znacznie korzystniejszy od innych zbóż, na co wpływa duży udział aminokwasów egzogennych. Ponadto ziarno owsa jest bogate w witaminy B1, E i kwas pantotenowy, a także składniki mineralne takie jak fosfor, potas, wapń, cynk, mangan i żelazo. Udział skrobi w ziarnie jest mniejszy od innych zbóż o około 10%. Przemysł spożywczy wytwarza z ziarna owsa głównie płatki, ale również kaszę, mąkę

i otręby. Paszowy kierunek uprawy skupia się na produkcji ziarna bogatego w tłuszcz i białka, a ubogiego w beta-glukany, które pogarszają jakość paszy, szczególnie tej przeznaczanej dla zwierząt monogastrycznych (Budzyński i Szempliński 2003).

Owies jest uprawiany także jako komponent mieszanek międzyplonowych dzięki jego właściwościom fitosanitarnym. Udział upraw owsa w strukturze zasiewów wzrasta w systemach rolnictwa zrównoważonego i ekologicznego w porównaniu do rolnictwa konwencjonalnego. W warunkach braku stosowania nawozów sztucznych i chemicznych środków ochrony roślin przewaga wysokoplonujących w intensywnych systemach uprawy gatunków roślin ulega zatarciu, a właściwości fitosanitarne owsa powodują, że zbierany z jego upraw plon ziarna, ale także innych roślin w płodozmianie, jest wystarczający, a jego jakość zadowalająca. Owies jest rośliną zdecydowanie poprawiającą stanowisko, zarówno w płodozmianach w systemie rolnictwa ekologicznego, jak i konwencjonalnego, w którym często zajmuje stanowisko pomiędzy innymi zbożami (Kuś i Smagacz 1999).

### 3.1.1. Odmiany owsa

Na liście odmian roślin rolniczych wpisanych do krajowego rejestru opublikowanej w 2021 roku znajduje się 36 odmian owsa, z czego 32 to odmiany owsa zwyczajnego *Avena sativa* L., a pozostałe 4 kreacje to odmiany owsa nagiego (nagoziarnistego) *Avena nuda* L.. W latach 2018-2021 14 odmian owsa zwyczajnego zostało wpisanych do krajowego rejestru, a 6 odmian skreślono. Średni wiek odmiany w rejestrze liczony od momentu wpisu wynosi 6 lat, co uwzględniając dużą ilość nowych odmian w rejestrze stanowi dobry wynik i informację o trwających pracach hodowlanych. Spośród wszystkich odmian owsa zwyczajnego tylko jedna odmiana (Gniady) charakteryzuje się brązową barwą plewki, a pozostałe 31 posiadają żółtą. W rejestrze nie znajduje się obecnie żadna odmiana o białej plewce, a wykreślona w 2013 roku odmian Flämingsprofi była ostatnią taką odmianą w rejestrze (COBORU 2021).

Porejestrowe doświadczalnictwo odmianowe (PDO) dzieli dodatkowo odmiany owsa zwyczajnego na górskie oraz nizinne. Wyniki plonowania odmian w tych doświadczeniach w latach 2019-2021 wskazują na znacznie lepsze plonowanie owsa w porównaniu do średniej krajowej. Plon nasion wzorca kształtował się na poziomie od 57,9 dt/ha w roku 2021 do 71,2 dt/ha w roku 2020. Wzorzec w roku 2019 stanowiły odmiany Agent, Kozak i Bingo. W 2020 roku odmianę Bingo zastąpiła odmiana Rambo i taki skład wzorca obowiązywał także w 2021 roku. Wyniki plonowania PDO uzyskano na podstawie ponad 40 doświadczeń. Najlepiej plonującą odmianą okazała się odmiana Rambo, której plon kształtował się na

poziomie 110% wzorca w roku 2019, 101% w roku 2020 i 105% wzorca w roku 2021. Najwyższe plony ziarna owsa w 2021 roku – 67,2 dt z hektara – uzyskano w rejonie V obejmującym województwa dolnośląskie, opolskie i śląskie, a najniższe – 38,8 dt z hektara – w rejonie I obejmującym województwa zachodniopomorskie i pomorskie (Drażkiewicz 2021).

Masa tysiąca ziaren (MTZ) owsa zwyczajnego zwykle mieści się w zakresie od 26 g do 37 g. Wartość MTZ kształtują czynniki genetyczne, nawożenie azotowe, zagęszczenie ładu, a także wielkość i rozkład opadów w trakcie wegetacji. Ziarno owsa zwyczajnego jest oplewione, czyli na stałe zrosnięte z plewką. W związku z tym masa tysiąca ziaren kształtowana jest również przez masę plewki, której udział zwykle mieści się w zakresie od 19% do 32%. Odmiany owsa nagiego charakteryzują się mniejszą masą tysiąca ziaren mieszczącą się w granicach od 19 g do 22 g. Jednakże po poddaniu ziaren owsa zwyczajnego łuszczeniu (usunięciu plewek) wartość MTZ ulega zmniejszeniu i dysproporcje te ulegają zanikowi. Obłuszczone ziarno owsa zwyczajnego posiada masę tysiąca ziaren od 18 g do 30 g. Mały udział plewki w ziarnie to cecha pożądana dla owsa przeznaczonego do produkcji płatków na cele konsumpcyjne. Cecha ta kształtowana jest przez czynniki genetyczne, co wykazały istotne różnice w MTZ i udziale plewki w ziarnie pomiędzy różnymi odmianami owsa. Udział plewki w ziarnie kształtowany jest również w dużym stopniu przez ilość i rozkład opadów atmosferycznych w trakcie wegetacji. Wykazano, że niezbyt wysokie ilości opadów, około 400 mm w trakcie trwania wegetacji, są optymalne dla uzyskania niskiego udziału plewki w ziarnie. Z kolei do słabego wypełnienia ziarniaków powodującego większy udział plewek prowadzą mniejsze od normalnych ilości dostępnej wody, co występuje w przypadku stresu suszy (Kołodziej 2003). Wysoki udział plewki w ziarnie, jaki występuje np. u dobrze plonującej odmiany Krezus, predestynuje taki surowiec na cele paszowe. Udział plewki w ziarnie jest ujemnie skorelowany z wysokością plonu (Nita 2003). Mimo to obłuszczone ziarno owsa zwyczajnego z reguły charakteryzowało się wyższą masą tysiąca ziaren od owsa nagiego. Ziarno owsa nagoziarnistego charakteryzuje się kilkuprocentowym udziałem ziaren oplewionych, co uzależnione jest od odmiany, a także przebiegu warunków atmosferycznych. W niesprzyjających temu latach udział ten może przekroczyć nawet 20% u podatnych odmian (Sykut-Domańska 2012).

### 3.1.2. Hodowla owsa

Owies, podobnie jak wszystkie zboża właściwe, jest rośliną jednoliścienną. W uprawie na terenie Polski występują jedynie formy jare tego gatunku, ale trwają prace hodowlane nad formą ozimą, która występuje w innych regionach, jak np. w Europie Zachodniej. Owies

uprawiany w polskich warunkach jest alloheksaploidem o liczbie chromosomów  $2n = 6x = 42$ . Poliploidy są bardzo popularne w świecie roślin, stanowią one ponad połowę roślin okrytozalążkowych oraz około 70% traw. Powstają poprzez połączenie niezredukowanych gamet dwóch różnych gatunków diploidalnych, co jest możliwe za sprawą ich znacznego podobieństwa, co nie utrudnia właściwej koniugacji chromosomów homologicznych i rozchodzenia się biwalentów w mejozie (Adamus 2009).

Owies jest rośliną samopłodną, co jest zapewniane poprzez łączenie dwóch różnych strategii. Kwitnienie następujące przed wysunięciem się wiechy z pochwy liściowej to pierwsza metoda, która jest charakterystyczna także dla jęczmienia, natomiast samozapylenie przy zamkniętych kwiatach to druga strategia stosowana przez rośliny owsa, która występuje także u pszenicy. Samopłodność ma przełożenie na metody hodowlane stosowane w pracach nad ulepszaniem właściwości nowych odmian owsa. Determinuje też brak konieczności corocznej wymiany materiału siewnego przez rolników na skutek długo utrzymującej się w kolejnych latach tożsamości genetycznej ziarna z własnego rozmnożenia (Michalik 2009). Sprzedaż kwalifikowanego materiału siewnego w przeliczeniu na 1 ha zasiewów owsa wyniosła w sezonie 2019/2020 tylko 19,35 kg, co stanowi bardzo niską liczbę w porównaniu do normy wysiewu wynoszącej wielokrotność tej wartości. Wynik ten jest niski także na tle innych zbóż w Polsce i jest jednym z najniższych wartości w Europie (GUS 2022).

Podstawą tworzenia nowych odmian roślin samopłodnych są krzyżowania. Połączenie pożądaných cech dwóch lub większej ilości linii bądź odmian może prowadzić do powstania nowej kreacji o nieobserwowanych wcześniej kombinacjach genów. Krzyżowanie proste to zapylenie genotypu A pyłkiem genotypu B  $[A \times B]$ . Jeśli na fenotyp nowej odmiany wpływ będzie miała cytoplazma istotne jest czy formą żeńską będzie linia A czy B  $[(A \times B)]$  lub  $(B \times A)$ . Często stosowanymi np. w hodowli odpornościowej są krzyżówki wsteczne, gdzie można wprowadzać geny odporności od gatunków bardziej pierwotnych do odmian uprawnych o wyższej plenności, a niskiej odporności na stresy. Po pierwszej krzyżówce uzyskanego mieszańca krzyżuje się ponownie z rodzicem, który odpowiedzialny jest za dostarczenie cech wysokiej plenności  $[(A \times B) \times A]$ . Za uzyskanie odporności np. na chorobę odpowiedzialna jest mniejsza liczba genów niż za pożądane cechy ilościowe jak np. plon ziarna czy zawartość białka. Spośród dużej ilości mieszańców selekcionuje się te odporne, a spośród nich te o najwyższych wartościach pożądaných cech. Wielokrotne krzyżowanie kolejnych pokoleń z tym samym rodzicem to krzyżowanie wypierające. Aby połączyć cechy wielu odmian w jednym mieszańcu stosuje się krzyżowanie wielokrotne np.  $[(A \times B) \times (C \times D)]$  (Góral 2009).

Po wykonaniu krzyżowania uzyskuje się heterozygotyczne pokolenie F1. Jeśli wykonano krzyżówkę prostą osobniki są ponadto homogeniczne, czego nie można powiedzieć w przypadku krzyżowania wielokrotnego, gdzie jednorodność nie występuje. W tym przypadku pokoleniem F1 są rośliny uzyskane po wykonaniu ostatniego krzyżowania. Sposób prowadzenia selekcji od tego momentu jest determinowany wybraną metodą hodowlaną. Najpopularniejszą, stosowaną od XIX wieku, jest metoda rodowodowa. Zebrane nasiona wysiewa się punktowo i prowadzi ostrą selekcję, wybierając po kilka kombinacji spośród każdych 100. Nasiona z wyselekcjonowanych roślin wysiewa się w rzędach, na których ponownie prowadzi się selekcję. Rośliny stanowiące pokolenie F3 bardzo często określa się już jako rodziny. Od tego pokolenia może być prowadzona ocena laboratoryjna materiału hodowlanego. Po dalszych pracach selekcyjnych nad kolejnymi kilkoma pokoleniami uzyskuje się rody hodowlane, których homozygotyczność jest bardzo wysoka i mogą być one kandydatami na nowe odmiany (Kang 2002).

Jeśli podczas rozmnażania pierwszych kilku pokoleń nie prowadzi się selekcji, wychodząc z założenia, że nie jest miarodajnym ocenianie roślin wydających segregujące potomstwo, stosuje się metodę ramszów. Dopiero po uzyskaniu względnej homozygotyczności rozpoczyna się selekcję np. od pokolenia F6 w przypadku pojedynczych roślin. Metoda ta jest znacznie mniej pracochłonna. Pierwsze prace selekcyjnie prowadzi się wizualnie, a dopiero w kolejnych pokoleniach ocenia się plon i inne parametry. Rody, podobnie jak w metodzie rodowodowej, stanowiąc będą rozmnożenia jednej lub kilku podobnych do siebie najlepszych linii. Metodę tę stosuje się od początku XX wieku. Uzyskane z jej użyciem odmiany są lepiej przystosowane do lokalnych warunków, gdyż np. w przypadku mrozoodporności spośród wszystkich genotypów przetrwają tylko najodporniejsze. Jest to jednak metoda, dzięki której rejestracja odmiany następuje z reguły później niż w przypadku metody rodowodowej. Metody te nie wykluczają się wzajemnie i bardzo często stosuje się elementy obu jak np. ramsz skrócony przez tylko jedno lub dwa pierwsze pokolenia albo w trakcie lub pod koniec prac nad wyborem rodów. Możliwe jest także naprzemienne stosowanie w kolejnych pokoleniach selekcji i rozmnażania wspólnego (Spiss 2009).

Od lat 70. XX wieku stosuje się także metodę pojedynczych nasion polegającą na wyborze z każdej rośliny tylko jednego nasiona. W kolejnych pokoleniach powtarza się te czynności aż do uzyskania pełnej homozygotyczności. Później dopiero wysiewa się rośliny punktowo w warunkach polowych i prowadzi selekcję, najczęściej od F6. Wtedy, w tej metodzie, dostępne są potomstwa wszystkich roślin z pokolenia F2, ale zmienność genetyczna



w obrębie potomstw jest ograniczona. Zaletą metody jest możliwość otrzymania w jednym roku dwóch, a nawet trzech pokoleń z racji mniejszej ilości materiału do rozmnażania, dzięki czemu prace można prowadzić w warunkach szklarniowych (Simmonds 1987).

Oprócz przedstawionych metod hodowli twórczej, mającej na celu tworzenie nowych odmian, należy wspomnieć również o hodowli zachowawczej, która ma na celu tworzenie dostatecznej ilości materiału siewnego wyhodowanych i zarejestrowanych odmian tak by był on dostępny dla rolników.

### 3.2. Znaczenie podwojonych haploidów w hodowli roślin

Odmiany roślin samopłodnych, w tym owsa, muszą być w pełni homozygotyczne, co w trakcie prac hodowlanych klasycznymi metodami uzyskuje się podczas wielu pokoleń, prowadząc równocześnie selekcję. Możliwe jest także uzyskanie pełnej homozygotyczności poprzez stworzenie haploidów i podwojeniu w nich liczby chromosomów. Dzięki temu uzyskuje się w pełni homozygotyczne pokolenie nie tracąc na skutek niewłaściwej selekcji pożądanych genotypów. Tworzenie nowych odmian metodą podwojonych haploidów znacząco przyspiesza hodowlę roślin, zarówno samo-, jak i obcopłodnych. Organizmy haploidalne, o zredukowanej o połowę liczbie chromosomów, jako element konieczny do wykorzystania korzyści płynących z tej metody, mogą powstawać naturalnie lub ich tworzenie może być indukowane przez człowieka. W hodowli roślin szeroko nie korzysta się z haploidów naturalnych, gdyż apomiksja zachodzi stosunkowo rzadko (Michalik 2009).

Już w latach 20. XX wieku otrzymano linię haploidalną u gatunku bielun dziedzierzawa *Datura stramonium* L.. Została ona nazwana mutantem haploidalnym (Blakeslee i in. 1922). Powstawanie haploidalnych embrionów pierwszy raz zaobserwowano w kulturze *in vitro* u bielunia indiańskiego *Datura inoxia* Mill. już w 1964 roku (Guha i Maheshwari 1964). Odkrycia te zapoczątkowały badania nad ich wykorzystaniem w hodowli roślin. Podwojone haploidy nazywane DH (ang. *doubled haploids*) to rośliny powstałe z roślin haploidalnych, u których sztucznie podwojono liczbę chromosomów. Podwojone haploidy przyspieszają utrwalanie korzystnych genotypów, a w hodowli heterozyjnej zastępują także długotrwały chów wsobny, w wyniku którego uzyskuje się homozygotyczne linie.

Inną metodą otrzymywania haploidalnych roślin jest pobudzenie do rozwoju komórek linii gametofitycznych, u których liczba chromosomów jest haploidalna. Opiera się to na zmianie ich gametofitycznej drogi rozwoju na sporofityczną. Uzyskuje się to poprzez wprowadzenie czynnika stresowego jakim może być podwyższone ciśnienie osmotyczne, niska

lub wysoka temperatura czy pożywka z dodatkiem mannitolu w prekulturyze. Indukcję rozwoju mikrospor nazywa się androgenezą, a jeśli do tworzenia haploidów zostaną użyte komórki gametofitu żeńskiego mamy do czynienia z gynogenezą, gdzie rozwój zarodków zachodzi z haploidalnej komórki woreczka zalążkowego. Następuje to w kulturach niezapłodnionych zalążków, zalążni lub całych kwiatów. Stymulowanie rozwoju gametofitu żeńskiego można dokonać poprzez zapylenie kwiatów pyłkiem obcego gatunku lub pyłkiem o obniżonej żywotności np. poprzez napromieniowanie. Są to procesy indukowanej partenogeny. W procesie androgenyzy wykorzystuje się kultury pylników lub mikrospor. Androgeniza znalazła zastosowanie u wielu gatunków z rodziny psiankowatych *Solanaceae*, wiechlinowatych *Poaceae* czy kapustowatych *Brassicaceae* (Adamski i in. 2009). U zbóż na drodze androgenyzy powstają także osobniki albinotyczne, co ogranicza stosowanie tej metody. Z kolei gynogenezą znalazła zastosowanie u takich gatunków jak burak cukrowy czy cebula pomimo mniejszej wydajności tej metody w porównaniu z androgenezą. Wydajność obu tych procesów zależy od genotypów roślin wyjściowych, fazy rozwojowej gametofitu czy warunków prowadzenia kultury (Michalik 2009; Pluta i in. 2013).

Bez względu na metody stosowane w celu uzyskania haploidów wytwarzanie nowych odmian roślin samopłodnych zostało dzięki nim znacznie przyspieszone. Uzyskuje się stabilną populację roślin z pokolenia F1 składającą się wyłącznie z homozygot reprezentującą wszystkie możliwe rekombinanty. Pozyskane w ten sposób pokolenie DH1 rozmnaża się w szklarni. Początkowo selekcję prowadzi się pod względem ploidalności tak, aby wszystkie osobniki były płodne i zawiązały nasiona. Dalsze pokolenia selekcjonuje się mając na uwadze pożądane cechy użytkowe, głównie wysokość i jakość plonu, ale również może to być np. selekcja odpornościowa. W sprzyjających warunkach już pokolenie DH5 może być zgłoszone do badań rejestrowych jako nowa odmiana, co oznacza, że czas potrzebny na jej wytworzenie może być o ponad połowę krótszy od czasu potrzebnego na wytworzenie odmiany klasyczną metodą rodowodową (Adamski i in. 2009; Michalik 2009).

U zbóż samopłodnych, takich jak owies, linie DH otrzymywane są na dwa sposoby: z wykorzystaniem zjawiska eliminacji chromosomów zachodzącym podczas krzyżowania oddalonego lub drogą androgenyzy z wykorzystaniem kultur pylnikowych lub izolowanych mikrospor. Często metodę podwojonych haploidów nie stosuje się jako główną metodę hodowlaną, a jako uzupełnienie innych, tradycyjnych metod. Krzyżowanie oddalone przebiega w trzech etapach: krzyżowanie z gatunkiem oddalonym, traktowanie kłosów lub wiech hormonami i kultura *in vitro* niedojrzałych zarodków (Surma i in. 2016). Linie

homozygotyczne można również uzyskać z haploidalnych mikrospor, których w pojedynczym pylniku jest wiele. Taka metoda pozyskiwania linii DH jest coraz popularniejsza z racji mniejszej pracochłonności, a za sprawą możliwości uprawy roślin donorowych w warunkach polowych jest również tańsza (Houben in in. 2011). Ponadto nawet połowa powstałych osobników ulega spontanicznemu podwojeniu liczby chromosomów przez co nie wymaga kolchicynowania, co również pozwala obniżyć koszty hodowli i jej pracochłonność. Niestety metoda ta nie jest wysoce efektywna u wszystkich genotypów roślin donorowych (Datta 2005).

### 3.3. Krzyżowanie oddalone zbóż

Rośliny różnych gatunków z reguły nie krzyżują się skutecznie między sobą na skutek działania wielu mechanizmów zabezpieczających. Często jednak czy to naturalnie czy na skutek działalności człowieka dochodzi do powstawania mieszańców. Mogą być one wykorzystywane do tworzenia nowych gatunków roślin, nowych odmian czy linii z wprowadzoną pożądaną cechą niewystępującą u wcześniejszych kreacji (Stefaniak 2004). Prowadzone badania nad nowymi źródłami zmienności bardzo często skupiają się na krzyżowaniu oddalonych od siebie gatunków. Powstające mieszańce międzygatunkowe lub międzyrodzajowe są bardzo cenne, gdyż mogą być źródłami genów odpowiedzialnych za odporność na patogeny czy niekorzystne warunki środowiskowe. Z tego powodu tak często próbuje się dokonywać skutecznych krzyżowań oddalonych. W tym celu należy poznać bariery krzyżowalności i próbować je pokonać. W zależności od momentu działania konkretnej bariery dzieli się je na prezygotyczne i postzygotyczne (Sosnowska 2011).

Bariery prezygotyczne mogą być uwarunkowane genetyczno-fizjologicznie, kiedy to do skutecznego zapłodnienia nie dochodzi z racji niewytworzenia się łagiewki pyłkowej z ziarna pyłku na znamieniu słupka lub jej zamieraniu w szyjce słupka. Przyczyną braku zapłodnienia mogą być także uwarunkowania morfologiczne jak np. wielkość komórek czy budowa anatomiczna, co powoduje, że w pełni wykształcona łagiewka pyłkowa nie sięga do zalążni i nie jest w stanie dostarczyć komórek plemnikowych. Bez względu na uwarunkowania bariery prezygotyczne nie dopuszczają do wytworzenia zygoty (Zenkteler 2007). Bariery postzygotyczne tzw. pozapłodnieniowe obejmują przypadki następujące od syngamii do powstania dojrzałego zarodka. Ich efektem jest zamieranie zarodka albo także jego wykształcenie, które skutkuje późniejszymi nieprawidłowościami jak np. brak kiełkowania nasion czy ograniczona żywotność kolejnego pokolenia prowadząca do zamierania mieszańców (Malepszy 1989). Problemy te mogą także wynikać z nieprawidłowego

wykształcenia się bielma, co uniemożliwia właściwy początkowy wzrost. Nadmierny przerost tkanki somatycznej może z kolei skutkować odcięciem dopływu substancji odżywczej i śmierci zarodka. Przełamywanie poszczególnych barier w hodowli roślin wykonuje się najczęściej w warunkach *in vitro* (Wojciechowski 1985).

W świecie roślin znane są jednak przypadki powstania mieszańców międzygatunkowych bądź międzyrodzajowych. Aby doszło do skutecznego podwójnego zapłodnienia kojarzące się gatunki powinny być ze sobą w znacznym stopniu spokrewnione. W wyniku udanego krzyżowania powstaje pokolenie potomne składające się z pożądaných roślin haploidalnych, które w swoim genomie posiadają jedynie chromosomy rośliny zapylanej, ale także mieszańce, w których pozostaje różna ilość chromosomów formy zapylającej. Jeśli w genomie nowopowstałego mieszańca połączyły się na stałe genomy rośliny zapylanej i zapylającej z wszystkimi chromosomami to powstaje alloplloid. Z kolei w przypadku, gdy tylko niektóre chromosomy włączają się do genomu mamy do czynienia z mieszańcem z częściową introgresją. To czy którekolwiek chromosomy włączą się do genomu mieszańca zależy od stopnia pokrewieństwa gatunków rośliny zapylanej i zapylającej (Spiss 2009).

Krzyżowanie pszenicy z żytem daje mieszańce pszenżyta, które po podwojeniu liczby chromosomów są płodne. Jest to możliwe, ponieważ te dwa gatunki są ze sobą bardzo blisko spokrewnione, należą także do tej samej rodziny traw (wiechlinowate *Poacea*). Krzyżowanie bardziej oddalonej genetycznie wydmuchrzycy groniastej *Leymus racemosus* z pszenicą prowadzi do skutecznego zapłodnienia komórki jajowej i powstania zarodka, ale nie dochodzi do zapłodnienia komórki centralnej i powstania bielma. Dzieje się tak pomimo iż ten gatunek również należy do rodziny wiechlinowatych (Kishii i in. 2004). Podczas krzyżowania niektórych spokrewnionych gatunków dochodzi do całkowitej eliminacji chromosomów formy zapylającej, co skutkuje powstaniem haploidalnych organizmów potomnych. Zjawisko to wykorzystywane jest w hodowli roślin do przyspieszania prac hodowlanych poprzez uzyskiwanie w pełni homozygotycznego pokolenia F<sub>1</sub> i znane jest jako krzyżowanie oddalone (Ishii i in. 2013).

W wyniku wieloletnich badań nad haploidyzacją owsa metodą krzyżowania oddalonego z kukurydzą prowadzonych w Zakładzie Biotechnologii Roślin Instytutu Fizjologii Roślin *im. Franciszka Górskiego* Polskiej Akademii Nauk w Krakowie otrzymano kilkadziesiąt linii DH owsa oraz linie mieszańcowe OMA. Badania prowadzone w IFR PAN dotyczyły

identyfikacji czynników kontrolujących efektywność krzyżowania, wydajności kiełkowania haploidalnych zarodków, a co za tym idzie efektywnej produkcji linii DH.

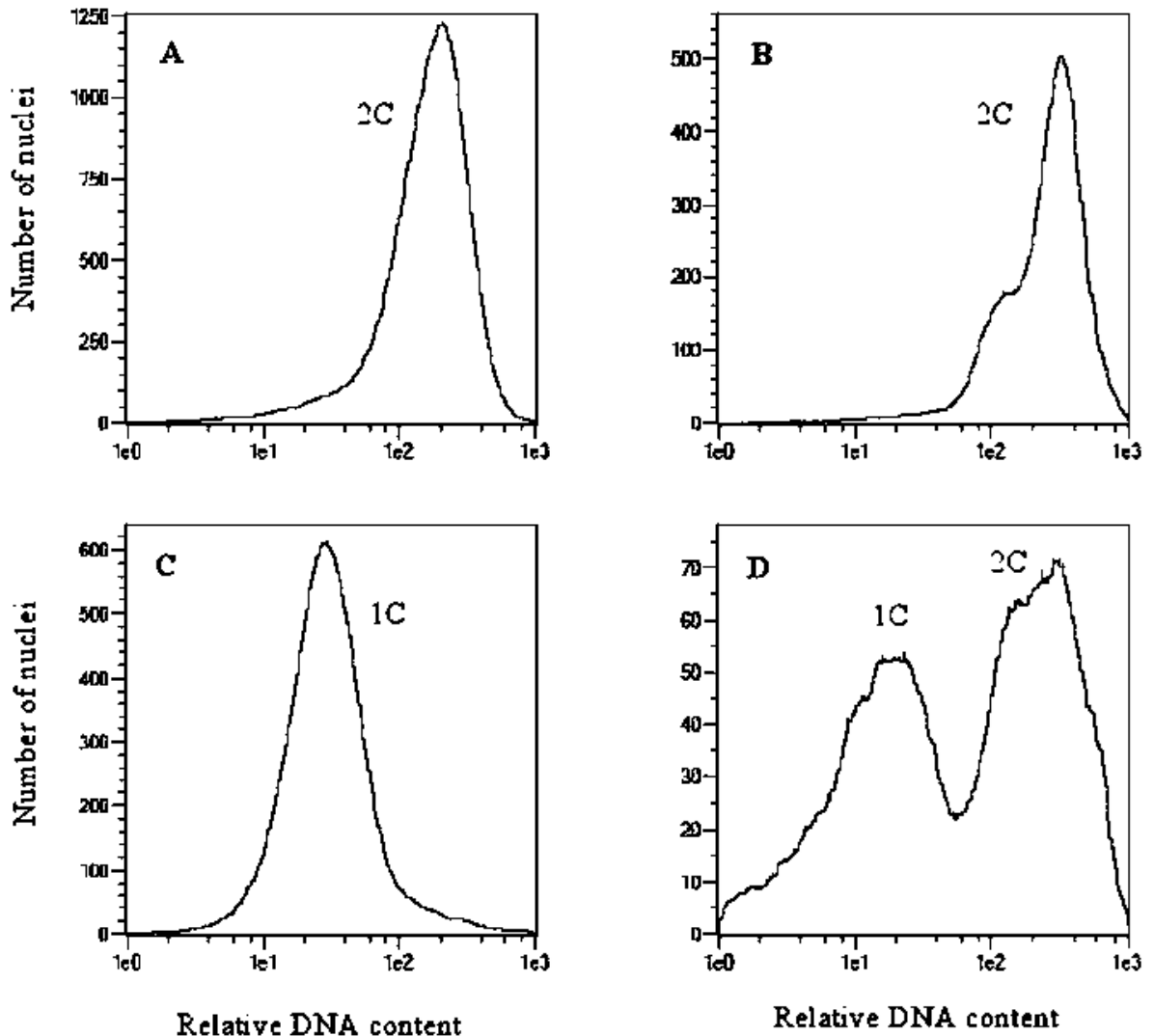
W pierwszych doświadczeniach określono optymalny czas pomiędzy kastrowaniem kwiatków, zapyleniem kukurydzą i traktowaniem załączni auksyną, wybrano również odpowiedni termin izolacji haploidalnych zarodków. Dodatkowo testowano efektywność zapylenia załączni owsa pyłkiem sorga lub prosa oraz skuteczność kolchicyny w podwajaniu liczby chromosomów (Marcinińska i in. 2013; Nowakowska i in. 2015). Celem eksperymentów przedstawionych w pracy Warchoł i in. (2016) było ustalenie, jaką auksynę należy zaaplikować na załącznię po usunięciu pylników i zapyleniu pyłkiem kukurydzy, aby zaindukować rozwój haploidalnego zarodka, natomiast Juzoń i in. (2022) badali, jak dwa stężenia 2,4-D różnicują indukcję zarodków. Ze względu na niską konwersję uzyskanych zarodków owsa do roślin postanowiono wprowadzić czynniki wspomagające proces ich kiełkowania i regeneracji. W celu podniesienia efektywności rozwoju haploidalnych zarodków owsa poddano optymalizacji skład pożywki w kulturach *in vitro* (Warchoł i in. 2018) oraz badano korelacje między zdolnością kiełkowania haploidalnych zarodków owsa w zależności od ich wielkości i stadiów rozwojowych (Noga i in. 2016). W celu poznania przyczyn słabego tempa kiełkowania zarodków owsa podjęto również badania nad zawartością fitohormonów w załączniach podczas rozwoju zarodków oraz analizowano profile hormonalne zarodków zygocyticznych i haploidalnych owsa (Dziurka i in. 2019; Dziurka i in. 2022). W pracy Skrzypek i in. (2016) wykazano rolę intensywności światła zastosowanego *in vivo* do inicjacji zarodków oraz *in vitro* do regulacji ich rozwoju. Kolejne badania dotyczyły identyfikacji częściowych mieszańców owsa z kukurydzą (Skrzypek i in. 2018) oraz zobrazowania architektury jądra linii OMA (Idziak-Helmcke i in. 2020). Przeprowadzono również charakterystykę fizjologiczną powstałych na drodze krzyżowania oddalonego linii DH, badając zależności pomiędzy parametrami fluorescencji chlorofilu *a* a elementami struktury plonu (Noga i in. 2017), natomiast w pracy Juzoń i in. (2020) opisano szczegółowo funkcjonowanie aparatu fotosyntetycznego w odpowiedzi na stres suszy glebowej u linii OMA.

### 3.3.1. Wykrywanie mieszańców owsa z kukurydzą i badanie introgresji

Opracowano kilka metod w celu sprawdzenia czy powstałe linie DH zawierają również materiał genetyczny formy zapyłającej. Jedną z nich polega na ustaleniu sekwencji markerowych elementów charakterystycznych tylko dla materiału genetycznego formy zapyłającej, który w przypadku czystych linii DH powinien być całkowicie wyeliminowany. Analogicznie można przygotować startery na sekwencje charakterystyczne dla konkretnych

chromosomów formy zapyłającej, jeśli konieczne jest szczegółowe określenie, które elementy genomu zostały włączone.

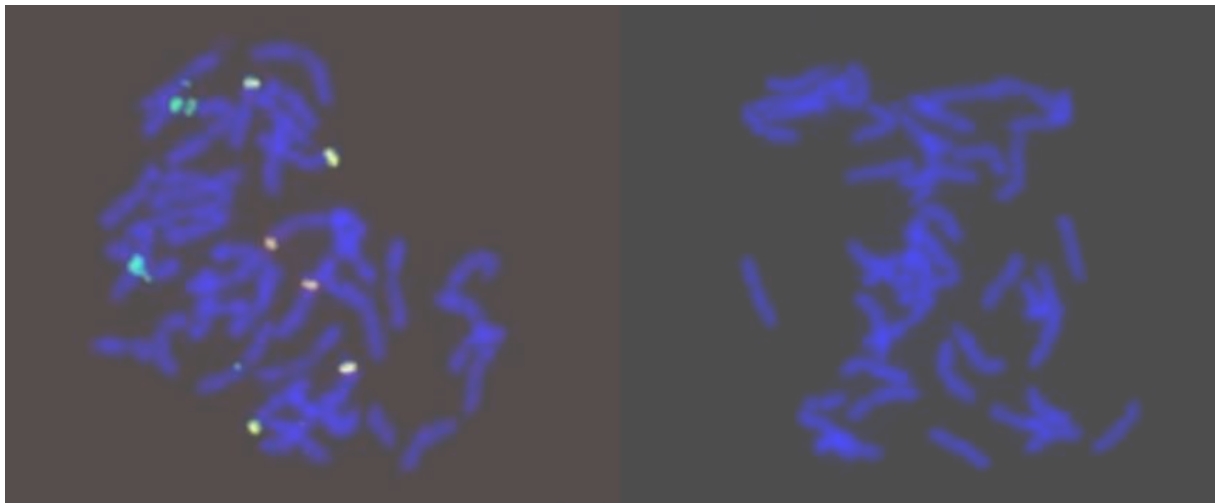
W celu sprawdzenia ploidalności roślin można użyć cytometru przepływowego. Analizując wyniki porównuje się poszczególne linie DH z odmianami o znanej ploidalności (Rycina 4) (Noga i in. 2016). Metodą cytogenetyczną wykorzystywaną do wykrywania mieszańców może być natomiast hybrydyzacja GISH (Skrzypek i in. 2018).



Rycina 4. Histogramy z cytometru przepływowego roślin owsa: A – kontrola (2n), B – podwojony haploid (2n), C – haploid (1n), D – miksoploid (Skrzypek i in. 2018)

Najczęściej wykorzystywanym gatunkiem do otrzymywania podwojonych haploidów zbóż metodą krzyżowania oddalonego jest kukurydza. Zawiera ona w swoim genomie 10 chromosomów, które składają się łącznie z 2,671 mln par zasad. Tak jak u innych organizmów wyższych wiele genów jest zduplikowanych. Ponadto liczne sekwencje charakteryzują się występowaniem powtarzalnych elementów w swojej budowie tj. ruchome

elementy genomu: retrotranspozony lub sekwencje telomeryczne (SanMiguel i in. 1996). Znajomość genomu kukurydzy i często reprezentowanych na każdym chromosomie sekwencji powtarzalnych pozwala na stwierdzenie obecności chromosomów kukurydzy u mieszańców powstałych na drodze krzyżowania oddalonego dzięki użyciu starterów do detekcji sekwencji Grande 1 będącej retrotranspozonom (Bennetzen i in. 1994). Po stwierdzeniu obecności chromosomów kukurydzy w genomie mieszańców można za pomocą markerów SSR (ang. *Simple Sequence Repeats*) określić szczegółowo, który z 10 chromosomów kukurydzy został włączony do genomu. Z kolei dzięki hybrydyzacji GISH (ang. *genomic in situ hybridization*) można oprócz stwierdzenia samej introgresji zwizualizować ją graficznie i określić liczbę włączonych chromosomów (Rycina 5) (Idziak-Helmcke 2020).



Rycina 5. Wizualizacja chromatyny kukurydzy w genomie owsa z wykorzystaniem genomowej hybrydyzacji *in situ* (GISH): po lewej stronie mieszańca (kolor zielony – genomowy DNA kukurydzy), po prawej owies odmiany Bingo (Juzoń i in. 2020)

### 3.4. Znaczenie stresu suszy w produkcji roślinnej

Woda jest niezbędna do wzrostu i rozwoju roślin. Pobierana przez korzenie, a następnie transportowana do liści i transpirowana do atmosfery pełni w tym czasie wiele funkcji, między innymi transportując związki mineralne i organiczne, wypełniając komórki czy utrzymując turgor. Źródłem wody dla roślin są opady atmosferyczne oraz podsiąk kapilarny z lustra wody gruntowej. Ze względu na siły wiązania wody gruntowej wyróżnia się jej kilka rodzajów. Wody grawitacyjne występujące w glebie po opadach są dostępne dla roślin, ale tylko przez krótki okres po opadach, a ich wykorzystanie jest niskie. Wody kapilarne związane są z różną siłą w kapilarach różnej średnicy, są łatwo dostępne dla roślin i dlatego stanowią jej główne źródło. Pozostałą częścią wody glebowej jest woda higroskopowa, która jest wiązana w porach glebowych z dużą siłą przez co jest niedostępna dla roślin (Woś 2002).

Najważniejszą przyczyną powstawania strat w uprawie roślin jest występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych. Jednym z nich jest susza, która w ostatnich dekadach występuje z coraz większym nasileniem. Przyczyną powstawania okresów suszy jest nie tylko całkowity brak występowania opadów atmosferycznych w dłuższym okresie, ale także występowanie opadów atmosferycznych w niewystarczającej ilości tj. wysokość opadów jest niższa od ewapotranspiracji, czyli ilości wody transpirowanej przez rośliny (transpiracja) oraz wyparowanej z gruntu (ewaporacja). Wpływ na wystąpienie suszy ma także przebieg temperatur w poszczególnych latach, co jest związane z porami roku i kolejnymi sezonami wegetacyjnymi (Lal i in. 2012). Każda roślina użytkowana rolniczo posiada w trakcie sezonu wegetacyjnego okres krytycznego zapotrzebowania na wodę. Wynikają z tego różne reakcje na okresowe niedobory wody. Inna jest reakcja zbóż ozimych i jarych na suszę wiosenną, a inna na suszę letnią. Trudnym do rozpoznania jest moment rozpoczęcia okresu suszy, gdyż jej początkowe stadia nie uwidaczniają się na roślinach.

W zależności od długości trwania okresu niedostatecznego występowania opadów wyróżnia się 4 rodzaje suszy. Susza atmosferyczna, zwana również meteorologiczną, to pierwszy etap rozwoju suszy. Niedostatek opadów powoduje ograniczenie zasobów wody w glebie. Rośliny korzystają z wody dostępnej w głębszych warstwach gleby dzięki procesowi podsiąkania (Dai 2011). Gdy woda kapilarna ulega wyczerpaniu rozpoczyna się susza glebowa nazywana także rolniczą. Skutkuje ona wystąpieniem stresu wodnego u roślin, co uwidacznia się w ich pokroju i przynosi spadek przyrostu biomasy, co przekłada się na niższe plony rolnicze roślin. Susza glebowa jest konsekwencją przedłużania się okresu trwania suszy meteorologicznej, ale na różnych glebach przy takim samym rozkładzie opadów atmosferycznych moment jej wystąpienia jest różny, gdyż różne są zdolności gleby do magazynowania wody. Gleby bardzo lekkie i lekkie mają najniższe pojemności wodne przez co rośliny na nich muszą w największym stopniu korzystać z bieżących opadów atmosferycznych. Efekty suszy na roślinach rosnących na glebach ciężkich uwidaczniają się zdecydowanie najpóźniej (Smorowska 2009). Przedłużający się okres występowania suszy rolniczej prowadzi do obniżenia się poziomów wód powierzchniowych obserwowany głównie w rzekach i jeziorach. Poziomem referencyjnym są średnie poziomy wód z wielolecia. To zjawisko nazywane jest suszą hydrologiczną lub niżówką hydrologiczną. Gdy utrzymuje się długotrwale prowadzi także do obniżenia poziomu wód podziemnych. W pierwszej kolejności jest to możliwe do zaobserwowania poprzez wysychanie studni.



Susza przynosi straty w plonie zbóż poprzez zmniejszenie liczby płodnych kłosów, ziarniaków w kłosie i gorsze wypełnienie ziarna (niższa masa tysiąca ziaren). Rośliny zbożowe dzieli się na ozime oraz jare i ten podział implikuje jakie wiosenne miesiące są krytyczne, jeśli chodzi o zapotrzebowanie na wodę. Ozime zboża po starcie wiosennej wegetacji mogą przejść krótki okres dokrzewienia albo od razu rozpoczynają fazę strzelania w źdźbło. Z reguły warunki suszowe w tym okresie występują rzadko z racji zapasów wody w glebie zgromadzonych zimą. Zboża jare po wysiewie wczesną wiosną potrzebują więcej czasu by przejść do krytycznej fazy strzelania w źdźbło, co przekłada się na większe ryzyko strat związanych z suszą występującą na skutek braku opadów po wyczerpaniu się zapasów wody w glebie (Oleksiak i in. 2021). Krytyczną fazą rozwojową jest także nalewanie ziarna, ponieważ brak wody w tej fazie szczególnie mocno uwidacznia się w gorszym wypełnieniu ziarna, czyli spadku masy tysiąca ziaren. Dotyczy to zarówno zbóż ozimych, jak i jarych (Barnabás i in. 2008). Hodowla roślin w obszarach regularnie występujących susz późnowiosennych dostarcza wczesne odmiany zbóż, które możliwie wcześnie rozpoczynają krytyczne fazy zapotrzebowania na wodę by przejść przez nie przed rozwinięciem się długotrwałych warunków suszowych (Shakhatreh i in. 2001). Badania jęczmienia ozimego nad wpływem suszy występującej w trakcie nalewania ziarna wykazują obniżenie plonu o nawet ponad 80% zarówno w warunkach szklarniowych, jak i polowych (Samarah i in. 2009).

Problem suszy dotyczy zarówno regionów wysoce zaawansowanych rolniczo, jak i dysponujących rolnictwem bardziej ekstensywnym o nierozwiniętej kulturze rolnej. Szacuje się, że zbiory pszenicy na świecie w latach 1980-2008 mogłyby być wyższe o 5,5% gdyby nie problem suszy. Poszczególne gatunki roślin uprawiane są w specyficznych dla danych regionów warunkach przy właściwym wyborze odmian dostosowanych do lokalnych potrzeb i wymagań. Z tego względu niektóre gatunki roślin w aspekcie globalnym są bardziej narażone na straty plonów w wyniku suszy, a inne mniej. W analizowanym okresie zbiory kukurydzy mogłyby być wyższe o 3,8%, co wynika z innych wymagań klimatycznych tej rośliny i bardziej oszczędnego gospodarowania zasobami wodnymi w sprzyjających warunkach (Lobell i in. 2011).

Uprawa gatunków roślin na nowych stanowiskach w rejonach, gdzie wcześniej nie były uprawiane staje się coraz bardziej popularna. Wzrastające powierzchnie upraw kukurydzy (np. w Polsce) wynikają z jej wysokiego potencjału plonowania i dobrych zdolności adaptacyjnych, co zawdzięcza przeprowadzaniu fotosyntezy typu C4, która okazuje się być skuteczniejsza w obecnych warunkach niż jeszcze kilka dekad temu. Prowadzi to jednak do

większego narażenia upraw kukurydzy na stres suszy niż w warunkach rejonów jej pierwotnej uprawy. Kompilacja wyników 144 badań dostarczyła informacji o średnich spadkach plonów kukurydzy o 39%, podczas gdy pszenicy o 20%. Zmiany klimatyczne mogą spowodować, że problem suszy może rozwinąć się na jeszcze większe obszary, a jej skutki mogą być bardziej dotkliwe (Daryanto i in. 2016).

Susza glebowa jest monitorowana w Polsce przez Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach – Państwowy Instytut Badawczy. Rosnące znaczenie gospodarcze suszy w Polsce zostało dostrzeżone i zaowocowało stworzeniem Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR) prowadzonego przez ten właśnie Instytut. System ten ma za zadanie wskazywać obszary, w których wystąpiła susza rolnicza powodująca przeciętne straty na poziomie minimum 20% w 14 roślinach lub grupach roślin rolniczych. Owies należy do grupy roślin – zboża jare. W części roku trwającej od trzeciej dekady marca do końca września wyodrębnia się tzw. okresy sześciodekadowe obejmujące 6 następujących po sobie dekad. Pierwszy okres trwa od 21.03 do 20.05, drugi od 01.04 do 31.05, trzeci od 11.04 do 10.06 itd.. Dla każdego gatunku lub grupy roślin rolniczych wyliczone zostały wartości progowe KBW (klimatyczny bilans wodny) w okresach, w których trwa ich wegetacja – jest to kryterium suszy. KBW wylicza się według poniższego wzoru:

- $KBW = P - ETP$

gdzie:

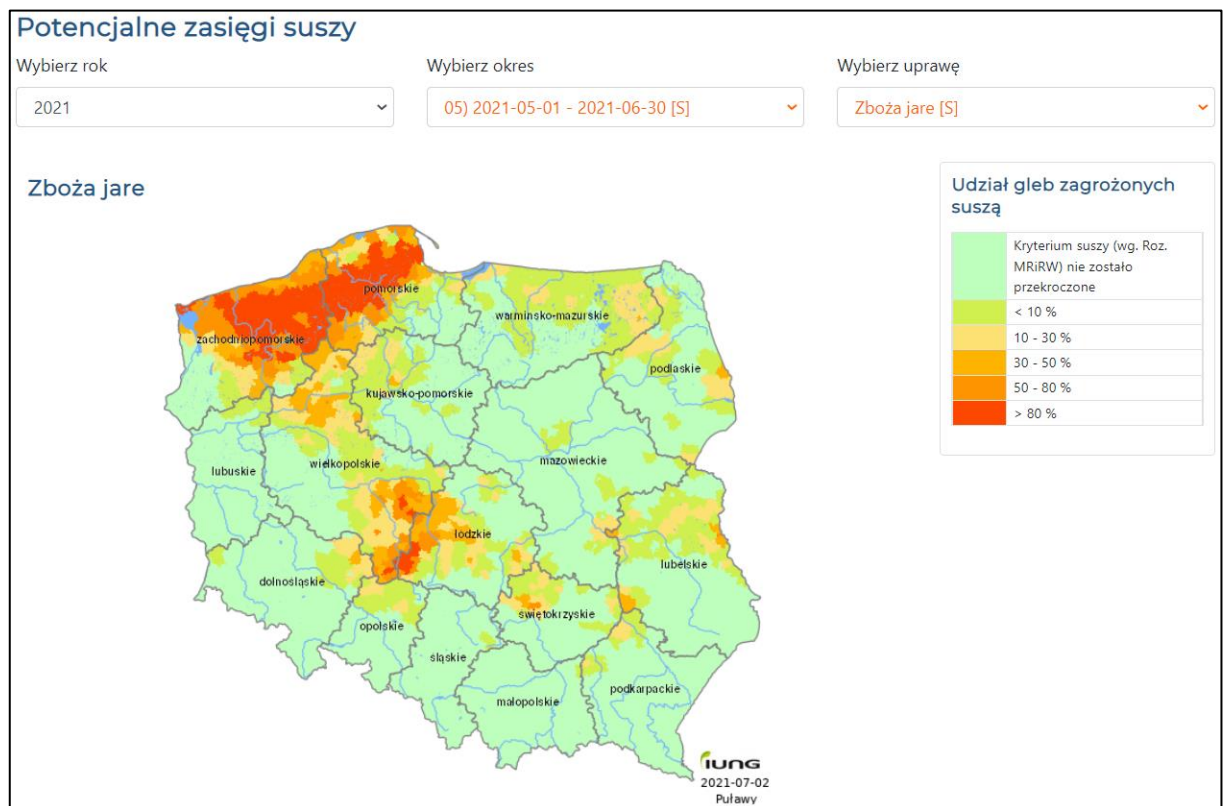
KBW – klimatyczny bilans wodny [mm],

P – opad atmosferyczny [mm],

ETP – ewapotranspiracja potencjalna [mm].

Na tej podstawie prezentowane są potencjalne zasięgi suszy dla wszystkich gmin w Polsce z uwzględnieniem procentowego poziomu przekroczenia kryterium suszy (Rycina 6). Na podstawie SMSR powstaje wiele raportów i publikacji traktujących o suszy i płynących z niej zagrożeniach dla produkcji rolniczej (Doroszewski i in. 2014). Występowanie suszy rolniczej wiąże się ze stwierdzeniem co najmniej 20% zmniejszonego plonowania. W latach 2006-2017 susza występowała nawet dziesięciokrotnie w województwie dolnośląskim, a 9 razy w województwach wielkopolskim, mazowieckim, łódzkim, kujawsko-pomorskim i opolskim. W 2006 roku obszar zasięgu suszy w uprawie zbóż jarych objął 53,4% powierzchni gruntów ornych w Polsce. Najczęściej susza rolnicza obserwowana jest na glebach lekkich i bardzo

lekkich, rzadziej na średnich i ciężkich. Tylko w latach 2006, 2008 i 2011 suszę rolniczą stwierdzono na glebach wszystkich kategorii agronomicznych (Wójcik i in. 2019).



Rycina 6. Mapa zagrożenia suszą z Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej dla zbóż jarych w terminie 01.05-30.06.2021 (źródło: SMSR, IUNG Puławy, <https://susza.iung.pulawy.pl/> (dostęp 28.03.2022))

Bazując na dostępnych od 1961 roku danych pogodowych dla 6 specyficznych klimatycznie regionów Polski można obserwować wpływ suszy na plon uwzględniając ciągły postęp hodowlany (Doroszewski i in. 2012). Każdego roku obserwuje się dłuższe okresy bez deszczu, co skutkowało dotychczas występowaniem suszy co 5-6 lat, natomiast co 10-11 lat skutki suszy były dużo bardziej dotkliwe. Ważne z gospodarczego punktu widzenia uprawiane w Polsce zboża (pszenica i jęczmień) występują zarówno w formach ozimych i jarych. Bardziej tolerancyjne na suszę wiosenną są zboża ozime, a ponadto z racji wydłużonego okresu wegetacyjnego z reguły plonują lepiej od form jarych, ale formy jare także są często uprawiane. Wynika to między innymi z właściwości form jarych (np. jęczmień browarniany to wyłącznie formy jare) czy braku możliwości wysiewu zboża ozimego we właściwym terminie agrotechnicznym z racji układu roślin w płodozmianie (Łabędzki i Leśny 2008). Owies w Polsce uprawiany jest jedynie w formie jarej, co ma przełożenie na jego okresy krytycznego zapotrzebowania na wodę, które są typowe dla tej grupy roślin rolniczych.

Obserwacje skutków suszy oddziałującej na uprawy pszenicy ozimej i jarej pozwala zauważyć istotny wpływ suszy na plony ziarna w poszczególnych regionach. Równocześnie od 1961 roku obserwuje się stały wzrost temperatury oraz spadek miesięcznych sum opadów szczególnie w istotnych w sezonie wegetacyjnym miesiącach: kwietniu, maju i czerwcu. Szczególnie istotne zmiany zachodzą w regionie nr III obejmującym województwo lubuskie, wielkopolskie i kujawsko-pomorskie. Zmiany klimatyczne, wyrażane średnimi temperaturami i miesięcznymi sumami opadów są tam najwyższe, a spadek plonu w przypadku suszy jest bardzo istotny zarówno u pszenicy ozimej, jak i jarej (Oleksiak i in. 2021).

### 3.5. Fizjologiczno-biochemiczne reakcje roślin na suszę

#### 3.5.1. Test utraty wody

Na skutek stresu suszy zmienia się zawartość wody w liściach. W warunkach optymalnych zawartość wody jest wystarczająca do przeprowadzania procesów życiowych przez rośliny. Sprzyja temu także właściwe stężenie soku komórkowego w cytozolu. Otwieranie i zamykanie aparatów szparkowych reguluje wymianę z otoczeniem wpływając na zawartość wody. Ich nieprawidłowe funkcjonowanie zaburza właściwą reakcję na pierwsze symptomy niedoboru wody w środowisku (Farooq i in. 2009).

Rośliny przystosowane do tolerowania długotrwałych niedoborów wody wykształciły dwie strategie. Sukulenty gromadzą w specjalnej tkance zapasy wody, natomiast sklerofity przystosowały się do długo utrzymujących się warunków suszy poprzez wykształcenie rozbudowanych systemów korzeniowych, ograniczenie transpiracji i mniejsze zużywanie wody w procesach życiowych. Naturalnie duża zawartość wody w liściach bądź jej minimalne spadki w trakcie suszy świadczą w dużym stopniu o zdolnościach adaptacyjnych konkretnych genotypów do trudnych warunków niedoboru wody (Lafitte 2002).

Test utraty wody wykorzystywany jest w badaniu odporności roślin różnych gatunków na suszę. Wartości testu mówią jaka część zawartej w świeżej masie liści woda z nich odparuje przez pierwsze 3 lub 6 godzin po ścięciu. Test ten nadaje się do wstępnej selekcji genotypów o lepszej odporności na stres suszy. Im niższe wartości procentowej utraty wody tym genotyp ma większe możliwości lepszego przetrwania warunków stresowych. Wartości testu utraty wody są ujemnie skorelowane z plonem ziarna (Czyczyło-Mysza i in. 2018).

Wiele czynników wpływa na szybkość oddawania wody przez liście. Są to przede wszystkim różnice gatunkowe, ale także występowanie kutikuli lub wosków na powierzchni

liści, podatność pewnych genotypów, naturalne przystosowania czy zaadaptowanie do warunków suszy. Test utraty wody jest także przydatny jako uzupełnienie innych parametrów w trakcie selekcji genotypów i badania odporności na stres suszy (Kumar i Sharma 2006; Lugojan i Ciulca 2011).

### 3.5.2. Zawartość cukrów rozpuszczalnych

Węglowodany zbudowane są z atomów węgla, tlenu i wodoru. Występujące pojedynczo cząsteczki węglowodanów to cukry proste, jak np. glukoza czy fruktoza. Gdy jedną cząsteczkę węglowodanu tworzy kilka mniejszych mówimy o oligosacharydach, jak np. sacharoza. Wielocukry takie jak skrobia, glikogen czy celuloza to polisacharydy zbudowane z wielu cząsteczek cukrowych. Każdy rodzaj węglowodanów pełni w roślinach istotne role np. stanowiąc zapas energii, pełniąc funkcje sygnałowe czy regulacyjne, wpływając na utrzymanie turgoru czy powodując otwieranie i zamykanie aparatów szparkowych (Thomas 1997).

W warunkach zwiększającego się niedoboru wody wydajność wszystkich procesów w roślinie jest zagrożona. Rośliny wykazujące większą tolerancję na stres suszy radzą sobie lepiej, gdy spada ciśnienie wewnątrzkomórkowe na skutek utraty wody. Zależy to w dużym stopniu od stężenia soku komórkowego w cytozolu. Kluczowymi jego składnikami są cukry rozpuszczalne, których akumulacja jest skorelowana z odpornością na stres suszy (Hoekstra i Buitink 2001). Gromadzenie zapasów cukrów jako przygotowanie roślin na stres niedoboru wody zaobserwowano u wielu bardzo różnych gatunków, jak np. trawy czy ziemniak (Stitt i Hurry 2002; Boguszevska 2007). Magazynowanie dużych ilości węglowodanów może hamować proces fotosyntezy stymulując jednocześnie proces oddychania. Ponadto ich zapas może być wykorzystany po ustąpieniu suszy jako źródło łatwo dostępnego węgla (Paul i Pellny 2003).

Stężenie cukrów rozpuszczalnych w soku komórkowym stanowi bezpośrednią reakcję na dany stresor. Funkcje niektórych cukrów mogą odpowiadać za pośrednią reakcję, jak np. indukowanie ekspresji niektórych genów odpowiedzialnych za odporność roślin czy bycie prekursorami wielu substancji obronnych syntetyzowanych w roślinie na skutek stresu. Heksokinazowa transdukcja sygnału, za którą odpowiadają heksozy, aktywuje wiele genów, dzięki czemu wzrasta produkcja peroksydazy czy białek PR (ang. *patogen related*) (Herbers i in. 1996). Rola cukrów rozpuszczalnych w roślinie jest także niezwykle istotna w przypadku stresów biotycznych. Wpływając na zmiany potencjału wodnego w komórkach

zainfekowanych patogenem ograniczają jego rozwój. Wykazano np. wyższą odporność traw na pleśń śniegową przy niskiej zawartości wody, a wysokim stężeniem cukrów rozpuszczalnych w komórkach (Farrar 1989; Yoshida i in. 1997).

### 3.5.3. Zawartość białek i związków fenolowych

W wyniku zaistniałego czynnika stresowego w roślinach indukowana jest synteza różnego rodzaju związków, które uczestniczą we właściwej reakcji mającej na celu ograniczenie jego szkodliwego wpływu. Syntetyzowanymi związkami mogą być specyficzne dla danego stresora białka. W trakcie stresu suszy występują białka szoku cieplnego HSP (ang. *heat shock proteins*) czy dehydryny, czyli białka LEA (ang. *late embryogenesis abundant*). W odpowiedzi na stesy biotyczne syntetyzowane są np. białka PR (ang. *pathogenesis related*) odpowiedzialne między innymi za reakcję nadwrażliwości, która odcina miejsce infekcji od zdrowej tkanki (Woloshuk i in. 1991).

Istotnymi związkami chemicznymi, których ilość występująca w roślinach jest w trakcie wegetacji różna i zależy w dużym stopniu od czynników stresowych, są związki fenolowe. Jest to bardzo różnorodna grupa produktów wtórnych, których częścią wspólną w budowie chemicznej jest pierścień aromatyczny i związane bezpośrednio z atomami węgla, z których się składa, grupy hydroksylowe. Związki fenolowe dzieli się na fenole proste oraz złożone będące ich pochodnymi. Powszechnie występujące u roślin fenole proste to np. kumaryny, wanilina, kwas kawowy, kwas salicylowy czy fenylopropanoidy, czyli kwas cynamonowy i jego pochodne. Kumaryny to inhibitory kiełkowania nasion, hamują także podziały komórkowe. Pełnią również funkcje ochronne przed zwierzętami roślinożernymi wpływając na smak i zapach roślin. Związki fenolowe w wydzielinach korzeniowych mają znaczący wpływ na zjawisko allelopatii. Wydzielana przez rośliny owsa skopoletyna przerywa cykle rozmnażania wielu szkodników i chorób roślin zbożowych. Z tego względu owies uznawany jest za roślinę fitosanitarną, poprawiającą stanowisko w płodozmianach zbożowych (Rejowski i Grzesiuk 1967). Z kolei polimery fenylopropanoidów, jak lignina i suberyna, wysycają ściany komórkowe korka – wtórnej tkanki okrywającej.

Dużą grupę fenoli złożonych stanowią taniny zwane także garbnikami oraz flawonoidy. Pełnią głównie funkcje ochronne stanowiąc trucizny i repelenty chroniące przed patogenami i szkodnikami. Właściwości toksyczne fenoli polegają m.in. na denaturacji białek. Antocyjany, flawonole i flawony to poszczególne grupy flawonoidów stanowiące większość znanych grup związków fenolowych. Absorbowanie różnych spektrów światła widzialnego powoduje

występowanie różnych barw części nadziemnych roślin, głównie liści. Oprócz zdolności wabienia owadów zapylających, wynikającą z właściwości flawonoidów, ich zaletą jest także ochrona przed promieniowaniem nadfioletowym. Zwiększone zawartości związków fenolowych jako odpowiedź rośliny na stres przyczyniają się także do neutralizowania reaktywnych form tlenu (ROS), które często są najszybszą reakcją i efektem działania stresora (Parus 2013).

#### 3.5.4. Zawartość barwników fotosyntetycznych

Pod pojęciem barwników fotosyntetycznych (asymilacyjnych) rozumie się grupę organicznych związków chemicznych, które w komórkach są w stanie odgrywać kluczową rolę w procesie fotosyntezy. U roślin występują chlorofile oraz barwniki wspomagające, jak np. karotenoidy. Chlorofile w roślinach wykorzystują światło o długości fali od 400 do 700 nm. Zakres ten nazywany jest promieniowaniem fotosyntetycznie czynnym PAR (ang. *photosynthetically active radiation*). Chlorofil *a* wykazuje maksimum absorpcji przy długości fali światła 430 i 662 nm, natomiast chlorofil *b* przy 453 i 642 nm. W zakresie światła barwy zielonej absorpcja jest mniejsza czemu rośliny zawdzięczają swoją barwę. Od zawartości chlorofili w roślinach, ich rozmieszczenia w chloroplastach oraz połączenia z karotenoidami i białkami w fotosystemy zależy przebieg fazy świetlnej fotosyntezy, która jest jej pierwszym etapem (Chaves i in. 2009).

Całkowita zawartość chlorofilu w roślinie jest skorelowana z wiekiem rośliny i jej kondycją. Mniejsze ilości wszystkich barwników fotosyntetycznych obserwowane są w warunkach stresowych oraz w późnych fazach rozwojowych. Obserwowanie intensywnie zielonej barwy organów nadziemnych w trakcie trwania całego okresu wegetacyjnego u roślin rolniczych może oznaczać dobre zaopatrzenie w asymilaty i wykształcenie wartościowego plonu (Vijayalakshmi i in. 2010).

Oprócz chlorofili, które w roślinach pełnią funkcje podstawowych barwników fotosyntetycznych, w roślinach występują barwniki dodatkowe oraz wspomagające. Spośród nich u roślin wyższych istotne funkcje pełnią karotenoidy, do których zalicza się karoteny i ksantofile. Ich obecność w liściach nie jest widoczna z racji maskowania typowych dla nich pomarańczowych, żółtych i brunatnych barw przez znacznie większe ilości chlorofilów. W przypadku innych organów, w których występują, ich większe ilości można obserwować w postaci np. pomarańczowej barwy korzeni marchwi. Karotenoidy absorbują promienie świetlne w zakresie światła barwy niebieskiej i fioletowej, którą przekazują w stanie

wzbudzonym chlorofilom lub rozpraszają nadmiar energii przy dużym nasłonecznieniu, chroniąc tym samym aparat fotosyntetyczny przed uszkodzeniami. W trakcie fotosyntezy pełnią istotne role ochronne także przed reaktywnymi formami tlenu, które powstają jako produkt uboczny tego procesu. Na fotooksydację narażone są głównie chloroplasty, w których występują podatne kwasy tłuszczowe (Hashimoto i in. 2016).

### 3.5.5. Badanie fluorescencji chlorofilu *a*

Niedobór niezbędnej do prawidłowego przebiegu wszystkich procesów życiowych wody w roślinach prowadzi do szeregu reakcji skutkujących ich mniejszą produktywnością. Wynika ona bezpośrednio z mniejszej wydajności fotosyntezy. Często jest ona hamowana poprzez uszkodzenie fotosystemu PSII. W normalnych warunkach większość (około 80%) zaabsorbowanej przez chlorofile energii jest wiązana w NADPH i ATP, ale część ulega wypromieniowaniu w postaci fluorescencji (2-10%) i ciepła (Lichtenthaler i in. 1986). W warunkach stresowych skuteczność wiązania energii spada – jej nadmiar jest rozpraszany i możliwy do obserwowania w postaci fluorescencji.

Emisja fluorescencji zanika po  $10^{-8}$  sekundy od końca emisji czynnika pobudzającego. Reakcja roślin na stres suszy, jaką są zmiany w fluorescencji chlorofilu, są obserwowane jako jedne z pierwszych, dużo wcześniej niż zmiany będą widoczne np. w pokroju rośliny (Papageorgiou i Govindjee 2011). Z tego powodu metoda pomiaru fluorescencji chlorofilu znajduje zastosowanie w wielu badaniach nad reakcjami roślin na stresy zarówno abiotyczne, jak i biotyczne. Dużym ułatwieniem w stosowaniu tych pomiarów jest nieinwazyjność metod, a niewielkie rozmiary aparatury umożliwiają pomiary w warunkach polowych (Hura i in. 2009; Soltys-Kalina i in. 2016).

Metodyka pomiaru przy pomocy ręcznych urządzeń opiera się na przetrzymaniu przez co najmniej 20 minut fragmentu blaszki liściowej w ciemności. Po takim okresie po oświetleniu liścia fluorescencja bardzo szybko od wartości podstawowej  $F_0$  osiąga wartość maksymalną  $F_m$ . Wraz z wszczęciem procesu fotosyntezy po okresie ciemności rozpoczyna się powolny spadek fluorescencji do jej stacjonarnego stanu. Maksymalna wydajność kwantowa PSII ( $F_v/F_m$ ) ulega zmniejszeniu na skutek różnych czynników stresowych uszkadzających PSII co zmniejsza efektywność transportu elektronów. Tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS ( $ET_o/CS$ ) również ulega zmniejszeniu na skutek stresów. Wskaźnik funkcjonowania PSII (PI) także opisuje reakcje roślin na otaczające warunki. W dużym stopniu jest on skorelowany



z dostępnością wody i występowaniem warunków suszowych (Maxwell i Johnson 2000; Hura i in. 2009).

#### 3.5.6. Analiza elementów plonu i biomasy

Najważniejszym z produkcyjnego punktu widzenia parametrem opisującym rośliny owsa jest plon ziarna, na który składa się liczba kłosów na jednostce powierzchni, liczba ziarniaków w kłosie oraz wypełnienie ziarna. Na skutek stresu wartości tych parametrów opisujących plon ulegają obniżeniu. Na poszczególne elementy plonu wpływ stresorów jest różny w zależności od momentu wystąpienia czynnika stresowego. W przypadku zbóż jarych wczesne susze wpływają na liczbę płodnych rozkrzewień, a wraz z rozwojem sezonu wegetacyjnego, gdy kształtowane są następne elementy plonu, pogorszeniu ulegają: liczba ziarniaków w kłosie, a także wypełnienie ziarna, szczególnie przy suszach późnowiosennych oraz letnich.

## 4. CEL PRACY

Celem pracy było zbadanie wybranych parametrów fizjologicznych, biochemicznych oraz agronomicznych linii OMA owsa powstałych na drodze krzyżowania oddalonego z kukurydzą w warunkach suszy glebowej i na tej podstawie wytypowanie linii najlepiej przystosowanych do wzrostu i rozwoju w warunkach niedoboru wody.

Główny cel pracy zrealizowano za pomocą celów szczegółowych, przypisanych do poszczególnych zadań badawczych:

- a) Wykrycie mieszańców owsa z kukurydzą w grupie roślin pochodzących z krzyżowania oddalonego z zastosowaniem metod molekularnych,
- b) Detekcja poszczególnych chromosomów kukurydzy włączonych do genomu owsa przy pomocy markerów SSR,
- c) Zbadanie wybranych parametrów fizjologicznych i biochemicznych w warunkach kontrolnych oraz suszy glebowej – doświadczenie prowadzone w szklarni doświadczalnej,
- d) Zbadanie wybranych parametrów fizjologicznych i biochemicznych w warunkach kontrolnych oraz suszy glebowej – doświadczenie prowadzone w tunelu wegetacyjnym,
- e) Określenie produkcji biomasy nadziemnej oraz wybranych elementów plonu w warunkach kontrolnych oraz suszy glebowej (doświadczenie szklarniowe oraz tunelowe).

## 5. MATERIAŁ I METODY

### 5.1. Identyfikacja linii OMA

Materiał roślinny do badań stanowiły linie podwojonych haploidów owsa (linie DH) uzyskane metodą krzyżowania oddalonego z kukurydzą otrzymane w Instytucie Fizjologii Roślin *im. Franciszka Górskiego* Polskiej Akademii Nauk w Krakowie (Marcińska i in. 2013). Mieszzańce wewnątrzgatunkowe owsa (kombinacje krzyżówkowe odmian bądź linii hodowlanych), które zapyłano kukurydzą, pochodziły z następujących spółek hodowlanych: Hodowli Roślin Strzelce Sp. z o.o., Małopolskiej Hodowli Roślin Sp. z o.o., HBP Polanowice Sp. z o.o. i DANKO Hodowla Roślin Sp. z o.o.. Z nich otrzymano populację linii DH i linii OMA odpowiadającą klasycznemu pokoleniu F<sub>2</sub>, jednak z tą różnicą, że stanowiły tą populację wyłącznie formy homozygotyczne.

Łącznie 120 linii DH poddano badaniom mającym na celu wykrycie częściowych mieszańców owsa z kukurydzą. Obiektami kontrolnymi były: odmiana kukurydzy Waza (kontrola pozytywna) oraz odmiana owsa Stoper (kontrola negatywna). Identyfikację mieszańców przeprowadzono z użyciem metody PCR, stosując jako marker retrotranspozon Grande 1 występujący w wielu kopiach na każdym chromosomie kukurydzy (Kynast i in. 2001). Do badań użyto liści roślin otrzymanych z nasion wysianych do doniczek wypełnionych mieszaniną piasku i ziemi ogrodniczej w równych objętościach, które rosły w kontrolowanych warunkach szklarniowych (temperatura 20°C, wilgotność gleby 70% ppw). Pochodzenie badanych linii przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Pochodzenie badanych linii podwojonych haploidów owsa

| Lp. | Pochodzenie (numer roboczy)                         | Lp. | Pochodzenie (numer roboczy)   |
|-----|---|-----|---|
| 1   | Bingo × Contender (1a)                              | 34  | STH 0.3514 = (Flamingsprofi × Matilda) × Bingo (33)                       |
| 2   | Bingo × Contender (1b)                              | 35  | STH 0.3514 = (Flamingsprofi × Matilda) × STH 1.497 = (Chwat × Bingo) (34) |
| 3   | Breton × STH 93-61 (2)                              | 36  | STH 1.497 = (Chwat × Bingo) × STH 9110 (35)                               |
| 4   | Breton × STH 93-62 (3)                              | 37  | 103 nagi/szkl. II/2013 (36)   |
| 5   | Canyon × Bingo (4)                                  | 38  | Jakub × STH 6252 (37)   |
| 6   | Canyon × Bingo (5)                                  | 39  | Jakub × STH 6253 (38)   |
| 7   | Flamingstern × Bingo (6)                            | 40  | STH 9493 × STH 97806 (39)   |
| 8   | Krezus × Flamingsprofi (8)                          | 41  | STH 9493 × STH 97807 (40)   |
| 9   | D 109/10 × DC 2112/05 (9)                           | 42  | Detvan × STH 97827 (41)   |
| 10  | D 109/10 × DC 2112/06 (10)                          | 43  | DC 2648/04 × Bingo (42)   |
| 11  | STH 8-99 × DC 2112/05 (11)                          | 44  | DC 2648/04 × Bingo (43)   |
| 12  | STH 8-99 × DC 2112/06 (12)                          | 45  | Flamingsgold × DC 3750/02 (44)  |
| 13  | STH 93-61 × DC 2112/05 (13)                         | 46  | Flamingsgold × DC 3750/03 (45)  |
| 14  | STH 93-61 × DC 2112/06 (14)                         | 47  | Flamingsgold × DC 3750/04(46)   |
| 15  | STH 93-61 × DC 2112/07 (15)                         | 48  | Flamingsgold × DC 3750/05 (47)  |
| 16  | STH 93-61 × DC 2112/08 (16)                         | 49  | Gere × Flamingsgold (48)  |
| 17  | SW 090325 × Contedner (17)                          | 50  | Gere × Flamingsgold (49)  |
| 18  | DC 06011-6 × POB 722 (18)                           | 51  | Husky × IDC 2112/05 (50)  |
| 19  | POB 722 × Vok (19)                                  | 52  | Husky × IDC 2112/06 (51)  |
| 20  | Krezus × STH 1.617 (STH 10112) (20)                 | 53  | Husky × IDC 2112/07 (52)  |
| 21  | STH 9511 × Bingo (21)                               | 54  | Scorpion × STH 9-32 (53)  |
| 22  | STH 9511 × Bingo (22)                               | 55  | STH 8-50 × Canyon (54)  |
| 23  | STH 9511 × Bingo (23)                               | 56  | STH 8-50 × Canyon (55)  |
| 24  | STH 9511 × STH 9323 = Krezus × Bingo (24)           | 57  | STH 8-79 × Canyon (56)  |
| 25  | STH 9511 × STH 9323 = Krezus × Bingo (25a)          | 58  | STH 93-61 × DC 2112/05 (57)   |
| 26  | STH 9511 × STH 9323 = Krezus × Bingo (25b)          | 59  | STH 93-61 × DC 2112/06 (58)   |
| 27  | STH 9511 × STH 9323 = Krezus × Bingo (26)           | 60  | SW 090325 × Breton (59)   |
| 28  | STH 9511 × STH 9323 = Krezus × Bingo (27)           | 61  | SW 090325 × Breton (60)   |
| 29  | STH 9511 × STH 1.617 (28)                           | 62  | SW 081202 b × Bingo ż (61)  |
| 30  | STH 0.9323 = (Krezus × Bingo) × Bingo (29)          | 63  | SW 081202 b × Bingo ż (62)  |
| 31  | STH 0.9323 = (Krezus × Bingo) × Bingo (30)          | 64  | STH 09251 × Typhon (63)   |
| 32  | STH 0.9323 = (Krezus × Bingo) × Bingo (31)          | 65  | STH 09251 × Typhon (64)   |
| 33  | STH 0.3514 = (Flamingsprofi × Matilda) × Bingo (32) | 66  | STH 09251 × Typhon (65)   |

| Lp. | Pochodzenie (numer roboczy) | Lp. | Pochodzenie (numer roboczy)       |
|-----|-----------------------------|-----|-----------------------------------|
| 67  | STH 09251 × Typhon (66)     | 94  | Neklan × Bingo (97)               |
| 68  | Atego × Caracas 5/3 (67)    | 95  | Flamingsprofi × Arab (99)         |
| 69  | Atego × Caracas 5/4 (68)    | 96  | Flamingsprofi × Arab (100)        |
| 70  | Caracas × Zolak 18 (69)     | 97  | Ivory × Breton (101)              |
| 71  | Auron × Rajtar 25 (70a)     | 98  | Ivory × Breton (102)              |
| 72  | Auron × Rajtar 26 (70b)     | 99  | DC 1382/05 × Contander (103)      |
| 73  | Krezus × Aragon 30/3 (71)   | 100 | Flipper × Radius (104)            |
| 74  | Krezus × Aragon 30/4 (72)   | 101 | Stork × Zolak (105)               |
| 75  | Krezus × Aragon 30/5 (73)   | 102 | Auron × Krezus (107a)             |
| 76  | Krezus × Zolak 34/2 (74)    | 103 | Zuch × Krezus (108)               |
| 77  | Zuch × Gere 37/1 (75)       | 104 | Chimene × STH 85869(b) (110)      |
| 78  | Breton × Zolak 43/3 (76)    | 105 | Chimene × STH 85869(b) (111)      |
| 79  | Breton × Zolak 43/4 (77)    | 106 | Chimene × STH 85763(b) (113)      |
| 80  | Breton × Zolak 43/5 (78a)   | 107 | Chimene × STH 85763(b) (114)      |
| 81  | Breton × Zolak 43/6 (78b)   | 108 | Chimene × Bingo (116)             |
| 82  | STH 9110 × Bingo (80)       | 109 | Bingo × Chimene (119)             |
| 83  | STH 9787(b) × Bingo (83)    | 110 | DC 09012 (120)                    |
| 84  | STH 9787(b) × Bingo (84a)   | 111 | DC09040 (122)                     |
| 85  | STH 9787(b) × Bingo (84b)   | 112 | DC09040 (123)                     |
| 86  | STH 9787(b) × Bingo (85)    | 113 | DC09163 (124)                     |
| 87  | Akt × STH 97806 (87)        | 114 | DC09163 (126)                     |
| 88  | Arab × Typhon (88)          | 115 | STH 80022 (Szakal × Bajka) (127)  |
| 89  | Arab × Typhon (89)          | 116 | STH 80031 (Deresz × Szakal) (128) |
| 90  | Arab × Typhon (91)          | 117 | STH 81384 (Krezus × STH593) (129) |
| 91  | Bingo × Zuch (93)           | 118 | STH 81559 (STH593 × Sławko) (130) |
| 92  | CHD 1193/04 × Bingo (94)    | 119 | STH 82072 (Bajka × STH454) (131)  |
| 93  | CHD 1430/02 × Typhon (95)   | 120 | STH 82072 (Bajka × STH454) (132)  |

Zebrane liście owsa liofilizowano w obniżonym ciśnieniu (40  $\mu$ bar) w temperaturze wymiennika ciepła -52°C (liofilizator FreeZone 6L, Labconco, USA). Następnie materiał roślinny homogenizowano przy użyciu młynka do kriogenicznej homogenizacji (MM400, Retsch, Niemcy) przez 5 minut przy częstotliwości drgań 25 Hz. W tym celu liście umieszczono w okrągłodennych, zamykanych próbkach o pojemności 2000  $\mu$ l wraz z 5 kulami mielącymi wykonanymi z tlenku cyrkonu ( $\varnothing$ 5 mm). Homogenizacja następowała poprzez rozgniatanie wysuszonych liści przez kule wprowadzane w ruch przez młyn, który poruszał umieszczonymi w nim próbkami.

Izolacji genomowego DNA dokonano przy użyciu zestawu o zwiększonej wydajności Genomic Mini AX Plant firmy A&A Biotechnology. Następnie osad DNA osuszono w koncentratorze (Concentrator Plus, Eppendorf, Germany) przez 10 minut przy ciśnieniu 20 mbar. Tak wysuszone próbki DNA rozcieńczono w buforze TE (Tris, EDTA) przez 48 godzin.

Dokonano pomiaru stężenia roztworu DNA za pomocą spektrofotometru NanoDrop 2000c (Thermo Scientific, USA). Pomiary przeprowadzono przy długości fali 260 nm. Na podstawie uzyskanych pomiarów przygotowano rozcieńczenia do przeprowadzenia łańcuchowej reakcji polimerazy (PCR) tak, aby stężenie DNA wynosiło 50 ng/μl.

Przygotowane roztwory poddano łańcuchowej reakcji polimerazy (PCR). Oprócz badanych próbek reakcji tej poddano także wyizolowane i rozcieńczone DNA z kukurydzy cukrowej odmiany Waza oraz odmiany owsa Stoper. Mieszanina reakcyjna zawierała: 15,08 μl wody, 3 μl roztworu MgCl<sub>2</sub>, 2 μl roztworu wolnych nukleotydów (dNTP), 2,5 μl buforu Taq 10x, 1 μl roztworu startera Grande 1R, 1 μl roztworu startera Grande 1F i 0,42 μl roztworu polimerazy Taq Fermentas.

Użyte startery przyłączały się do wysoce konserwatywnych elementów jakimi są powszechne na każdym chromosomie kukurydzy retrotranspozony Grande 1. W grupie retrotranspozonów istnieją dwie kategorie sekwencji, dla I kategorii typowa jest obecność długich powtórzeń terminalnych LTR (ang. *long terminal repeats*, od 700 pz do 15 kpz), natomiast II kategoria retrotranspozonów pozbawiona jest sekwencji LTR (ich długość wynosi od 4,5 kpz do 7 kpz). Obie kategorie retrotranspozonów powszechne są u wielu organizmów (Monfort i in. 1995; Ananiev i in. 1998). Sekwencje starterów Grande 1 była następująca:

GRANDE 1F: 5' – AAAGACCTCACGAAAGGCCCAAGG – 3'

GRANDE 1R: 5' – AAATGGTTCATGCCGATTGCACG – 3'

Reakcja PCR przeprowadzona została w następujących warunkach: denaturacja wstępna – 94°C przez 5 minut, następnie 25 cykli: denaturacja cykliczna – 94°C przez 30 sekund, przyłączanie starterów – 58°C przez 30 sekund, wydłużanie łańcucha – 72°C przez 30 sekund, a na koniec polimeryzacja końcowa 72°C przez 5 minut i schładzanie próbek do temperatury 4°C.

Do każdej próbki po reakcji PCR dodano po 2,5 μl buforu obciążającego. Rozdział produktów amplifikacji ze względu na długość nowopowstałych fragmentów DNA przeprowadzono za pomocą elektroforezy w żelu agarozowym 1,5% w buforze TBE (Tris, kwas borowy, EDTA), przy napięciu 110 V przez 60 minut.

Kolejność próbek na żelu była następująca: w pierwszych 3 zagłębieniach: roztwór markera (GeneRuler 100 bp DNA Ladder, Fisher Scientific), produkty reakcji PCR powstałe w próbce z DNA kukurydzy odmiany Waza – kontrola pozytywna i produkty reakcji PCR

powstałe w próbce z DNA owsa odmiany Stoper – kontrola negatywna, a w pozostałych studzienkach umieszczono produkty amplifikacji DNA linii DH owsa oraz linii OMA. Archiwizacji rozdziałów elektroforetycznych dokonano przy użyciu czytnika żeli (Amersham – Pharmacia Biotech, USA) oraz programu Liscap Capture Application ver. 1.0. Analiza uzyskanych obrazów elektroforetycznych wykonana została przy zastosowaniu programu GelScan ver. 1.45 (Kucharczyk – Electrophoretic Techniques, Polska). Analiza komputerowa obrazu pozwoliła na wykrycie linii OMA oraz linii DH owsa.

## 5.2. Identyfikacja chromosomów kukurydzy

Mieszance owsa z kukurydzą zidentyfikowane w pierwszym etapie badań poddano kolejnym analizom mającym na celu wykrycie konkretnych chromosomów kukurydzy. Gametyczna liczba chromosomów u *Zea mays* L. wynosi 10, w związku z tym przeprowadzono 10 reakcji PCR dla wszystkich linii OMA z wykorzystaniem 10 markerów SSR (ang. *simple sequence repeat*), specyficznych dla każdego chromosomu kukurydzy (Kynast i in. 2001; Rines i in. 2009). Sekwencje nukleotydowe starterów SSR przedstawia Tabela 3.

Tabela 3. Markery SSR użyte do amplifikacji (źródło: <https://www.maizedb.org>)

| Marker SSR | Sekwencja                   | Długość produktu [bp] | Chromosom kukurydzy |
|------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| p-bnlg421  | F: GGGGCAAGGACTTGTCGGT      | 100                   | 1                   |
|            | R: AGCCAGTTGCCAGCATCT       |                       |                     |
| p-bnlg125  | F: GGGACAAAAGAAGAAGCAGAG    | 320                   | 2                   |
|            | R: GAAATGGGACAGAGACAGACAAT  |                       |                     |
| p-phi047   | F: GGAGATGCTCGCACTGTTCTC    | 152                   | 3                   |
|            | R: CTCCACCCTCTTTGACATGGTATG |                       |                     |
| p-phi079   | F: TGGTGCTCGTTGCCAAATCTACGA | 195                   | 4                   |
|            | R: GCAGTGGTGGTTTCGAACAGACAA |                       |                     |
| p-nc130    | F: GCACATGAAGATCCTGCTGA     | 143                   | 5                   |
|            | R: TGTGGATGACGGTGATGC       |                       |                     |
| p-phi070   | F: GCTGAGCGATCAGTTCATCCAG   | 78                    | 6                   |
|            | R: CCATGGCAGGGTCTCTCAAG     |                       |                     |
| p-phi057   | F: TGCCCTGCAGGTTACATTGAGT   | 150                   | 7                   |
|            | R: AGGAGTACGCTTGGATGCTCTTC  |                       |                     |
| p-phi080   | F: CACCCGATGCAACTTGCGTAGA   | 155                   | 8                   |
|            | R: TCGTCACGTTCCACGACATCAC   |                       |                     |
| p-phi032   | F: CTCCAGCAAGTGATGCGTGAC    | 241                   | 9                   |
|            | R: GACACCCGGATCAATGATGGAAC  |                       |                     |
| p-phi059   | F: AAGCTAATTAAGGCCGGTCATCCC | 147                   | 10                  |
|            | R: TCCGTGTACTCGGCGGACTC     |                       |                     |

W celu identyfikacji dodanego do genomu owsa chromosomu lub chromosomów kukurydzy, próbki genomowego DNA mieszańców owsa z kukurydzą były amplifikowane w obecności starterów SSR w następujących warunkach:

- 1 × (94°C przez 5 minut),
- 35 × (94°C przez 40 sekund, 62°C przez 40 sekund, 72°C przez 45 sekund),
- 1 × (72°C przez 10 minut, następnie 4°C).

### 5.3. Doświadczenie szklarniowe

Linie OMA zidentyfikowane na podstawie analiz molekularnych stanowiły materiał do dalszych badań fizjologicznych i biochemicznych. Doświadczenie szklarniowe prowadzono na dwóch pokoleniach (F2 i F3) i 14 liniach OMA (nr 1b, 9, 12, 18, 23, 26, 35, 42, 43, 55, 78b, 83, 114, 119) oraz odmianie owsa Bingo. Rośliny poddano działaniu suszy glebowej, natomiast kontrolę stanowiły rośliny regularnie podlewane przez cały okres trwania doświadczenia. Schemat doświadczenia przedstawia Tabela 4.

Doświadczenie przeprowadzono w szklarni Katedry Fizjologii, Hodowli Roślin i Nasiennictwa przy ulicy Podłużnej 3 w Krakowie (Rycina 7). Doświadczenie składało się z 240 wazonów: 15 obiektów doświadczalnych × 4 powtórzenia × 2 pokolenia × 2 sposoby traktowania.

Nasiona wysiano do wazonów wypełnionych mieszaniną piasku i ziemi ogrodniczej w równych objętościach. Każdy wazon zważono i ustalono jego masę na 2500 g. Stres suszy wywołano poprzez zaprzestanie podlewania gleby wg opisu Marcińskiej i in. (2017), gdy rośliny były w początkowej fazie strzelania w źdźbło. Stopień uwilgotnienia gleby wyznaczono metodą wagową i ustalono na 70% połowej pojemności wodnej (ppw) dla warunków kontrolnych i 20% ppw dla warunków suszy. W celu ustalenia właściwej masy, dla konkretnych poziomów uwodnienia gleby, zważono podłoże z 5 maksymalnie uwodnionych wazonów, a następnie wysuszono je w suszarce (48 godzin w temperaturze 75°C) i ponownie zważono. Na tej podstawie ustalono masę gleby przy 20% i 70% ppw. Dodatkowo właściwy stopień uwilgotnienia gleby kontrolowano wilgotnościomierzem. Traktowanie suszą kontynuowano przez 14 dni, a po zakończeniu suszy wszystkie rośliny podlewano do poziomu 70% ppw do momentu dojrzałości i zbioru nasion.



Tabela 4. Schemat doświadczenia szklarniowego – pokolenie F2 i F3

|                            |   |  |   |   |  |  |
|----------------------------|---|--|---|---|--|--|
| Fazy rozwojowe roślin owsa | Wysiew nasion, kiełkowanie, rozwój liści i krzewienie<br>BBCH 00-27 | Koniec krzewienia<br>BBCH 27                     | Początek strzelania w źdźbło<br>BBCH 31   | Koniec strzelania w źdźbło<br>BBCH 37   | Rozwój i dojrzewanie<br>BBCH 37-92           | Zbiór twarde ziarniaki<br>BBCH 92                |
|                            |   |  | <b>Termin 1</b> – pierwszy dzień suszy  | <b>Termin 2</b> – czternasty dzień suszy  |  |  |
| Susza glebowa              | podlewanie do 70% ppw   | zaprzeszanie podlewania – ppw spada z 70% do 20% | susza glebowa – 20% ppw   |   | przywrócenie podlewania – do 70% ppw         |  |
| Warunki kontrolne          | podlewanie do 70% ppw podczas całego okresu wegetacyjnego           |  |   |   |  |  |
| Wykonane pomiary/czynności | -   | test utraty wody                                 | pobieranie próbek do analiz biochemicznych<br>pomiary fluorescencji chlorofilu <i>a</i> | pobieranie próbek do analiz biochemicznych<br>pomiary fluorescencji chlorofilu <i>a</i> | wykonanie dokumentacji fotograficznej roślin | zbiory nadziemnych części roślin (pędy i wiechy) |



Rycina 7. Rośliny owsa w szklarni doświadczalnej

W trakcie doświadczenia szklarniowego przeprowadzono następujące pomiary/czynności:

- test utraty wody – ostatni dzień przed zaprzestaniem podlewania obiektów w suszy, faza rozwojowa BBCH 27 (koniec krzewienia),
- Termin 1 (pierwszy dzień suszy) – faza rozwojowa BBCH 31 (początek strzelania w źdźbło): pomiar kinetyki fluorescencji chlorofilu *a*, zbiór liści do badań biochemicznych (równolegle na kombinacji kontrolnej K1 i kombinacji poddanej suszy S1),
- Termin 2 (czternasty dzień suszy) – faza rozwojowa BBCH 37 (widoczny, ale nie rozwinięty liść flagowy): pomiar kinetyki fluorescencji chlorofilu *a*, zbiór liści do badań biochemicznych (równolegle na kombinacji kontrolnej K2 i kombinacji poddanej suszy S2), wykonanie fotografii obiektów kontrolnych i poddanych stresowi suszy,

- wykonanie dokumentacji fotograficznej roślin po zakończeniu okresu suszy w fazie dojrzewania,
- sukcesywny zbiór dojrzałych pędów w fazie rozwojowej BBCH 92 (twarde ziarniaki), ważenie biomasy części nadziemnych oraz ziarniaków.

#### 5.4. Doświadczenie tunelowe

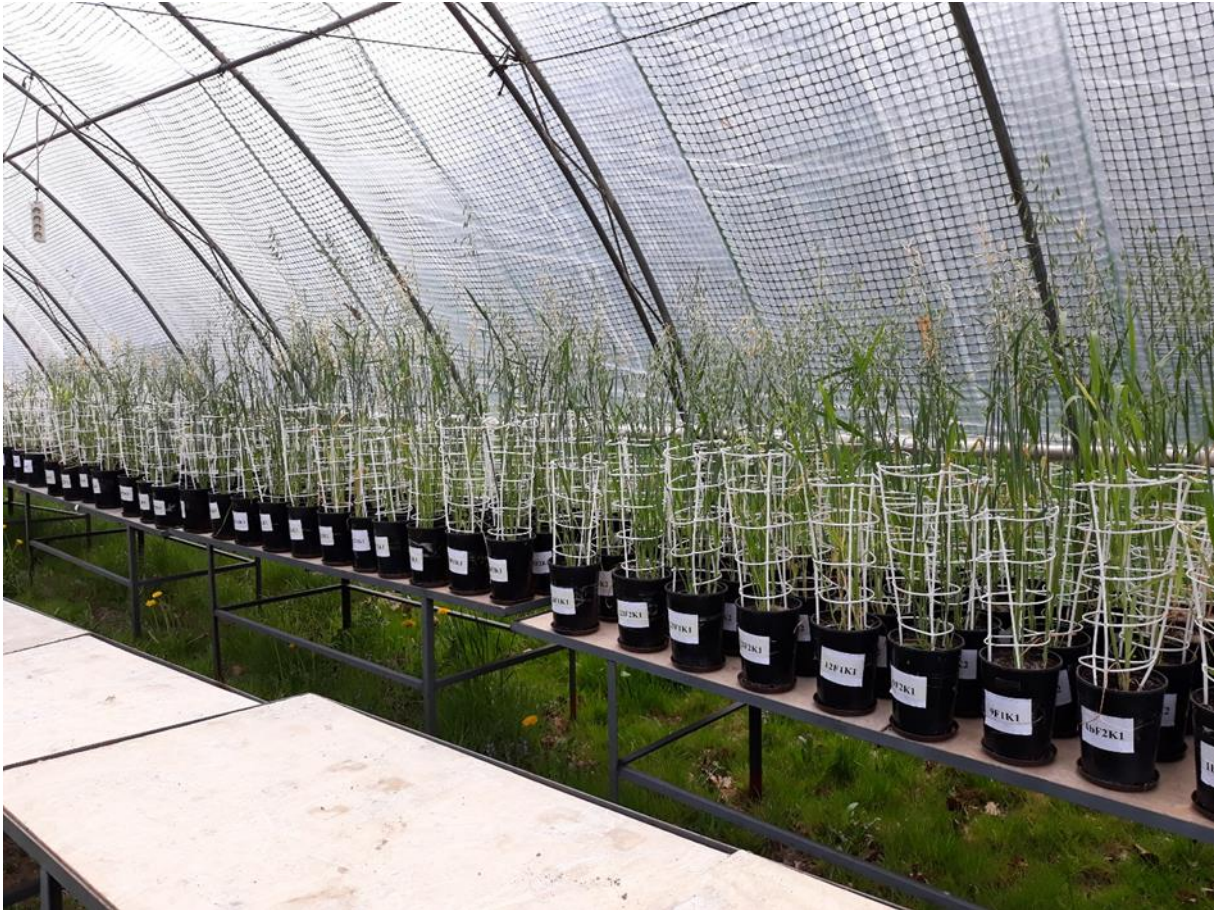
Doświadczenie szklarniowe wykazało brak istotnego wpływu pokolenia na większość analizowanych parametrów, dlatego do drugiego etapu doświadczeń wybrano tylko pokolenie F3. Schemat doświadczenia przedstawia Tabela 5. Obiektami doświadczalnymi nadal było 14 linii OMA (nr 1b, 9, 12, 18, 23, 26, 35, 42, 43, 55, 78b, 83, 114, 119) oraz odmiana Bingo. Doświadczenie składało się z 120 wazonów: 15 obiektów doświadczalnych  $\times$  4 powtórzenia  $\times$  2 sposoby traktowania. Wazonów w tunelu wegetacyjnym w trakcie wegetacji prezentuje Rycina 8.

Ziarniaki wysiano do wazonów wypełnionych wymieszanymi w równych częściach piaskiem i ziemią ogrodniczą do łącznej wagi 2600 g. Określenie ustalonej wilgotności podłoża (20% ppw) przeprowadzono analogicznie jak w doświadczeniu szklarniowym. Po zaprzestaniu podlewania u obiektów przeznaczonych do indukowania niedoborów wody osiągnięto pożądane uwilgotnienie w początkowej fazie strzelania w źdźbło. W trakcie przeprowadzania doświadczenia tunelowego przeprowadzono następujące pomiary/czynności:

- Termin 1 (pierwszy dzień suszy) – faza rozwojowa BBCH 31 (początek strzelania w źdźbło): pomiar fluorescencji chlorofilu *a*, zbiór liści do badań biochemicznych (równolegle na kombinacji kontrolnej K1 i kombinacji poddanej suszy S1),
- Termin 2 (czternasty dzień suszy) – faza rozwojowa BBCH 37 (widoczny, ale nie rozwinięty liść flagowy): pomiar fluorescencji chlorofilu *a*, zbiór liści do badań biochemicznych (równolegle na kombinacji kontrolnej K2 i kombinacji poddanej suszy S2),
- wykonanie dokumentacji fotograficznej roślin po zakończeniu okresu suszy w fazie dojrzewania,
- sukcesywny zbiór dojrzałych pędów w fazie rozwojowej BBCH 92 (twarde ziarniaki), ważenie biomasy części nadziemnych oraz ziarniaków.

Tabela 5. Schemat doświadczenia tunelowego – pokolenie F3

|                            |   |  |   |   |  |  |
|----------------------------|---|--|---|---|--|--|
| Fazy rozwojowe roślin owsa | Wysiew, kiełkowanie, rozwój liści i krzewienie<br>BBCH 00-27                    | Koniec krzewienia<br>BBCH 27                     | Początek strzelania w źdźbło<br>BBCH 31   | Koniec strzelania w źdźbło<br>BBCH 37   | Rozwój i dojrzewanie<br>BBCH 37-92           | Zbiór twarde ziarniaki<br>BBCH 92                |
|                            |   |  | <b>Termin 1</b> – pierwszy dzień suszy  | <b>Termin 2</b> – czternasty dzień suszy  |  |  |
| Susza glebowa              | podlewanie do 70% ppw   | zaprzeszanie podlewania – ppw spada z 70% do 20% | susza glebowa – 20% ppw   |   | przywrócenie podlewania – do 70% ppw         |  |
| Warunki kontrolne          | podlewanie do 70% połowej pojemności wodnej podczas całego okresu wegetacyjnego |  |   |   |  |  |
| Wykonane pomiary/czynności | -   |  | pobieranie próbek do analiz biochemicznych<br>pomiary fluorescencji chlorofilu <i>a</i> | pobieranie próbek do analiz biochemicznych<br>pomiary fluorescencji chlorofilu <i>a</i> | wykonanie dokumentacji fotograficznej roślin | zbiory nadziemnych części roślin (pędy i wiechy) |



Rycina 8. Rośliny owsa w tunelu wegetacyjnym

### 5.5. Test utraty wody

Wskaźnikiem fizjologicznym szeroko stosowanym jako kryterium selekcji tolerancji na suszę jest szybkość utraty wody z liści (ELWL, ang. *Excised Leaf Water Loss*), która w warunkach suszy glebowej jest ujemnie skorelowana z plonem ziarna (Czyczyło-Mysza i in. 2018). Test utraty wody przeprowadzono dla linii OMA rosnących w kontrolowanych warunkach szklarniowych. Odcięte liście roślin owsa w fazie rozwojowej BBCH 27 (koniec krzewienia) zostały przeniesione do komory wzrostowej, gdzie utrzymywano następujące warunki pomiarów: temperatura 20°C, wilgotność powietrza 50% i oświetlenie 250  $\mu\text{mol}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-1}$  (lampy HPS „Agro”, Osram). Utrata wody monitorowana była poprzez ważenie liści natychmiast po ścięciu (0 godzin), po 3 i 6 godzinach oraz po suszeniu w 70°C przez 48 godzin. Utrata wody w badanych roślinach została obliczona na podstawie wzoru podanego przez Clarke i McCaig (1982):

- $\text{ELWLW}_{0-3\text{h}} = (\text{FW}_0 - \text{FW}_3) / (\text{FW}_0 - \text{DW})$
- $\text{ELWLW}_{4-6\text{h}} = (\text{FW}_3 - \text{FW}_6) / (\text{FW}_3 - \text{DW})$

- $ELWLW_{0-6h} = (FW_0 - FW_6) / (FW_0 - DW)$

gdzie:

$FW_0$  – świeża masa,

$FW_3$  – świeża masa po 3 godzinach,

$FW_6$  – świeża masa po 6 godzinach,

$DW$  – sucha masa po suszeniu przez 48 godzin w temperaturze 70°C.

## 5.6. Analiza parametrów biochemicznych

Liście do analiz biochemicznych zebrano w dwóch terminach: w pierwszym dniu suszy (Termin 1) oraz w czternastym dniu suszy (Termin 2). W doświadczeniu szklarniowym zebrano po 1 liściu z pędów głównych roślin z 3 wazonów każdego obiektu doświadczalnego (w sumie z 6 biorąc pod uwagę dwa pokolenia), a w doświadczeniu tunelowym po 1 liściu z pędów głównych roślin z 4 wazonów każdego obiektu doświadczalnego. Do pomiarów biochemicznych przygotowano po 5 mg zliofilizowanych i zhomogenizowanych liści, a następnie umieszczono je w próbkach. Dodano po 2 ml 80% etanolu i wirowano przy 2800 rpm przez 20 minut (wirówka Eppendorf Centrifuge 5702 R, Niemcy).

Sumaryczna ilość cukrów została określona metodą fenolową (Dubois i in. 1956). Mieszanina reakcyjna zawierała: 0,2 ml  $H_2O$  destylowanej, 20  $\mu$ l supernatantu, 0,2 ml 5% fenolu i 1 ml stężonego  $H_2SO_4$ . Po 10 minutach od wymieszania składników reakcji zmierzona została absorbancja przy długości fali 490 nm (spektrofotometr Synergy 2, BioTek, USA). Na jej podstawie obliczono zawartość cukrów rozpuszczalnych w próbkach, która następnie została przedstawiona jako zawartość w suchej masie tkanki roślinnej [mg/g s.m.].

Zawartość związków fenolowych oznaczano metodą Folina i Ciocalteu (Singleton i Rossi 1965). Mieszanina reakcyjna zawierała: 1 ml  $H_2O$ , 20  $\mu$ l supernatantu, 0,5 ml 25%  $Na_2CO_3$  i 0,125 ml odczynnika Folina i Ciocalteu (rozcieńczonego przed użyciem wodą destylowaną w stosunku 1:1). Po 30 minutach mierzono absorbancję na spektrofotometrze (Synergy 2, BioTek, USA) przy długości fali 760 nm. Zawartość związków fenolowych określano w mg kwasu chlorogenowego na 1 g suchej masy tkanki roślinnej [mg/g s.m.].

Zawartość barwników została oznaczona zmodyfikowaną metodą spektrofotometryczną według Lichtenthaler i Wellburn (1983). Supernatant przechowywano

w temperaturze 4°C w ciemności do momentu zmierzenia absorbancji. Wartości absorbancji zostały zmierzone przy użyciu spektrofotometru (Synergy 2, BioTek USA) przy następujących długościach fali ( $\lambda$ ): 470 nm, 648,6 nm oraz 664,2 nm. Zawartość chlorofilu *a* i *b* oraz sumy karotenoidów zostały obliczone z następujących zależności:

- $C_{chl.a} = (13,36 \times A_{664,2}) - (5,19 \times A_{648,6})$
- $C_{chl.b} = (27,43 \times A_{648,6}) - (8,12 \times A_{664,2})$
- $C_{a+b} = (5,24 \times A_{664,2}) + (22,24 \times A_{648,6})$
- $C_{x+c} = [(1000 \times A_{470}) - (2,13 \times C_{chl.a}) - (97,64 \times C_{chl.b})] / 209$

gdzie:

$A_{\lambda}$  – wartość absorbancji dla odpowiedniej długości fali [ $\lambda$ ],

$C_{chl. a}$  – stężenie chlorofilu *a*,

$C_{chl. b}$  – stężenie chlorofilu *b*,

$C_{chl. a+b}$  – stężenie całkowitego chlorofilu,

$C_{x+c}$  – stężenie sumy karotenoidów.

Stężenia zostały wyrażone w miligramach danego barwnika w 1 ml ekstraktu, po czym obliczona została jego zawartość w 1 g suchej masy [mg/g s.m.].

### 5.7. Analiza fluorescencji chlorofilu *a*

Pomiar kinetyki fluorescencji chlorofilu *a* wykonano za pomocą fluorymetru (Handy PEA, Hansatech Instruments, King's Lynn, Norfolk, Wielka Brytania), przy użyciu impulsu nasycającego  $3000 \mu\text{mol} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-1}$ , czasu trwania impulsu 1 s i stałego wzmocnienia ( $1,0 \times$ ). Fluorescencję chlorofilu *a* mierzono w pierwszym (Termin 1) oraz czternastym (Termin 2) dniu suszy na dwóch najwyższych liściach. W doświadczeniu szklarniowym wykonano po 4 pomiary na jednej roślinie, natomiast w doświadczeniu tunelowym po 8 powtórzeń na jednej roślinie. Pomiary poprzedzono 20-minutowymi okresami bez dostępu do światła poddawanej pomiarowi części blaszki liściowej.

Obliczono następujące parametry:  $F_v/F_m$  – maksymalna wydajność kwantowa PSII, Area – wielkość pola akceptorów transportu elektronów z PSII, PI – wskaźnik funkcjonowania PSII,  $ET_o/CS$  – tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS oraz  $RC/CS_o$  – parametr charakteryzujący zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (Kalaji 2011).

### 5.8. Analiza wybranych elementów składowych plonu

Rośliny z doświadczenia szklarniowego oraz tunelowego wraz z osiągnięciem przez ziarniaki poszczególnych pędów pełnej dojrzałości (BBCH 92 – twarde ziarniaki) były zbierane. Zważono nadziemną część wytwarzanej przez rośliny biomasy, a także udział ziaren w całości plonu biomasy. Odnotowywano masę pędów oraz masę ziarniaków wraz z ich liczbą. Pomiary przeprowadzono dla każdego pędu oddzielnie, a następnie zsumowano wszystkie rozgałęzienia pojedynczych roślin. Pomiary przeprowadzono dla wszystkich wazonów zarówno w doświadczeniu szklarniowym, jak i tunelowym kombinacji kontrolnej oraz poddanej suszy.

### 5.9. Analiza statystyczna

Dla badanych parametrów przeprowadzono analizę wariancji z wykorzystaniem systemu niezależnego. Dla doświadczenia szklarniowego przeprowadzono trójczynnikową analizę wariancji, gdzie czynnikami były: genotypy (14 linii OMA i odmian Bingo – razem 15), pokolenia (F2 i F3) i sposób traktowania (K1, S1 – odpowiednio kombinacja kontrolna i susza w pierwszym terminie; K2, S2 – odpowiednio kombinacja kontrolna i susza w drugim terminie). Dla doświadczenia tunelowego przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji, gdzie czynnikami były: genotypy (14 linii OMA i odmiana Bingo – razem 15, wszystkie obiekty w pokoleniu F3) i sposób traktowania (K1, S1 – odpowiednio kombinacja kontrolna i susza w pierwszym terminie; K2, S2 – odpowiednio kombinacja kontrolna i susza w drugim terminie). Istotność różnic oraz grupy jednorodne wyznaczono za pomocą testu Duncana. Analizę statystyczną przeprowadzono przy użyciu programu Statistica (Statistica StatSoft Inc. STATISTICA data analysis software system, version 13). Korelacje i wykresy heatmap zostały przygotowane w programie GenStat v. 22 (VSN International).

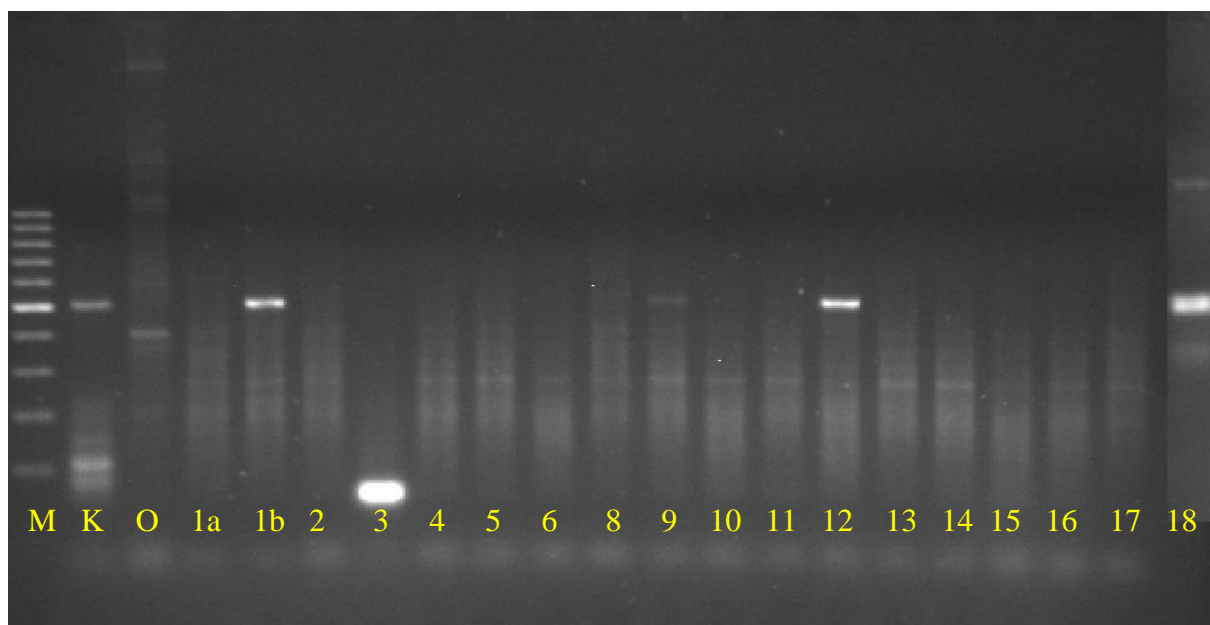


## 6. WYNIKI

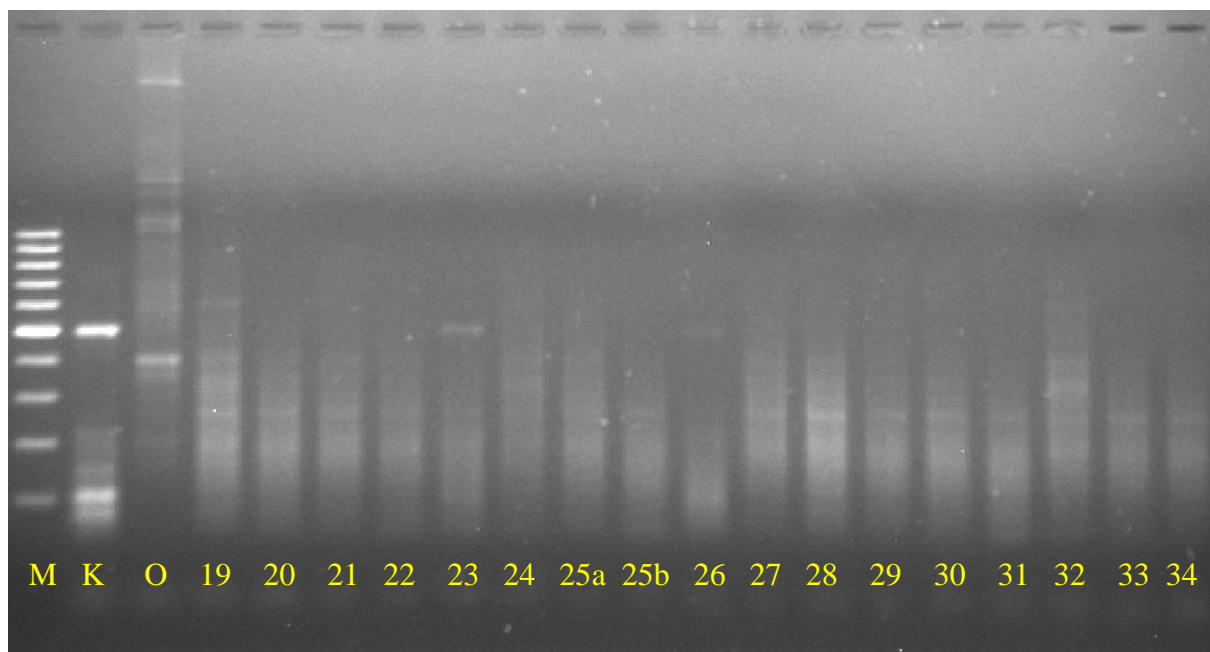
### 6.1. Badania molekularne

#### 6.1.1. Identyfikacja linii OMA

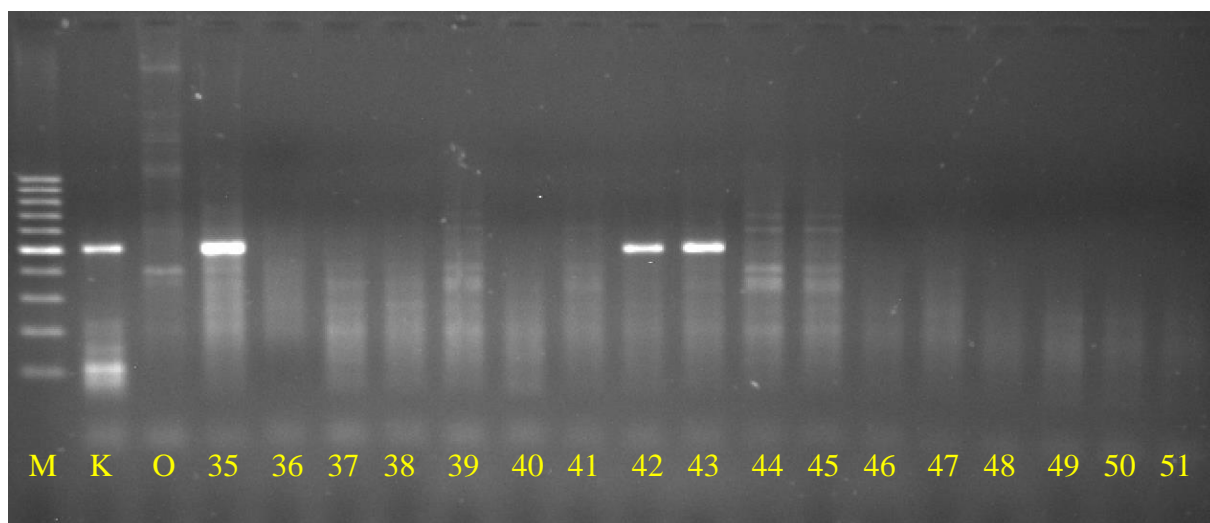
W oparciu o wyniki rozdziałów elektroforetycznych stwierdzono introgresję materiału genetycznego kukurydzy u 15 linii podwojonych haploidów owsa powstałych na drodze krzyżowania oddalonego z kukurydzą spośród 120 przebadanych genotypów. Linie z fragmentem retrotranspozonu Grande 1 (500 bp) oznaczone są numerami 1b, 9, 12, 18, 23, 26, 35, 42, 43, 55, 78b, 83, 97, 114 oraz 119. Rozdziały elektroforetyczne prezentują Ryciny 9-15.



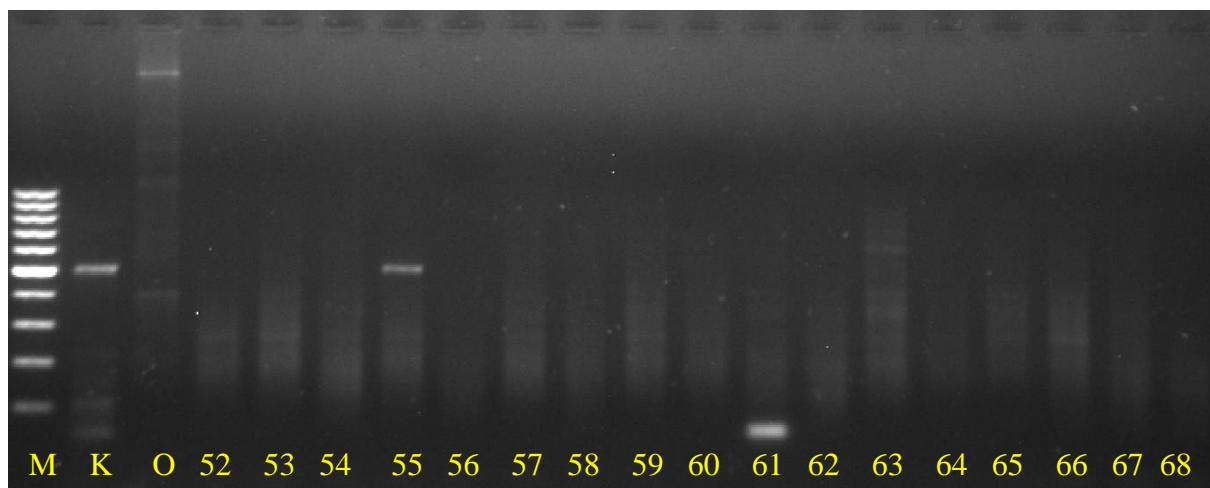
Rycina 9. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 1a – linia DH owsa, 1b – linia OMA, 2-8 – linie DH owsa, 9 – linia OMA, 10-11 – linie DH owsa, 12 – linia OMA, 13-17 – linie DH owsa, 18 – linia OMA)



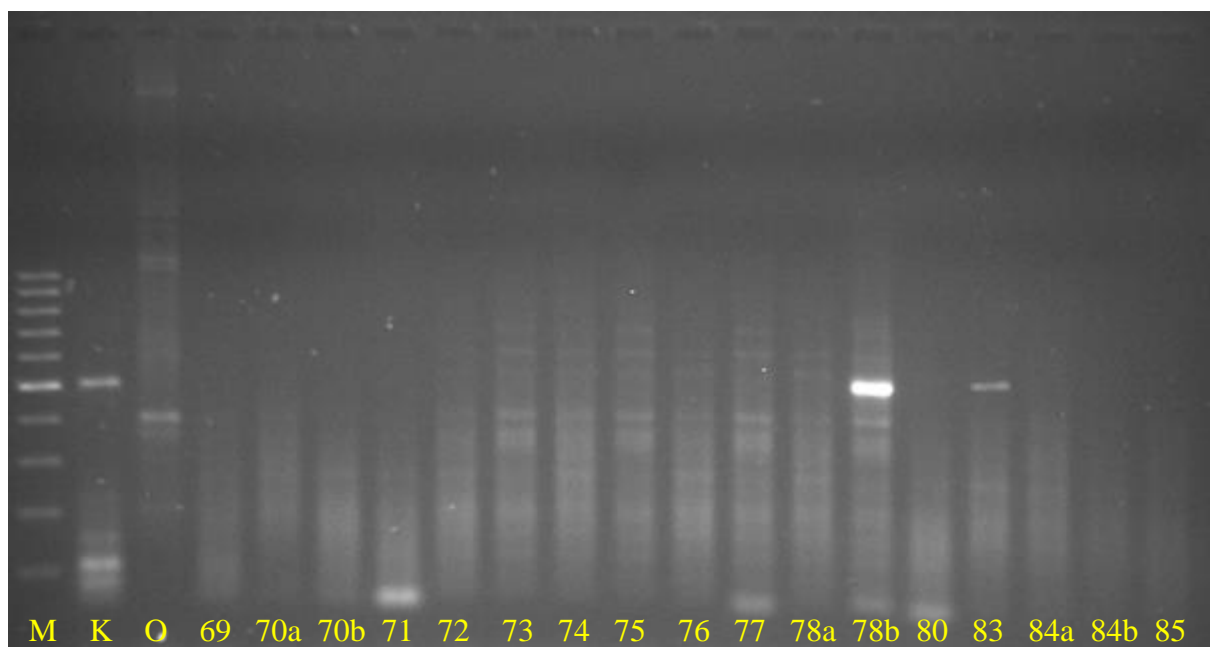
Rycina 10. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 19-22 – linie DH owsa, 23 – linia OMA, 24-25b – linie DH owsa, 26 – linia OMA, 27-34 – linie DH owsa)



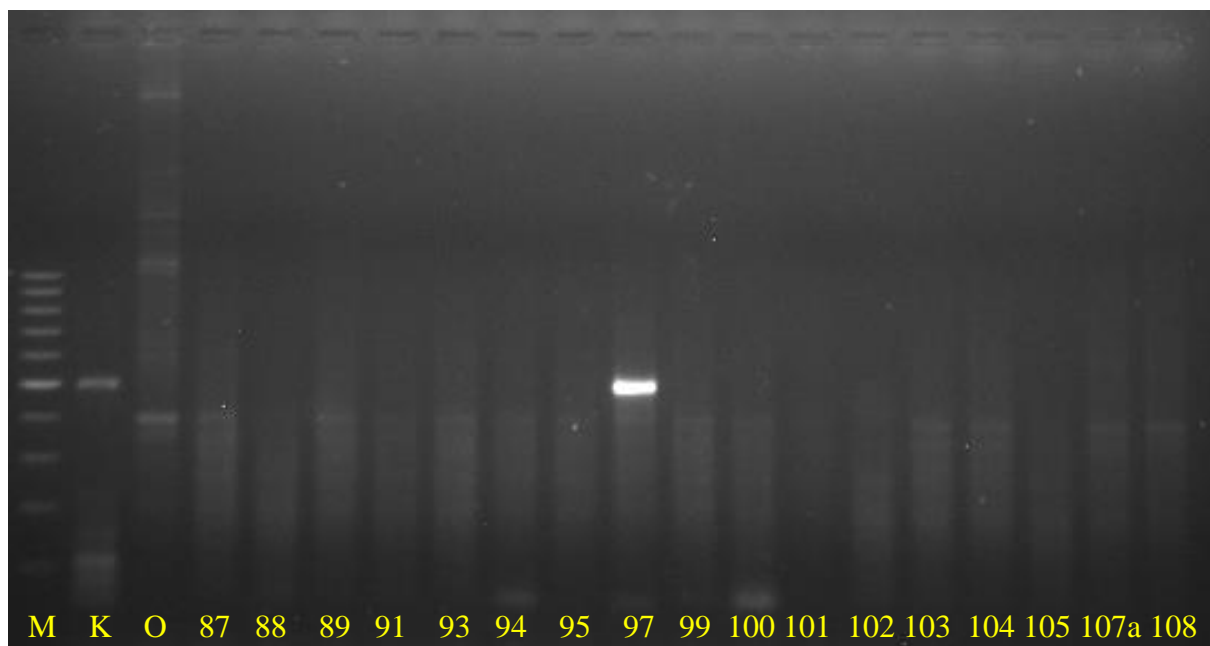
Rycina 11. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 35 – linia OMA, 36-41 – linie DH owsa, 42-43 – linie OMA, 44-51 – linie DH owsa)



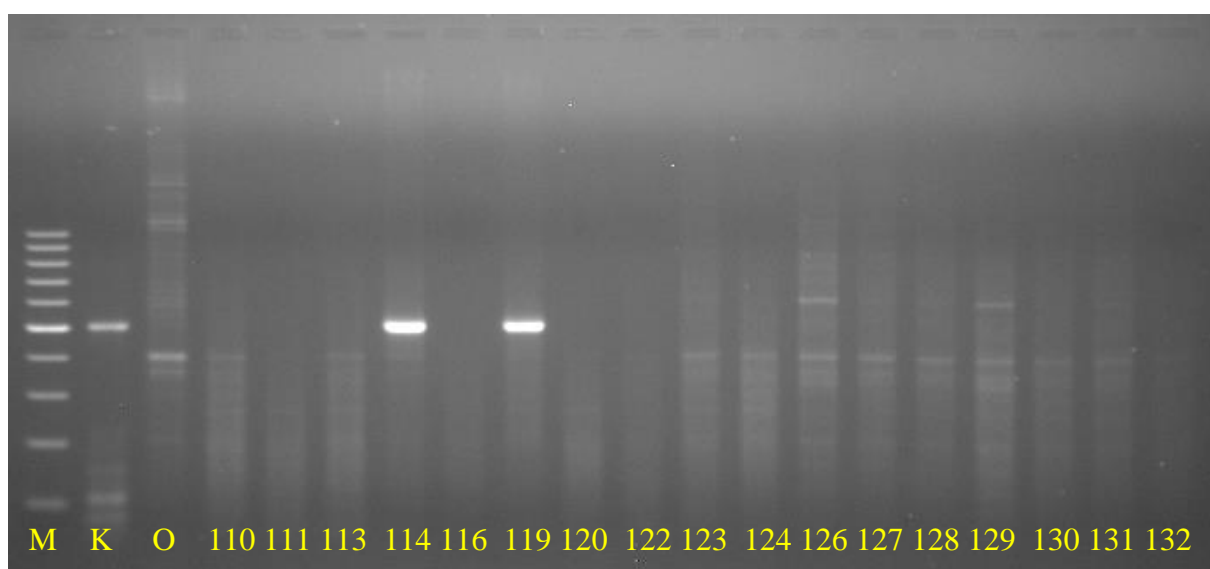
Rycina 12. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 52-54 – linie DH owsa, 55 – linia OMA, 56-68 – linie DH owsa)



Rycina 13. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 69-78a – linie DH owsa, 78b – linia OMA, 80 – linia DH owsa, 83 – linia OMA, 84a-85 – linie DH owsa)



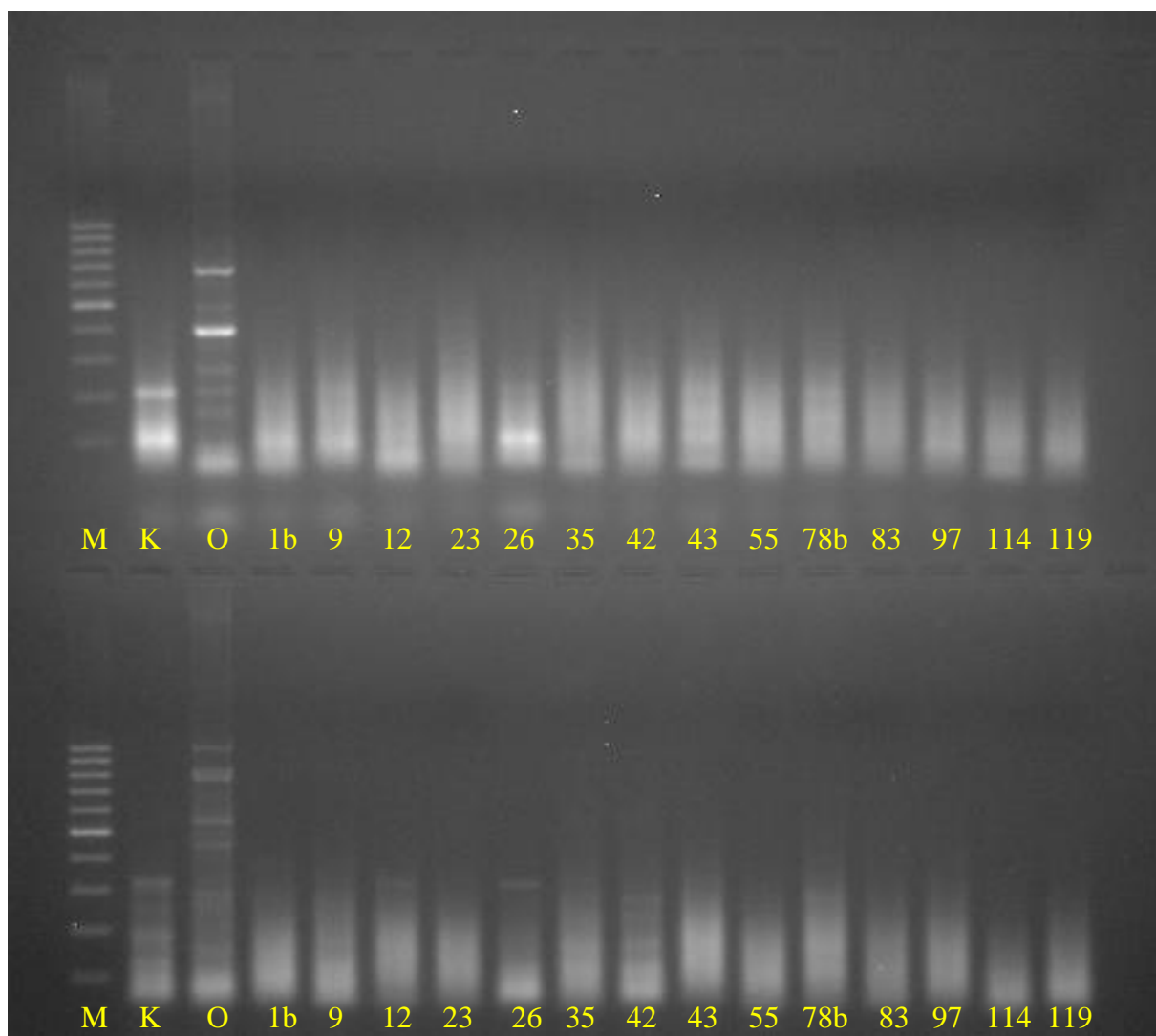
Rycina 14. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 87-95 – linie DH owsa, 97 – linia OMA, 99-108 – linie DH owsa)



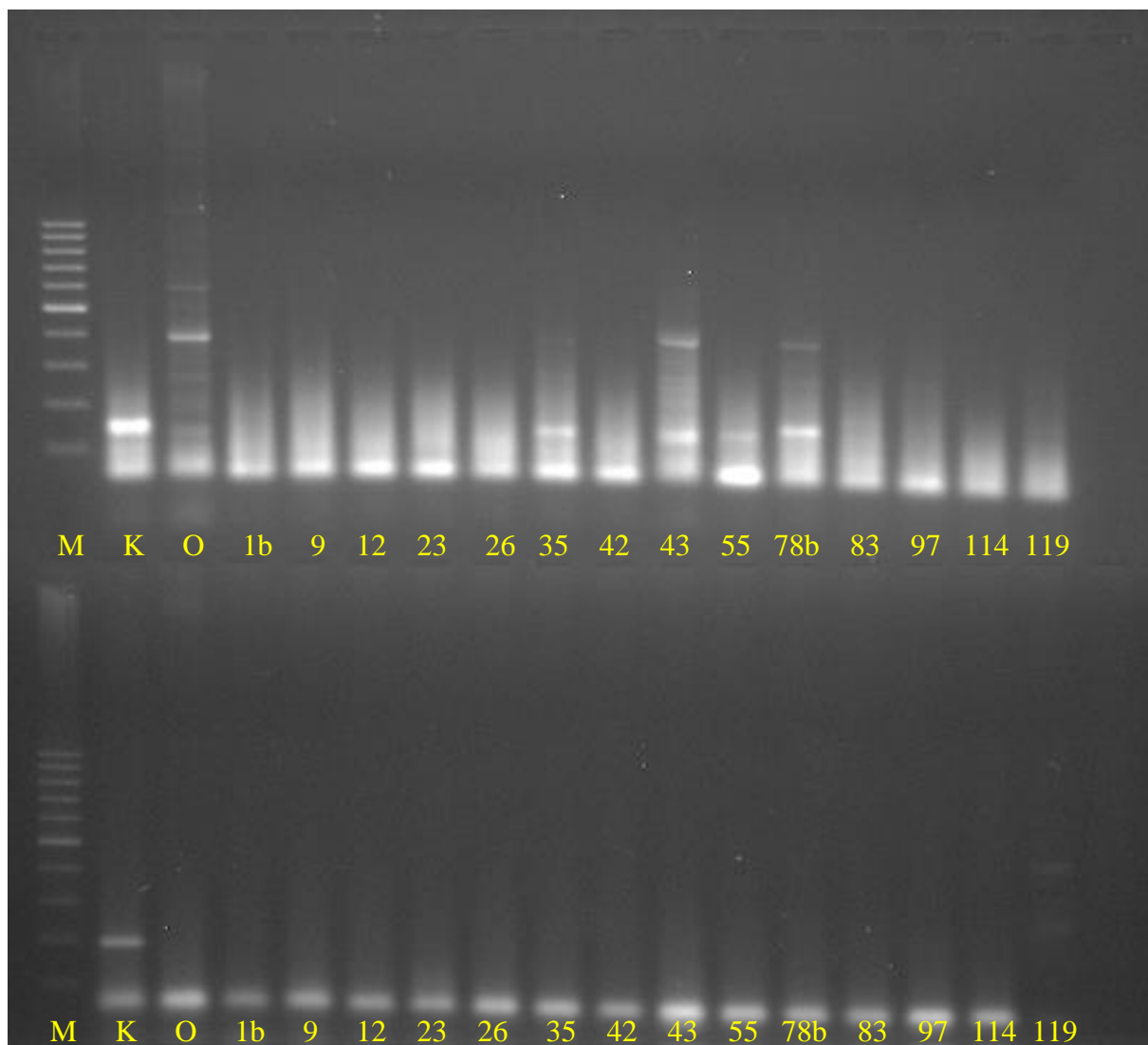
Rycina 15. Rozdział elektroforetyczny produktów reakcji PCR z zastosowaniem starterów Grande 1 (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 110-113 – linie DH owsa, 114 – linia OMA, 116 – linia DH owsa, 119 – linia OMA, 120-132 – linie DH owsa)

### 6.1.2. Identyfikacja chromosomów kukurydzy

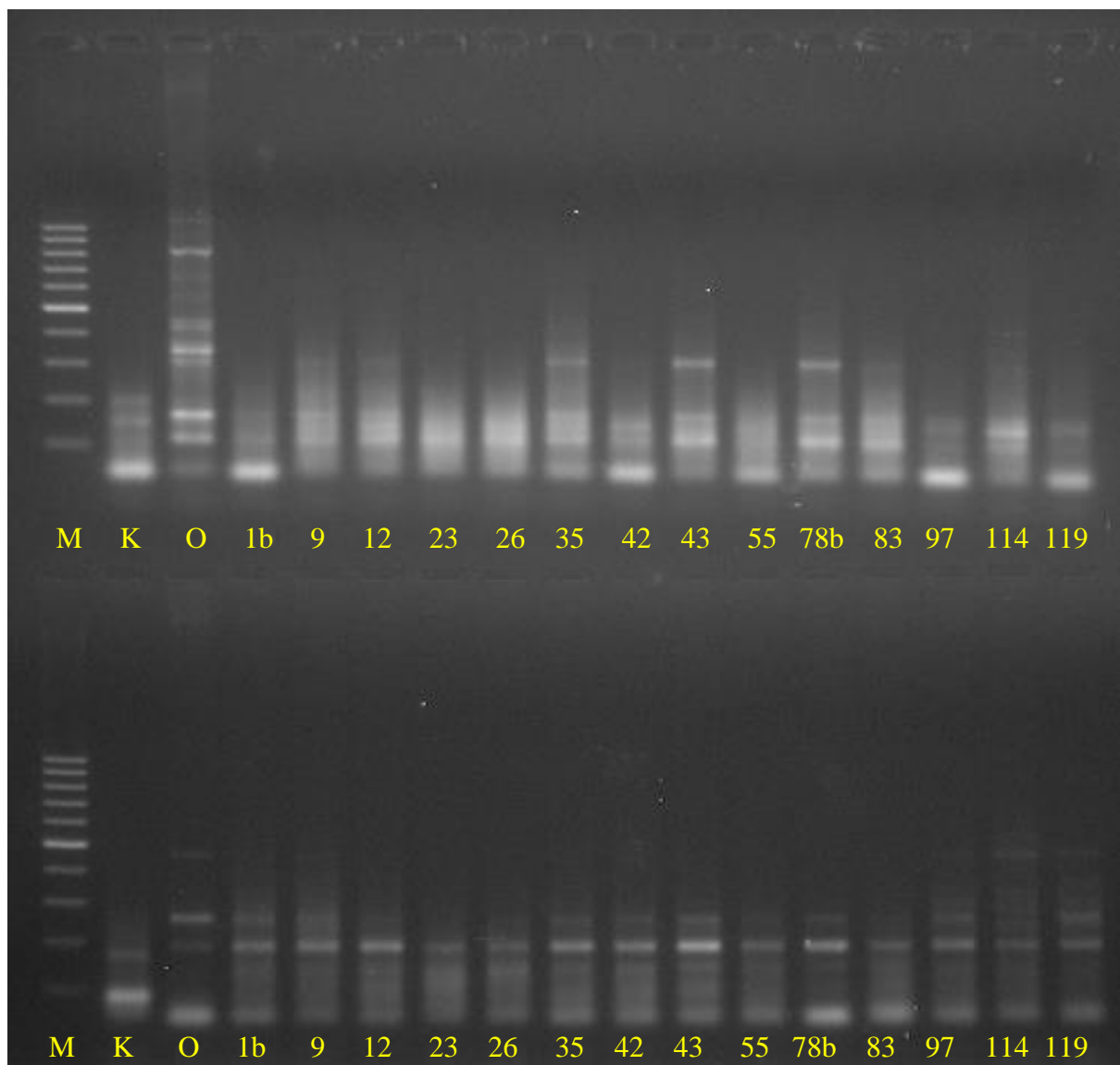
Linie OMA ze stwierdzoną przy pomocy markeru Grande 1 introgresją materiału genetycznego kukurydzy poddano kolejnym badaniom molekularnym mającym na celu stwierdzenie, które chromosomy kukurydzy zostały włączone do genomu powstałych mieszańców. W tym celu przeprowadzono reakcje SSR-PCR z wykorzystaniem starterów identyfikacyjnych dla każdego chromosomu kukurydzy, a następnie przeprowadzono rozdziały elektroforetyczne produktów reakcji PCR. Rozdziały elektroforetyczne prezentują Ryciny 16-20.



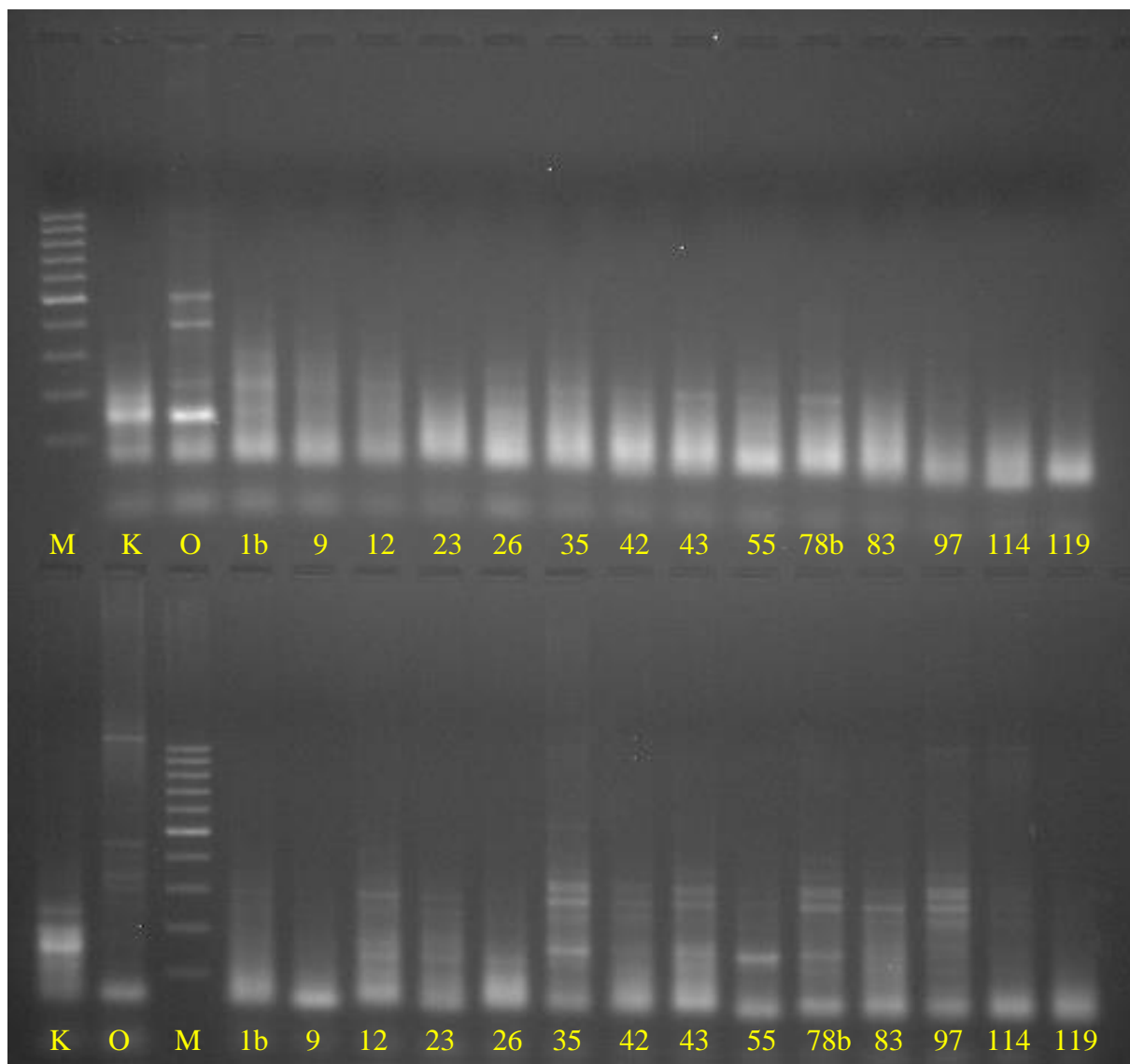
Rycina 16. Rozdział elektroforetyczny produktów SSR-PCR z wykorzystaniem starterów identyfikacyjnych dla chromosomu 1 (górny grzebień) i 2 (dolny grzebień) (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 1b-119 – linie OMA)



Rycina 17. Rozdział elektroforetyczny produktów SSR-PCR z wykorzystaniem starterów identyfikacyjnych dla chromosomu 3 (górny grzebień) i 4 (dolny grzebień) (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 1b-119 – linie OMA)

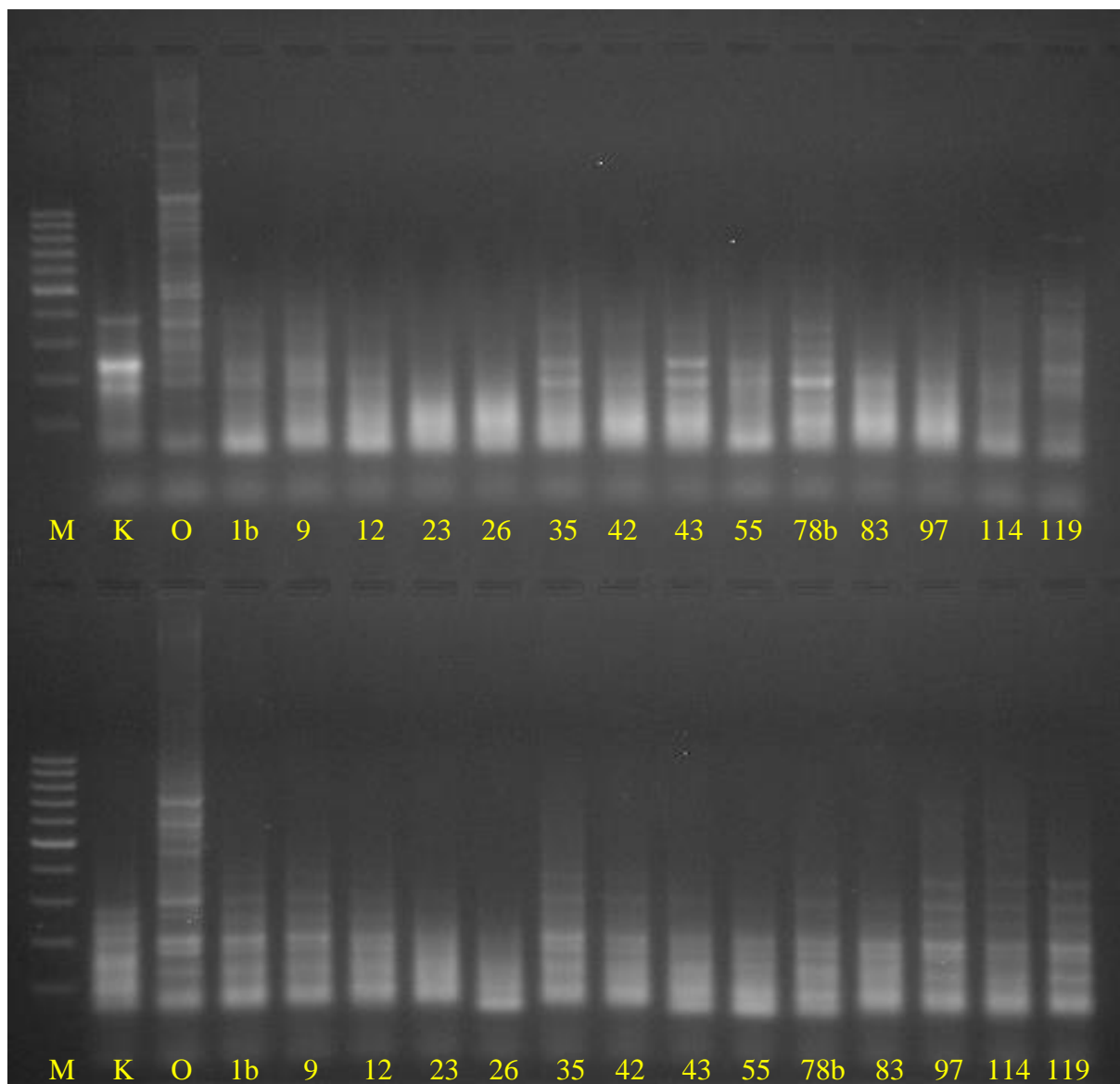


Rycina 18. Rozdział elektroforetyczny produktów SSR-PCR z wykorzystaniem starterów identyfikacyjnych dla chromosomu 5 (górny grzebień) i 6 (dolny grzebień) (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 1b-119 – linie OMA)



Rycina 19. Rozdział elektroforetyczny produktów SSR-PCR z wykorzystaniem starterów identyfikacyjnych dla chromosomu 7 (górny grzebień) i 8 (dolny grzebień) (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 1b-119 – linie OMA)





Rycina 20. Rozdział elektroforetyczny produktów SSR-PCR z wykorzystaniem starterów identyfikacyjnych dla chromosomu 9 (górny grzebień) i 10 (dolny grzebień) (M – marker wielkości 100 bp, K – kukurydza cv. Waza, O – owies cv. Stoper, 1b-119 – linie OMA)

Analiza rozdziałów elektroforetycznych produktów SSR-PCR z zastosowaniem programu GelScan ver. 1.45 (Kucharczyk, Techniki elektroforetyczne) pozwoliła na oszacowanie wielkości zamplifikowanych fragmentów DNA, wśród których znaleziono również produkty markerowe dla chromosomów kukurydzy. Szczegółowe zestawienie zidentyfikowanych produktów markerowych dla poszczególnych chromosomów kukurydzy wykrytych w liniach OMA przedstawiono w Tabeli 6. W ostatniej kolumnie zaprezentowano łączną liczbę zatrzymanych chromosomów kukurydzy, która wyniosła od 0 do 4 w zależności od badanej linii. U linii nr 23 i 97 nie stwierdzono występowania całych chromosomów kukurydzy (brak markerowych obszarów SSR), natomiast wykryto fragment retrotranspozonu Grande 1, który występuje na każdym chromosomie kukurydzy w bardzo dużej liczbie kopii.

Najczęściej u badanych linii OMA obserwowano chromosom kukurydzy nr 9, występował on w genomie 10 z 14 badanych linii. Żadna z linii nie posiadała chromosomów nr 4, 6, 7 i 10. Łącznie u wszystkich badanych linii OMA zaobserwowano introgresję 26 chromosomów kukurydzy do genomu owsa.

Tabela 6. Identyfikacja chromosomów kukurydzy w liniach OMA

| Numer linii | Numer chromosomu kukurydzy |   |   |   |   |   |   |   |    |    | Razem |
|-------------|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|-------|
|             | 1                          | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9  | 10 |       |
| 1b          |                            |   |   |   |   |   |   |   | X  |    | 1     |
| 9           |                            |   |   |   | X |   |   |   | X  |    | 2     |
| 12          |                            | X |   |   | X |   |   |   | X  |    | 3     |
| 23          |                            |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 0     |
| 26          | X                          | X |   |   |   |   |   |   |    |    | 2     |
| 35          |                            |   | X |   | X |   |   | X | X  |    | 4     |
| 42          |                            |   |   |   | X |   |   |   | X  |    | 2     |
| 43          |                            |   | X |   |   |   |   |   | X  |    | 2     |
| 55          |                            |   | X |   |   |   |   | X | X  |    | 3     |
| 78b         |                            |   | X |   |   |   |   | X | X  |    | 3     |
| 83          |                            |   |   |   |   |   |   | X | X  |    | 2     |
| 97          |                            |   |   |   |   |   |   |   |    |    | 0     |
| 114         |                            |   |   |   | X |   |   |   |    |    | 1     |
| 119         |                            |   |   |   |   |   |   |   | X  |    | 1     |
| Razem       | 1                          | 2 | 4 | 0 | 5 | 0 | 0 | 4 | 10 | 0  | 26    |

## 6.2. Doświadczenie szklarniowe

### 6.2.1. Test utraty wody

Celem przeprowadzonego testu utraty wody było zbadanie wpływu pochodzenia (genotypu (G): 14 linii OMA i odmiana Bingo) i pokolenia (P: F2 i F3) linii OMA oraz ich interakcji ( $P \times G$ ) na szybkość utraty wody z liści przez pierwsze 3 godziny (ELWL<sub>0-3 h</sub>), kolejne 3 godziny (ELWL<sub>4-6 h</sub>) oraz łącznie przez 6 godzin (ELWL<sub>0-6 h</sub>). Analiza wariancji wykazała istotny wpływ genotypu (G), natomiast wpływ pokolenia (P) oraz interakcji ( $P \times G$ ) okazał się nieistotny we wszystkich badanych okresach czasu. Wartości testu F prezentuje Tabela 7.

Tabela 7. Analiza wariancji dla testu utraty wody z liści linii OMA

| przed wprowadzeniem okresu suszy | P<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | $P \times G$<br>(df = 14) |
|----------------------------------|---------------|----------------|---------------------------|
| ELWL <sub>0-3 h</sub>            | 0,00          | 6,74**         | 0,58                      |
| ELWL <sub>4-6 h</sub>            | 0,02          | 6,96**         | 0,78                      |
| ELWL <sub>0-6 h</sub>            | 0,02          | 6,50**         | 0,77                      |
| F <sub>0,05</sub>                | 3,886         | 1,739          | 1,739                     |
| F <sub>0,01</sub>                | 6,757         | 2,168          | 2,168                     |

P – pokolenie, G – genotyp,  $P \times G$  – interakcja pokolenia i genotyp, df – liczba stopni swobody, \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

W ciągu pierwszych 3 godzin od ścięcia liści średnio nastąpiła utrata 17,6% wody. Najwięcej wody utraciły genotypy nr 18, 35 i 114, a najmniej nr 23, 12 i 9. Genotyp o największej utracie wody (nr 18 – 26,3%) uzyskał prawie dwa razy wyższą wartość ELWL<sub>0-3 h</sub> niż genotyp o najniższej wartości (nr 23 – 13,6%) (Tabela 8).

W ciągu kolejnych 3 godzin liście utraciły średnio następne 13,6% wody. Wartości u wszystkich genotypów mieściły się w zakresie od 9,3% do 24,8%. Największe wartości ELWL<sub>4-6 h</sub> odnotowano u genotypów nr 119, 18 i 78b, a najmniejsze u linii nr 23, 9 i 42 (Tabela 8).

Łącznie w ciągu 6 godzin utrata wody wyniosła średnio 28,6%, a wartości ELWL<sub>0-6 h</sub> mieściły się w zakresie od 21,6% do 39,2%. Najwięcej wody utraciły genotypy nr 18, 119 i 35, a najmniej 23, 9 i 12. Szczegółowe wyniki każdego badanego genotypu prezentuje Tabela 8.

Tabela 8. Test utraty wody z liści linii OMA

| Genotyp        | ELWL <sub>0-3 h</sub> |     |              | ELWL <sub>4-6 h</sub> |     |              | ELWL <sub>0-6 h</sub> |     |              |
|----------------|-----------------------|-----|--------------|-----------------------|-----|--------------|-----------------------|-----|--------------|
|                | 1                     | 2   | 3            | 1                     | 2   | 3            | 1                     | 2   | 3            |
| 9              | 15,13%                | abc | 3,76%        | 10,29%                | ab  | 4,79%        | 23,78%                | ab  | 6,27%        |
| 12             | 14,81%                | ab  | 4,45%        | 10,88%                | ab  | 6,71%        | 23,93%                | ab  | 8,30%        |
| 18             | 26,27%                | f   | 4,62%        | 17,62%                | d   | 2,54%        | 39,16%                | f   | 5,41%        |
| 23             | 13,58%                | a   | 3,06%        | 9,29%                 | a   | 2,58%        | 21,55%                | a   | 4,61%        |
| 26             | 17,18%                | a-d | 5,87%        | 13,21%                | a-d | 5,08%        | 27,86%                | a-d | 8,46%        |
| 35             | 21,25%                | e   | 7,03%        | 16,21%                | cd  | 6,13%        | 33,63%                | def | 10,30%       |
| 42             | 15,21%                | abc | 5,00%        | 10,68%                | ab  | 4,28%        | 24,08%                | ab  | 7,65%        |
| 43             | 18,55%                | b-e | 6,36%        | 12,33%                | abc | 4,73%        | 28,34%                | bcd | 9,01%        |
| 55             | 15,90%                | a-d | 4,63%        | 12,61%                | abc | 4,03%        | 26,34%                | abc | 7,16%        |
| 83             | 16,20%                | a-d | 3,56%        | 11,91%                | abc | 2,52%        | 26,14%                | abc | 4,50%        |
| 114            | 19,84%                | de  | 4,50%        | 12,11%                | abc | 2,84%        | 29,44%                | bcd | 5,97%        |
| 119            | 16,08%                | a-d | 2,50%        | 24,83%                | e   | 15,26%       | 37,03%                | ef  | 12,38%       |
| 1b             | 17,36%                | a-d | 5,20%        | 10,78%                | ab  | 4,19%        | 26,09%                | abc | 7,56%        |
| 78b            | 19,07%                | cde | 5,45%        | 16,40%                | cd  | 7,33%        | 31,99%                | cde | 9,89%        |
| Bingo          | 17,63%                | b-e | 3,59%        | 14,69%                | bcd | 3,30%        | 29,66%                | bcd | 5,06%        |
| <b>Średnia</b> | <b>17,60%</b>         |     | <b>5,56%</b> | <b>13,59%</b>         |     | <b>6,93%</b> | <b>28,60%</b>         |     | <b>9,02%</b> |

<sup>a-e</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii dla ELWL<sub>0-3 h</sub>, <sup>a-e</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii dla ELWL<sub>4-6 h</sub>, <sup>a-f</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii dla ELWL<sub>0-6 h</sub>, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

### 6.2.2. Analiza parametrów biochemicznych

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji parametrów biochemicznych stwierdzono, że na zmienność większości badanych cech w pierwszym dniu suszy wpływ miały takie czynniki doświadczalne, jak: traktowanie (T) i genotyp (G), natomiast nieistotny okazał się wpływ pokolenia (P) oraz interakcji traktowania i pokolenia (T × P). W pierwszym dniu suszy wpływu traktowania (T) nie wykazano jedynie w przypadku zawartości związków fenolowych i łącznie chlorofilu *a* i *b*. Wpływ interakcji pokolenia i genotypu (P × G) okazał się istotny jedynie przy zawartości karotenoidów. Dla wszystkich badanych cech stwierdzono również istotny wpływ interakcji traktowania i genotypu (T × G). Wpływ interakcji wszystkich analizowanych czynników (T × P × G) okazał się nieistotny dla zawartości związków fenolowych i karotenoidów. Analizę wariancji oraz wartości testu F dla zawartości związków biochemicznych w pierwszym dniu suszy prezentuje Tabela 9.

Tabela 9. Analiza wariancji zawartości związków biochemicznych w liściach linii OMA rosnących w warunkach szklarniowych – Termin 1

| pierwszy dzień suszy   | T<br>(df = 1) | P<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | T × P<br>(df = 1) | T × G<br>(df = 14) | P × G<br>(df = 14) | T × P × G<br>(df = 14) |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| cukry rozpuszczalne    | 96,71**       | 0,00          | 13,85**        | 2,86              | 3,09**             | 1,01               | 1,80*                  |
| związki fenolowe       | 0,03          | 2,31          | 10,35**        | 0,02              | 3,73**             | 0,53               | 1,07                   |
| chlorofil <i>a</i>     | 22,53**       | 3,77          | 6,25**         | 0,05              | 2,75**             | 1,67               | 1,95*                  |
| chlorofil <i>b</i>     | 88,32**       | 1,85          | 3,11**         | 1,06              | 2,66**             | 0,72               | 2,31**                 |
| chlorofil <i>a i b</i> | 2,88          | 3,49          | 5,08**         | 0,14              | 2,95**             | 1,06               | 2,32**                 |
| karotenoidy            | 289,49**      | 0,30          | 6,40**         | 1,25              | 3,65**             | 1,87*              | 1,38                   |
| F <sub>0,05</sub>      | 3,920         | 3,920         | 1,775          | 3,920             | 1,775              | 1,775              | 1,775                  |
| F <sub>0,01</sub>      | 6,851         | 6,851         | 2,234          | 6,851             | 2,234              | 2,234              | 2,234                  |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

W czternastym dniu suszy zaobserwowano podobne tendencje jak w pierwszym dniu suszy z brakiem wpływu pokolenia (P) na zmienność większości cech z wyjątkiem zawartości chlorofilu *a* oraz *a i b*. Stwierdzono także brak interakcji traktowania z pokoleniem (T × P) oraz pokolenia z genotypem (P × G), natomiast interakcja wszystkich analizowanych czynników (T × P × G) okazała się istotna jedynie dla zawartości związków fenolowych. Ponadto, zarówno traktowanie (T), jak i genotyp (G) oraz ich interakcja (T × G) okazała się istotna na analizowane cechy z wyjątkiem wpływu genotypu (G) na zawartość chlorofilu *b*. Wartości testu F prezentuje Tabela 10.

Tabela 10. Analiza wariancji zawartości związków biochemicznych w liściach linii OMA rosnących w warunkach szklarniowych – Termin 2

| czternasty dzień suszy | T<br>(df = 1) | P<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | T × P<br>(df = 1) | T × G<br>(df = 14) | P × G<br>(df = 14) | T × P × G<br>(df = 14) |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| cukry rozpuszczalne    | 33,26**       | 2,78          | 11,95**        | 0,60              | 9,16**             | 1,27               | 1,19                   |
| związki fenolowe       | 9,91**        | 0,02          | 10,46**        | 1,66              | 6,35**             | 1,57               | 1,82*                  |
| chlorofil <i>a</i>     | 874,82**      | 8,77**        | 4,21**         | 0,42              | 4,73**             | 0,73               | 0,29                   |
| chlorofil <i>b</i>     | 672,93**      | 2,22          | 1,51           | 0,83              | 2,35**             | 0,44               | 0,48                   |
| chlorofil <i>a i b</i> | 867,56**      | 6,64*         | 3,12**         | 0,58              | 3,89**             | 0,53               | 0,32                   |
| karotenoidy            | 992,57**      | 1,30          | 3,64**         | 0,93              | 5,32**             | 0,73               | 0,56                   |
| F <sub>0,05</sub>      | 3,920         | 3,920         | 1,775          | 3,920             | 1,775              | 1,775              | 1,775                  |
| F <sub>0,01</sub>      | 6,851         | 6,851         | 2,234          | 6,851             | 2,234              | 2,234              | 2,234                  |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

## Zawartość cukrów rozpuszczalnych

W pierwszym dniu suszy u roślin S1 odnotowano o 34% wyższą zawartość cukrów rozpuszczalnych w porównaniu do obiektów kontrolnych (K1). Nieistotny statystycznie spadek wystąpił tylko u linii nr 18 oraz u odmiany Bingo. U pozostałych linii odnotowano wzrost, a u 9 genotypów był on istotny statystycznie. Najwyższe wzrosty w granicach 70% zaobserwowano u linii nr 43, 12, 9 i 1b. Najwyższe zawartości cukrów rozpuszczalnych u obiektów kontrolnych odnotowano u linii nr 23 i 35 oraz u odmiany Bingo, natomiast najniższe zawartości stwierdzono u linii nr 43 i 42. Wśród obiektów poddanych suszy najwyższe zawartości cukrów rozpuszczalnych wystąpiły u linii nr 23 i 35, a najniższe u linii nr 18 i 42 (Tabela 11).

Tabela 11. Zawartość cukrów rozpuszczalnych [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |          |              | S1            |          |              | K2            |          |              | S2            |          |              |
|----------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|
|                | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            |
| 9              | 209,21        | ab       | 41,14        | 357,26        | ghi      | 49,46        | 125,63        | a-e      | 33,72        | 188,51        | f-k      | 58,23        |
| 12             | 214,68        | abc      | 80,36        | 367,88        | ghi      | 93,12        | 165,50        | c-h      | 45,27        | 180,23        | e-j      | 38,84        |
| 18             | 220,35        | a-d      | 48,03        | 206,73        | ab       | 76,78        | 123,26        | a-d      | 18,66        | 264,84        | lm       | 40,65        |
| 23             | 404,52        | i        | 34,79        | 524,02        | j        | 49,61        | 220,27        | i-l      | 49,97        | 233,80        | jkl      | 32,99        |
| 26             | 240,15        | a-e      | 74,99        | 366,65        | ghi      | 62,67        | 135,53        | b-f      | 30,30        | 162,45        | b-g      | 41,55        |
| 35             | 330,17        | f-i      | 39,45        | 402,33        | i        | 17,19        | 186,66        | f-k      | 28,14        | 195,58        | g-k      | 24,28        |
| 42             | 202,00        | ab       | 54,57        | 267,55        | b-f      | 38,12        | 107,48        | ab       | 22,43        | 77,90         | a        | 4,89         |
| 43             | 169,28        | a        | 32,72        | 291,49        | c-g      | 33,48        | 165,07        | c-h      | 42,49        | 155,51        | b-g      | 63,63        |
| 55             | 301,62        | e-h      | 35,12        | 400,35        | i        | 113,62       | 161,61        | b-g      | 17,41        | 223,82        | i-l      | 27,28        |
| 83             | 234,63        | a-e      | 119,87       | 369,04        | ghi      | 102,52       | 196,19        | g-k      | 42,69        | 317,21        | n        | 50,62        |
| 114            | 204,60        | ab       | 31,56        | 295,81        | d-h      | 29,07        | 139,62        | b-f      | 13,43        | 218,59        | h-l      | 11,07        |
| 119            | 276,67        | b-f      | 54,17        | 298,50        | d-h      | 29,20        | 196,35        | g-k      | 33,08        | 240,35        | klm      | 51,86        |
| 1b             | 230,44        | a-e      | 37,00        | 387,87        | i        | 47,25        | 141,24        | b-g      | 30,09        | 287,82        | mn       | 74,79        |
| 78b            | 261,45        | b-f      | 113,29       | 306,67        | e-h      | 35,78        | 174,27        | d-i      | 49,12        | 115,73        | abc      | 27,84        |
| Bingo          | 374,94        | hi       | 23,64        | 340,14        | f-i      | 50,71        | 263,92        | lm       | 91,27        | 162,12        | b-g      | 9,62         |
| <b>Średnia</b> | <b>258,31</b> | <b>c</b> | <b>86,67</b> | <b>345,49</b> | <b>d</b> | <b>91,39</b> | <b>166,84</b> | <b>a</b> | <b>55,02</b> | <b>201,63</b> | <b>b</b> | <b>72,91</b> |

<sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-n</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>a-d</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu suszy odnotowano spadek zawartości cukrów rozpuszczalnych w porównaniu do pierwszego dnia suszy. U obiektów kontrolnych wyniósł on 35%, a u obiektów poddanych suszy 41%. Nadal u obiektów w suszy średni poziom cukrów rozpuszczalnych był wyższy i wynosił 121% średniej zawartości obiektów kontrolnych. U 3 genotypów oraz u odmiany Bingo poziom cukrów rozpuszczalnych w kombinacji z suszą był niższy niż u obiektów kontrolnych, jednak istotne spadki wystąpiły jedynie u linii nr 78b oraz u odmiany Bingo, gdzie wyniosły odpowiednio 34% i 39%. U 11 linii OMA odnotowano wzrost zawartości cukrów rozpuszczalnych pod wpływem suszy, z czego u 6 linii był on istotny, a najwyższy, wynoszący ponad 100%, zaobserwowano u linii nr 18 i 1b. Wśród obiektów kontrolnych najwyższe zawartości cukrów rozpuszczalnych odnotowano u linii nr 23 i 119 oraz u odmiany Bingo, natomiast najniższe u linii nr 42 i 18. U obiektów w suszy najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 83 i 1b, a najniższe u linii nr 42 i 78b (Tabela 11).

#### Zawartość związków fenolowych

W pierwszym dniu suszy nie odnotowano statystycznie istotnych różnic w średniej zawartości związków fenolowych pomiędzy roślinami kontrolnymi (K1) a roślinami, u których wilgotność podłoża w wazonach wynosiła 20% (S1). Natomiast istotne różnice obserwowano pomiędzy poszczególnymi genotypami, jak np. u linii nr 119, u której obserwowano wzrost zawartości związków fenolowych na skutek działania stresu suszy o 30%, a u linii nr 1b spadek o 28% w porównaniu do obiektów kontrolnych. Statystycznie istotne różnice wynikające ze sposobu traktowania w pierwszym dniu suszy wystąpiły jedynie u tych dwóch genotypów. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższą zawartość związków fenolowych zaobserwowano u linii nr 43 i 42, a najniższą u linii nr 23 i 119 oraz u odmiany Bingo. W obiektach poddanych suszy (S1) najwyższe zawartości związków fenolowych odnotowano u linii nr 114 i 43, a najniższe u linii nr 1b i 55 oraz u odmiany Bingo (Tabela 12).

W czternastym dniu suszy zaobserwowano istotne różnice w zawartościach związków fenolowych pomiędzy K2 i S2. Średnio w suszy stwierdzono 6% więcej związków fenolowych w porównaniu do obiektów nie poddanych stresowi suszy. Średnio w liściach roślin kontrolnych stwierdzono 23% wzrost zawartości związków fenolowych, podczas gdy w suszy wzrost wyniósł 32% w stosunku do pierwszego dnia suszy. Na skutek suszy, najwyższy wzrost zawartości związków fenolowych (57%), odnotowano u linii nr 9, a jedyny istotny spadek występował u linii nr 114 i wynosił on 21%. W warunkach kontrolnych (K2) najwyższe

stężenia związków fenolowych odnotowano u linii nr 42 i 114, a najniższe u 18 i 26. W warunkach suszy (S2) najwyższe zawartości związków fenolowych odnotowano u linii nr 9 i 42 oraz u odmiany Bingo, natomiast najniższe u linii nr 18 i 35 (Tabela 12).

Tabela 12. Zawartość związków fenolowych [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |             | S1           |          |             | K2           |          |             | S2           |          |             |
|----------------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
|                | 1            | 2        | 3           | 1            | 2        | 3           | 1            | 2        | 3           | 1            | 2        | 3           |
| 9              | 24,58        | a-e      | 5,11        | 29,44        | d-h      | 4,76        | 33,77        | c-h      | 1,97        | 53,14        | l        | 8,44        |
| 12             | 27,75        | b-g      | 4,49        | 31,85        | fgh      | 6,87        | 31,20        | bcd      | 4,09        | 39,02        | f-k      | 5,31        |
| 18             | 30,13        | e-h      | 2,65        | 24,74        | a-e      | 4,93        | 27,45        | ab       | 4,18        | 25,26        | a        | 3,47        |
| 23             | 22,29        | ab       | 3,45        | 25,68        | b-e      | 2,87        | 31,92        | bcd      | 2,76        | 33,20        | b-g      | 4,26        |
| 26             | 25,02        | a-e      | 2,65        | 24,77        | a-e      | 3,97        | 29,89        | abc      | 3,81        | 34,76        | c-h      | 2,68        |
| 35             | 26,74        | b-f      | 3,68        | 24,59        | a-e      | 2,03        | 31,56        | bcd      | 2,36        | 31,36        | bcd      | 5,47        |
| 42             | 33,76        | hi       | 3,42        | 29,63        | e-h      | 1,90        | 44,54        | k        | 3,88        | 39,68        | h-k      | 4,32        |
| 43             | 37,68        | i        | 1,41        | 33,10        | ghi      | 7,93        | 39,39        | h-k      | 4,54        | 35,73        | c-i      | 7,67        |
| 55             | 25,09        | a-e      | 2,43        | 23,34        | a-d      | 3,05        | 33,26        | b-g      | 3,37        | 37,09        | d-j      | 5,19        |
| 83             | 28,91        | c-h      | 2,43        | 25,22        | b-e      | 1,73        | 33,09        | b-f      | 3,90        | 35,27        | c-i      | 8,93        |
| 114            | 32,83        | ghi      | 0,31        | 37,93        | i        | 8,28        | 40,99        | ijk      | 0,82        | 32,29        | bcd      | 2,09        |
| 119            | 24,52        | a-e      | 4,24        | 31,77        | fgh      | 3,26        | 35,60        | c-i      | 2,97        | 33,23        | b-g      | 3,52        |
| 1b             | 32,71        | ghi      | 3,86        | 23,69        | a-d      | 5,47        | 35,61        | c-i      | 3,60        | 39,18        | g-k      | 3,85        |
| 78b            | 28,15        | b-h      | 5,55        | 29,06        | c-h      | 3,04        | 32,65        | b-e      | 3,08        | 38,51        | e-j      | 10,03       |
| Bingo          | 19,41        | a        | 4,22        | 23,23        | abc      | 0,74        | 36,60        | d-j      | 2,62        | 41,76        | jk       | 3,40        |
| <b>Średnia</b> | <b>27,97</b> | <b>a</b> | <b>5,74</b> | <b>27,87</b> | <b>a</b> | <b>6,00</b> | <b>34,50</b> | <b>b</b> | <b>5,30</b> | <b>36,63</b> | <b>c</b> | <b>7,97</b> |

<sup>a-i</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>a-c</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Zawartość barwników fotosyntetycznych – chlorofil *a*

Zawartość chlorofilu *a* już w pierwszym dniu suszy różniła się istotnie statystycznie od obiektów kontrolnych. Średnio poziom w stresie był niższy o 14%. Jedynie u 4 linii wystąpiły wzrosty zawartości chlorofilu *a* na skutek suszy, ale nie były one istotne statystycznie. Najwyższy wzrost, wynoszący 15%, zaobserwowano u linii nr 119. U pozostałych linii zaobserwowano spadki, które były istotne statystycznie u 5 genotypów, a najwyższe wystąpiły u linii nr 12 i 9 oraz u odmiany Bingo, gdzie wyniosły odpowiednio 40%, 33% i 39%. Wśród



obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości chlorofilu *a* zaobserwowano u linii nr 114 i 78b oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 23 i 35. Spośród obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości chlorofilu *a* odnotowano u linii nr 114 i 1b, a najniższe u linii nr 35 i 9 (Tabela 13).

Tabela 13. Zawartość chlorofilu *a* [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,437        | c-k      | 0,191        | 0,294        | ab       | 0,093        | 0,492        | de       | 0,116        | 0,098        | a        | 0,007        |
| 12             | 0,493        | g-l      | 0,101        | 0,296        | ab       | 0,076        | 0,488        | de       | 0,091        | 0,111        | a        | 0,029        |
| 18             | 0,444        | d-k      | 0,037        | 0,428        | c-j      | 0,089        | 0,553        | e        | 0,112        | 0,285        | c        | 0,139        |
| 23             | 0,317        | abc      | 0,060        | 0,349        | a-e      | 0,059        | 0,450        | de       | 0,043        | 0,096        | a        | 0,018        |
| 26             | 0,393        | a-i      | 0,077        | 0,319        | a-d      | 0,092        | 0,471        | de       | 0,075        | 0,084        | a        | 0,007        |
| 35             | 0,360        | a-f      | 0,107        | 0,269        | a        | 0,078        | 0,492        | de       | 0,102        | 0,105        | a        | 0,033        |
| 42             | 0,418        | b-j      | 0,085        | 0,385        | a-h      | 0,034        | 0,471        | de       | 0,083        | 0,085        | a        | 0,011        |
| 43             | 0,516        | i-l      | 0,110        | 0,385        | a-h      | 0,106        | 0,511        | e        | 0,108        | 0,123        | a        | 0,051        |
| 55             | 0,400        | b-j      | 0,091        | 0,419        | b-j      | 0,086        | 0,519        | e        | 0,137        | 0,098        | a        | 0,027        |
| 83             | 0,486        | f-l      | 0,147        | 0,451        | e-k      | 0,108        | 0,406        | d        | 0,034        | 0,233        | bc       | 0,097        |
| 114            | 0,578        | l        | 0,026        | 0,557        | kl       | 0,060        | 0,535        | e        | 0,085        | 0,220        | bc       | 0,050        |
| 119            | 0,423        | c-j      | 0,143        | 0,487        | f-l      | 0,080        | 0,545        | e        | 0,104        | 0,176        | ab       | 0,026        |
| 1b             | 0,482        | f-l      | 0,062        | 0,504        | h-l      | 0,186        | 0,306        | c        | 0,080        | 0,221        | bc       | 0,047        |
| 78b            | 0,519        | jkl      | 0,116        | 0,375        | a-g      | 0,095        | 0,406        | d        | 0,089        | 0,102        | a        | 0,048        |
| Bingo          | 0,575        | l        | 0,060        | 0,350        | a-e      | 0,084        | 0,511        | e        | 0,035        | 0,082        | a        | 0,009        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,456</b> | <b>c</b> | <b>0,119</b> | <b>0,391</b> | <b>b</b> | <b>0,118</b> | <b>0,477</b> | <b>c</b> | <b>0,104</b> | <b>0,141</b> | <b>a</b> | <b>0,081</b> |

<sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-e</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

Po 14 dniach u obiektów kontrolnych zaobserwowano nieistotny statystycznie wzrost średniej zawartości chlorofilu *a* w liściach wynoszący 5%, natomiast u obiektów w suszy zaobserwowano znaczący spadek wynoszący 64% w stosunku do pierwszego dnia suszy. W czternastym dniu suszy poziom chlorofilu *a* był niższy u obiektów w suszy o 70% w porównaniu do kontroli. U żadnego genotypu nie odnotowano wzrostu zawartości chlorofilu *a* na skutek suszy, a tylko u jednej linii spadek nie był istotny statystycznie (nr 1b – spadek o 28%). Największe spadki zawartości chlorofilu *a* stwierdzono u odmiany Bingo (84%) oraz u linii nr 26 i 42 (po 82%). Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości

chlorofilu *a* zaobserwowano u linii nr 18 i 119, a najniższe u linii nr 1b i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości odnotowano u linii nr 18 i 83, a najniższe u linii 26 i 42 oraz u odmiany Bingo (Tabela 13).

Na kształtowanie się zawartości chlorofilu *a* w czternastym dniu suszy wpływ miał czynnik pokolenia (P). Wyższe zawartości stwierdzono w pokoleniu F2 (0,326 mg/g s.m.) niż w F3 (0,292 mg/g s.m.). Istotna statystycznie różnica wyniosła 11%.

#### Zawartość barwników fotosyntetycznych – chlorofil *b*

W pierwszym dniu suszy średnia zawartość chlorofilu *b* w liściach obiektów w suszy wyniosła 129% średniej zawartości obiektów kontrolnych. Spadek zawartości chlorofilu *b* wystąpił jedynie u odmiany Bingo, gdzie wyniósł 3%. U wszystkich 14 linii poziom chlorofilu *b* był wyższy w suszy niż w obiektach kontrolnych, a u 8 genotypów różnice te były istotne statystycznie. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości odnotowano u linii nr 114 i 43 oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 23 i 55. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości chlorofilu *b* stwierdzono u linii nr 114 i 119, a najniższe u linii nr 35 i 43 (Tabela 14).

Po 14 dniach suszy u roślin kontrolnych poziom chlorofilu *b* wzrósł średnio o 1%, a u obiektów w suszy odnotowano spadek wynoszący średnio aż 53% w porównaniu do pierwszego terminu pomiarów. U obiektów w suszy w czternastym dniu obserwowano istotny statystycznie spadek zawartości chlorofilu *b* na skutek stresu o 40% w porównaniu do obiektów kontrolnych. Istotny statystycznie spadek zawartości wystąpił u wszystkich genotypów. Najwyższe spadki stwierdzono u linii nr 55 i 35, gdzie wyniosły odpowiednio 52% i 49%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości chlorofilu *b* w liściach odnotowano u linii nr 55 i 35, a najniższe u linii nr 1b i 23 oraz u odmiany Bingo. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 18 i 43, a najniższe u linii nr 55 i 35 (Tabela 14).

Tabela 14. Zawartość chlorofilu *b* [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,339        | a-e      | 0,092        | 0,442        | f-j      | 0,089        | 0,358        | d        | 0,055        | 0,215        | ab       | 0,011        |
| 12             | 0,351        | a-g      | 0,057        | 0,414        | c-h      | 0,039        | 0,357        | d        | 0,048        | 0,218        | ab       | 0,014        |
| 18             | 0,360        | a-h      | 0,027        | 0,535        | i-l      | 0,036        | 0,359        | d        | 0,050        | 0,237        | b        | 0,041        |
| 23             | 0,299        | a        | 0,062        | 0,443        | f-j      | 0,078        | 0,337        | d        | 0,025        | 0,199        | ab       | 0,018        |
| 26             | 0,329        | a-d      | 0,060        | 0,459        | h-k      | 0,064        | 0,355        | d        | 0,034        | 0,195        | ab       | 0,029        |
| 35             | 0,339        | a-e      | 0,034        | 0,367        | a-h      | 0,115        | 0,372        | d        | 0,039        | 0,191        | ab       | 0,028        |
| 42             | 0,344        | a-f      | 0,084        | 0,396        | a-h      | 0,109        | 0,367        | d        | 0,045        | 0,207        | ab       | 0,028        |
| 43             | 0,368        | a-h      | 0,054        | 0,377        | a-h      | 0,112        | 0,366        | d        | 0,052        | 0,232        | ab       | 0,029        |
| 55             | 0,307        | ab       | 0,046        | 0,447        | g-j      | 0,059        | 0,380        | d        | 0,057        | 0,183        | a        | 0,026        |
| 83             | 0,363        | a-h      | 0,068        | 0,536        | i-l      | 0,037        | 0,341        | d        | 0,018        | 0,227        | ab       | 0,046        |
| 114            | 0,419        | d-h      | 0,027        | 0,551        | kl       | 0,090        | 0,369        | d        | 0,027        | 0,221        | ab       | 0,014        |
| 119            | 0,314        | abc      | 0,048        | 0,551        | kl       | 0,140        | 0,367        | d        | 0,028        | 0,217        | ab       | 0,012        |
| 1b             | 0,343        | a-f      | 0,041        | 0,441        | e-j      | 0,122        | 0,283        | c        | 0,057        | 0,230        | ab       | 0,019        |
| 78b            | 0,348        | a-g      | 0,052        | 0,410        | c-h      | 0,092        | 0,337        | d        | 0,039        | 0,196        | ab       | 0,015        |
| Bingo          | 0,418        | d-h      | 0,030        | 0,405        | b-h      | 0,126        | 0,332        | d        | 0,029        | 0,197        | ab       | 0,022        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,349</b> | <b>b</b> | <b>0,061</b> | <b>0,452</b> | <b>c</b> | <b>0,105</b> | <b>0,352</b> | <b>b</b> | <b>0,045</b> | <b>0,211</b> | <b>a</b> | <b>0,029</b> |

<sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-d</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Zawartość barwników fotosyntetycznych – chlorofil *a* i *b*

W pierwszym dniu suszy łączna zawartość chlorofilu *a* i *b* w liściach obiektów kombinacji w suszy (S1) wyniosła 105% zawartości obiektów kombinacji kontrolnej (K1). Taki wzrost zawartości nie był istotny statystycznie. U 9 genotypów nastąpił wzrost zawartości chlorofilu *a* i *b* na skutek suszy, ale jedynie u linii nr 119 był on istotny statystycznie i wyniósł 41%. U pozostałych genotypów oraz u odmiany Bingo nastąpił spadek zawartości chlorofilu *a* i *b* na skutek suszy. Jedynie w przypadku odmiany Bingo spadek ten był istotny statystycznie i wyniósł 24%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości odnotowano u linii nr 114 i 43 oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 23 i 35. Z kolei

wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości chlorofilu *a* i *b* stwierdzono u linii nr 35 i 43, a najniższe u linii nr 119 i 114 (Tabela 15).

W 14 dniu suszy u K2 średni poziom chlorofilu *a* i *b* wzrósł o 3%, a u S2 odnotowano spadek, który wyniósł 58% w porównaniu do pierwszego dnia suszy. U obiektów w suszy obserwowano średnią zawartość chlorofilu *a* i *b* na poziomie 42% średniej zawartości obiektów kontrolnych. Istotny statystycznie spadek zawartości wystąpił u wszystkich genotypów. Najwyższe spadki stwierdzono u linii nr 55 oraz u odmiany Bingo, gdzie wyniosły odpowiednio 69% i 67%. Najmniejszym spadkiem zawartości chlorofilu *a* i *b* na skutek suszy charakteryzowała się linia nr 1b. Spadek wyniósł jedynie 23%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości chlorofilu *a* i *b* w liściach odnotowano u linii nr 18 i 119, a najniższe u linii nr 1b i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 18 i 83, a najniższe u linii nr 26 i 55 oraz u odmiany Bingo (Tabela 15).

Tabela 15. Zawartość chlorofilu *a* i *b* [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,776        | a-e      | 0,282        | 0,736        | a-d      | 0,172        | 0,850        | fg       | 0,167        | 0,313        | ab       | 0,016        |
| 12             | 0,844        | b-h      | 0,155        | 0,710        | abc      | 0,066        | 0,845        | fg       | 0,137        | 0,329        | abc      | 0,038        |
| 18             | 0,804        | a-g      | 0,048        | 0,963        | e-i      | 0,059        | 0,912        | g        | 0,162        | 0,522        | de       | 0,180        |
| 23             | 0,616        | a        | 0,106        | 0,792        | a-g      | 0,128        | 0,787        | fg       | 0,059        | 0,295        | a        | 0,032        |
| 26             | 0,722        | abc      | 0,132        | 0,778        | a-e      | 0,139        | 0,826        | fg       | 0,107        | 0,279        | a        | 0,032        |
| 35             | 0,699        | abc      | 0,140        | 0,636        | ab       | 0,192        | 0,863        | fg       | 0,139        | 0,296        | a        | 0,061        |
| 42             | 0,761        | a-e      | 0,162        | 0,782        | a-e      | 0,113        | 0,838        | fg       | 0,128        | 0,292        | a        | 0,039        |
| 43             | 0,884        | c-h      | 0,155        | 0,762        | a-e      | 0,208        | 0,877        | fg       | 0,156        | 0,355        | abc      | 0,058        |
| 55             | 0,706        | abc      | 0,137        | 0,866        | c-h      | 0,118        | 0,899        | g        | 0,191        | 0,281        | a        | 0,050        |
| 83             | 0,849        | c-h      | 0,214        | 0,987        | f-i      | 0,132        | 0,747        | f        | 0,045        | 0,459        | cde      | 0,140        |
| 114            | 0,997        | ghi      | 0,053        | 1,109        | i        | 0,123        | 0,904        | g        | 0,111        | 0,441        | bcd      | 0,064        |
| 119            | 0,738        | a-d      | 0,189        | 1,038        | hi       | 0,208        | 0,912        | g        | 0,128        | 0,393        | a-d      | 0,037        |
| 1b             | 0,825        | b-g      | 0,096        | 0,945        | d-i      | 0,290        | 0,589        | e        | 0,115        | 0,451        | bcd      | 0,059        |
| 78b            | 0,867        | c-h      | 0,165        | 0,786        | a-f      | 0,170        | 0,743        | f        | 0,127        | 0,298        | a        | 0,059        |
| Bingo          | 0,993        | ghi      | 0,075        | 0,755        | a-d      | 0,183        | 0,843        | fg       | 0,062        | 0,279        | a        | 0,030        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,805</b> | <b>b</b> | <b>0,174</b> | <b>0,843</b> | <b>b</b> | <b>0,199</b> | <b>0,829</b> | <b>b</b> | <b>0,144</b> | <b>0,352</b> | <b>a</b> | <b>0,103</b> |

a-i – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, a-g – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, ab – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

Na kształtowanie się zawartość chlorofilu *a* i *b* w czternastym dniu suszy wpływ miał czynnik pokolenia (P). Wyższe zawartości stwierdzono w pokoleniu F2 (0,611 mg/g s.m.) niż w F3 (0,570 mg/g s.m.). Istotna statystycznie różnica wyniosła 7%.

#### Zawartość barwników fotosyntetycznych – karotenoidy

W pierwszym dniu suszy zawartość karotenoidów w liściach obiektów w suszy (S1) wyniosła 40% zawartości obiektów kontrolnych (K1). Spadek zawartości karotenoidów na skutek suszy wystąpił u wszystkich genotypów, a zdecydowanie najwyższy zaobserwowano u linii nr 9, gdzie wyniósł 93%. Jedynie u linii nr 23, 35 i 1b różnice nie były istotne statystycznie. Najmniejszy spadek zawartości karotenoidów stwierdzono u linii nr 1b, gdzie wyniósł 16%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości odnotowano u linii nr 114 i 83, a najniższe u linii nr 23 i 35. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości karotenoidów stwierdzono u linii nr 1b i 43, a najniższe u linii nr 9 i 23 (Tabela 16).

Tabela 16. Zawartość karotenoidów [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,086        | fgh      | 0,044        | 0,006        | a        | 0,002        | 0,118        | efg      | 0,030        | 0,009        | ab       | 0,001        |
| 12             | 0,085        | fgh      | 0,024        | 0,031        | abc      | 0,007        | 0,100        | ef       | 0,024        | 0,011        | ab       | 0,003        |
| 18             | 0,086        | fgh      | 0,021        | 0,025        | ab       | 0,007        | 0,116        | efg      | 0,024        | 0,038        | cd       | 0,005        |
| 23             | 0,041        | bcd      | 0,009        | 0,019        | ab       | 0,010        | 0,099        | ef       | 0,020        | 0,011        | ab       | 0,003        |
| 26             | 0,080        | fgh      | 0,030        | 0,022        | ab       | 0,012        | 0,110        | efg      | 0,017        | 0,004        | ab       | 0,001        |
| 35             | 0,045        | bcd      | 0,013        | 0,022        | ab       | 0,006        | 0,124        | fg       | 0,032        | 0,007        | ab       | 0,004        |
| 42             | 0,084        | fgh      | 0,023        | 0,042        | bcd      | 0,024        | 0,120        | efg      | 0,028        | 0,001        | a        | 0,001        |
| 43             | 0,099        | ghi      | 0,025        | 0,052        | cde      | 0,030        | 0,118        | efg      | 0,036        | 0,012        | ab       | 0,002        |
| 55             | 0,080        | fgh      | 0,023        | 0,042        | bcd      | 0,025        | 0,133        | g        | 0,039        | 0,021        | abc      | 0,009        |
| 83             | 0,104        | hi       | 0,041        | 0,027        | abc      | 0,007        | 0,100        | ef       | 0,012        | 0,057        | d        | 0,008        |
| 114            | 0,117        | i        | 0,012        | 0,045        | bcd      | 0,011        | 0,109        | efg      | 0,021        | 0,030        | bc       | 0,008        |
| 119            | 0,075        | efg      | 0,032        | 0,029        | abc      | 0,005        | 0,120        | efg      | 0,025        | 0,020        | abc      | 0,011        |
| 1b             | 0,079        | fgh      | 0,010        | 0,066        | def      | 0,016        | 0,055        | d        | 0,016        | 0,025        | abc      | 0,005        |
| 78b            | 0,103        | hi       | 0,025        | 0,026        | abc      | 0,006        | 0,095        | e        | 0,028        | 0,015        | abc      | 0,005        |
| Bingo          | 0,075        | efg      | 0,010        | 0,043        | bcd      | 0,018        | 0,101        | ef       | 0,014        | 0,011        | ab       | 0,004        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,083</b> | <b>c</b> | <b>0,030</b> | <b>0,033</b> | <b>b</b> | <b>0,020</b> | <b>0,108</b> | <b>d</b> | <b>0,029</b> | <b>0,018</b> | <b>a</b> | <b>0,015</b> |

a-i – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, a-g – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, a-d – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu u obiektów kontrolnych (K2) poziom karotenoidów wzrósł o 31%, a u obiektów w suszy (S2) odnotowano spadek, który wyniósł 45% w porównaniu do pierwszego dnia suszy. Średnio u obiektów w czternastym dniu suszy obserwowano istotny statystycznie spadek zawartości karotenoidów o 83% w porównaniu do obiektów kontrolnych. Wzrost zawartości nie wystąpił u żadnego genotypu. Spadki zawartości karotenoidów były istotne statystycznie u wszystkich genotypów. Najwyższe stwierdzono u linii nr 42, 26, 35 i 9, gdzie wyniosły ponad 90%. Najmniejsze spadki zawartości na skutek suszy wystąpiły u linii nr 83 i 1b, gdzie wyniosły odpowiednio 43% i 56%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości karotenoidów w liściach odnotowano u linii nr 55 i 35, a najniższe u linii nr 1b i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 83 i 18, a najniższe u linii nr 42 i 26 (Tabela 16).

### 6.2.3. Analiza fluorescencji chlorofilu *a*

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* stwierdzono, że w pierwszym dniu suszy na badane cechy, wpływ miały takie czynniki doświadczalne jak traktowanie (T), genotyp (G) oraz ich interakcja ( $T \times G$ ). Wpływ traktowania (T) nie został wykazany jedynie w przypadku RC/CS<sub>0</sub>, natomiast pokolenie (P) miało istotny statystycznie wpływ jedynie na parametr Fv/Fm. Interakcje pokolenia z innymi czynnikami doświadczalnymi ( $T \times P$ ,  $P \times G$ ,  $T \times P \times G$ ) nie miały wpływu na wartości badanych parametrów (Tabela 17).

Tabela 17. Analiza wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* linii OMA rosnących w warunkach szklarniowych – Termin 1

| pierwszy dzień suszy | T<br>(df = 1) | P<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | $T \times P$<br>(df = 1) | $T \times G$<br>(df = 14) | $P \times G$<br>(df = 14) | $T \times P \times G$<br>(df = 14) |
|----------------------|---------------|---------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fv/Fm                | 10,41**       | 7,02**        | 13,48**        | 0,76                     | 3,19**                    | 1,56                      | 1,09                               |
| Area                 | 91,19**       | 0,57          | 6,04**         | 1,65                     | 2,22**                    | 1,42                      | 0,34                               |
| PI                   | 12,36**       | 1,49          | 15,07**        | 0,02                     | 4,80**                    | 1,13                      | 1,65                               |
| ET <sub>0</sub> /CS  | 5,18*         | 0,73          | 6,48**         | 1,98                     | 2,70**                    | 1,26                      | 0,63                               |
| RC/CS <sub>0</sub>   | 2,68          | 2,42          | 6,12**         | 0,68                     | 2,93**                    | 1,23                      | 0,51                               |
| F <sub>0,05</sub>    | 3,894         | 3,894         | 1,747          | 3,894                    | 1,747                     | 1,747                     | 1,747                              |
| F <sub>0,01</sub>    | 6,778         | 6,778         | 2,182          | 6,778                    | 2,182                     | 2,182                     | 2,182                              |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

W czternastym dniu suszy glebowej wykazano istotny wpływ traktowania (T), genotypu (G) i ich interakcji ( $T \times G$ ) na kształtowanie się parametrów fluorescencji chlorofilu

(Tabela 18). Nieistotny statystycznie wpływ wystąpił przy interakcji traktowania i pokolenia ( $T \times P$ ), natomiast dla czynnika pokolenia (P), jego interakcji z genotypem ( $P \times G$ ) oraz traktowaniem i genotypem ( $T \times P \times G$ ) istotność stwierdzono w pojedynczych przypadkach: dla Fv/Fm wpływ miało pokolenie (P) i interakcja pokolenia i genotypu ( $P \times G$ ), a interakcja pokolenia i genotypu ( $P \times G$ ) oraz wszystkich trzech czynników ( $T \times P \times G$ ) wpłynęła istotnie na RC/CS<sub>0</sub>.

Tabela 18. Analiza wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* linii OMA rosnących w warunkach szklarniowych – Termin 2

| czternasty dzień suszy | T<br>(df = 1) | P<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | $T \times P$<br>(df = 1) | $T \times G$<br>(df = 14) | $P \times G$<br>(df = 14) | $T \times P \times G$<br>(df = 14) |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fv/Fm                  | 4,16*         | 8,32**        | 11,66**        | 0,52                     | 2,84**                    | 2,59**                    | 0,99                               |
| Area                   | 150,40**      | 0,03          | 10,95**        | 3,54                     | 2,85**                    | 1,02                      | 1,46                               |
| PI                     | 88,05**       | 0,94          | 14,97**        | 0,11                     | 3,33**                    | 0,74                      | 1,74                               |
| ET <sub>0</sub> /CS    | 65,91**       | 1,00          | 7,71**         | 0,73                     | 5,55**                    | 1,63                      | 1,08                               |
| RC/CS <sub>0</sub>     | 118,05**      | 0,79          | 9,87**         | 0,50                     | 6,01**                    | 1,89*                     | 1,96*                              |
| F <sub>0,05</sub>      | 3,894         | 3,894         | 1,747          | 3,894                    | 1,747                     | 1,747                     | 1,747                              |
| F <sub>0,01</sub>      | 6,778         | 6,778         | 2,182          | 6,778                    | 2,182                     | 2,182                     | 2,182                              |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

#### Maksymalna wydajność kwantowa PSII (Fv/Fm)

W pierwszym dniu suszy zaobserwowano istotne różnice w wartościach maksymalnej wydajności kwantowej PSII (Fv/Fm). Wartości współczynnika u obiektów w suszy (S1) były o 6% niższe niż u obiektów kontrolnych (K1). U 4 linii zaobserwowano wzrost wartości współczynnika, natomiast u pozostałych 11 stwierdzono spadek. Najwyższy wzrost odnotowano u linii nr 55, gdzie wyniósł 12%, a najwyższy spadek, wynoszący 40%, stwierdzono u linii nr 119. Istotny statystycznie wpływ suszy miał również miejsce u linii nr 78b. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości współczynnika odnotowano u linii nr 114 i 1b, a najniższe u linii nr 35 i 119, a także odmiany Bingo. Z kolei wśród obiektów poddanych suszy (S1) najwyższe wartości parametru Fv/Fm stwierdzono u linii nr 42 i 43, a najniższe u linii nr 119 i 78b oraz u odmiany Bingo (Tabela 19).

W czternastym dniu suszy stwierdzono wzrost wartości Fv/Fm w porównaniu do pierwszego dnia suszy odpowiednio o 3% u obiektów kombinacji kontrolnej (K2) oraz o 7% u obiektów kombinacji w suszy (S2). Nadal średnia wartość współczynnika w czternastym dniu

eksperymentu była niższa u obiektów w suszy niż u obiektów kontrolnych, a różnica wyniosła 3%. U 3 genotypów oraz u odmiany Bingo stwierdzono wzrost wartości współczynnika maksymalnej fotochemicznej wydajności PSII w wyniku suszy, ale tylko u linii nr 35 był on istotny statystycznie i wyniósł 22%. U 11 genotypów stwierdzono spadek wartości współczynnika, a najwyższy spadek wystąpił u linii nr 119 i wyniósł 30%. Spadek ten był istotny statystycznie. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości Fv/Fm stwierdzono u linii nr 43 i 114, a najniższe u linii nr 35 i 119. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości współczynnika odnotowano u linii nr 18 i 43 oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 119 i 9 (Tabela 19).

Tabela 19. Wartości maksymalnej wydajności kwantowej PSII (Fv/Fm) u linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,738        | e-i      | 0,122        | 0,657        | c-g      | 0,177        | 0,712        | c-f      | 0,164        | 0,633        | bc       | 0,164        |
| 12             | 0,718        | d-i      | 0,113        | 0,786        | hi       | 0,039        | 0,731        | c-h      | 0,104        | 0,808        | f-i      | 0,024        |
| 18             | 0,831        | i        | 0,001        | 0,806        | hi       | 0,018        | 0,830        | ghi      | 0,012        | 0,827        | ghi      | 0,009        |
| 23             | 0,795        | hi       | 0,067        | 0,714        | d-i      | 0,105        | 0,778        | d-i      | 0,079        | 0,722        | c-g      | 0,131        |
| 26             | 0,774        | ghi      | 0,081        | 0,760        | f-i      | 0,109        | 0,782        | d-i      | 0,072        | 0,789        | e-i      | 0,051        |
| 35             | 0,599        | bcd      | 0,078        | 0,629        | b-e      | 0,151        | 0,561        | ab       | 0,122        | 0,685        | cde      | 0,084        |
| 42             | 0,725        | e-i      | 0,119        | 0,827        | i        | 0,011        | 0,782        | d-i      | 0,111        | 0,780        | d-i      | 0,050        |
| 43             | 0,817        | hi       | 0,042        | 0,806        | hi       | 0,023        | 0,843        | i        | 0,008        | 0,810        | f-i      | 0,032        |
| 55             | 0,649        | c-f      | 0,079        | 0,725        | e-i      | 0,101        | 0,798        | f-i      | 0,058        | 0,764        | d-i      | 0,071        |
| 83             | 0,812        | hi       | 0,049        | 0,696        | d-h      | 0,162        | 0,782        | d-i      | 0,083        | 0,706        | c-f      | 0,146        |
| 114            | 0,839        | i        | 0,005        | 0,737        | e-i      | 0,115        | 0,838        | hi       | 0,004        | 0,800        | f-i      | 0,038        |
| 119            | 0,638        | c-f      | 0,190        | 0,380        | a        | 0,183        | 0,677        | cd       | 0,179        | 0,475        | a        | 0,149        |
| 1b             | 0,835        | i        | 0,007        | 0,784        | hi       | 0,022        | 0,827        | ghi      | 0,007        | 0,799        | f-i      | 0,038        |
| 78b            | 0,725        | e-i      | 0,099        | 0,576        | bc       | 0,218        | 0,722        | c-g      | 0,114        | 0,648        | bc       | 0,175        |
| Bingo          | 0,570        | bc       | 0,172        | 0,521        | b        | 0,055        | 0,780        | d-i      | 0,102        | 0,837        | hi       | 0,010        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,738</b> | <b>b</b> | <b>0,126</b> | <b>0,694</b> | <b>a</b> | <b>0,164</b> | <b>0,763</b> | <b>b</b> | <b>0,116</b> | <b>0,739</b> | <b>b</b> | <b>0,131</b> |

<sup>a-i</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-i</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

Na kształtowanie się wartości maksymalnej wydajności kwantowej PSII wpływ zarówno w pierwszym, jak i czternastym dniu suszy miał czynnik pokolenia (P). W pierwszym terminie pomiarów wyższe wartości Fv/Fm osiągnęło pokolenie F2 (średnia 0,734)



od F3 (średnia 0,698) o 5%. Podobne zależności stwierdzono w czternastym dniu suszy, gdzie średnie wartości Fv/Fm w pokoleniu F2 (0,768) były wyższe od F3 (0,734) o 5%.

#### Wielkość pola akceptorów transportu elektronów z PSII (Area)

Pomiary wielkości pola akceptorów transportu elektronów z PSII (Area) w pierwszym dniu suszy wykazały istotne statystycznie różnice pomiędzy obiektami kontrolnymi (K1) a obiektami w suszy (S1). Wartości Area spadły na skutek suszy średnio o 42%. U żadnego genotypu nie nastąpił wzrost parametru, a u 7 spadek wartości był istotny statystycznie. Najwyższe zmiany parametru nastąpiły u linii nr 35 i 55, gdzie spadek wartości wyniósł odpowiednio 66% i 53%. Najmniejszy wpływ suszy stwierdzono u linii nr 18, gdzie spadek wyniósł jedynie 14%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości parametru Area odnotowano u linii nr 119 i 35, a najniższe u linii nr 1b i 18. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 119 i 78b oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 1b i 55 (Tabela 20).

W czternastym dniu badań wartości parametru Area spadły u obiektów kontrolnych (K2) i w suszy (S2) o odpowiednio 18% i 11% w stosunku do pierwszego dnia suszy. Nadal wartości u obiektów kombinacji w suszy były istotnie niższe od tych stwierdzonych u obiektów kombinacji kontrolnej. Różnica w wartościach parametru Area na skutek suszy w czternastym dniu wyniosła 38%. U żadnego z genotypów w suszy (S2) nie odnotowano wyższych niż u obiektów kontrolnych (K2) wartości parametru Area w czternastym dniu suszy. U 10 linii różnice były istotne statystycznie. Najwyższe różnice stwierdzono u linii nr 42 i 9, gdzie spadki wyniosły odpowiednio 68% i 65%. Najmniejszy wpływ suszy stwierdzono u linii nr 119, u której spadek wyniósł jedynie 7%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości parametru Area odnotowano u linii nr 119 i 9, a najniższe u linii nr 43 i 26. Z kolei wśród obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 119 i 114, a najniższe u linii nr 42 i 55 (Tabela 20).

Tabela 20. Wielkości pola akceptorów transportu elektronów z PSII (Area) u linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |          |               | S1            |          |               | K2            |          |               | S2            |          |               |
|----------------|---------------|----------|---------------|---------------|----------|---------------|---------------|----------|---------------|---------------|----------|---------------|
|                | 1             | 2        | 3             | 1             | 2        | 3             | 1             | 2        | 3             | 1             | 2        | 3             |
| 9              | 67 025        | gh       | 43 397        | 36 450        | a-d      | 8 820         | 62 425        | lm       | 29 895        | 21 875        | abc      | 6 221         |
| 12             | 62 500        | e-h      | 28 035        | 31 300        | ab       | 5 798         | 45 475        | g-j      | 7 568         | 34 850        | c-h      | 7 753         |
| 18             | 40 933        | a-f      | 2 925         | 35 250        | a-d      | 3 436         | 49 000        | h-l      | 1 442         | 35 050        | c-h      | 7 100         |
| 23             | 45 475        | a-g      | 14 249        | 33 775        | abc      | 5 664         | 44 100        | f-j      | 7 595         | 27 500        | a-d      | 5 554         |
| 26             | 50 975        | b-g      | 14 782        | 31 675        | abc      | 2 572         | 44 050        | f-j      | 5 229         | 29 100        | a-e      | 5 986         |
| 35             | 96 900        | ij       | 31 335        | 32 750        | abc      | 12 327        | 60 300        | klm      | 21 877        | 27 700        | a-d      | 6 704         |
| 42             | 66 175        | fgh      | 29 240        | 31 025        | ab       | 5 807         | 50 575        | i-l      | 5 575         | 15 975        | a        | 11 898        |
| 43             | 42 575        | a-g      | 2 760         | 33 850        | abc      | 6 924         | 42 400        | e-j      | 1 894         | 31 050        | b-g      | 10 895        |
| 55             | 64 625        | e-h      | 18 242        | 30 100        | ab       | 7 486         | 44 200        | f-j      | 7 764         | 17 925        | ab       | 8 674         |
| 83             | 47 800        | b-g      | 6 519         | 35 900        | a-d      | 17 667        | 44 875        | f-j      | 12 267        | 37 800        | d-i      | 14 052        |
| 114            | 57 450        | c-h      | 6 924         | 40 400        | a-e      | 13 420        | 55 100        | jkl      | 5 456         | 37 950        | d-i      | 5 214         |
| 119            | 107 850       | j        | 59 670        | 60 050        | d-h      | 28 090        | 77 000        | n        | 33 448        | 71 750        | mn       | 25 084        |
| 1b             | 39 850        | a-e      | 4 816         | 21 175        | a        | 4 376         | 52 650        | jkl      | 2 943         | 30 775        | b-f      | 10 700        |
| 78b            | 62 925        | e-h      | 31 276        | 40 500        | a-e      | 19 596        | 44 975        | f-j      | 7 297         | 23 875        | a-d      | 7 220         |
| Bingo          | 78 950        | hi       | 35 419        | 42 800        | a-g      | 12 856        | 47 950        | h-k      | 2 818         | 32 600        | c-g      | 5 647         |
| <b>Średnia</b> | <b>62 134</b> | <b>c</b> | <b>32 147</b> | <b>35 800</b> | <b>a</b> | <b>14 245</b> | <b>51 005</b> | <b>b</b> | <b>16 097</b> | <b>31 718</b> | <b>a</b> | <b>15 944</b> |

<sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-n</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Wskaźnik funkcjonowania PSII (PI)

Wskaźnik funkcjonowania PSII (PI) w pierwszym dniu suszy wykazał istotne różnice pomiędzy obiektami kombinacji kontrolnej (K1) a obiektami kombinacji w suszy (S1). Na skutek suszy wartości wskaźnika spadły średnio o 19% u wszystkich genotypów. Reakcja widoczna w zmianach wartości wskaźnika PI u poszczególnych genotypów była różna. U linii nr 12, 35, 42 i 55 odnotowano wzrost wartości wskaźnika. U pozostałych 11 genotypów odnotowano spadek wartości wskaźnika na skutek suszy, a u linii nr 114, 119 i 1b oraz u odmiany Bingo różnice były istotne statystycznie. Najwyższy spadek wystąpił u linii nr 119, u której wyniósł 87%. Spośród obiektów K1 najwyższe wartości wskaźnika stwierdzono u linii nr 114 i 18, a najniższe u linii nr 35 i 55. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości wskaźnika PI odnotowano u linii nr 18 i 42, a najniższe u linii nr 119 i 35 oraz u odmiany Bingo (Tabela 21).

W czternastym dniu suszy u obiektów kontrolnych odnotowano wzrost wartości wskaźnika PI o 33%, a u obiektów w suszy stwierdzono spadek o 7% w stosunku do pierwszego dnia suszy. Przełożyło się to na większy niż w pierwszym dniu suszy średni spadek wartości wskaźnika na skutek działania stresu u obiektów kontrolnych w porównaniu do obiektów w suszy, gdyż w czternastym dniu suszy wyniósł on 43%. Tylko u dwóch linii (nr 35 i 12) odnotowano wzrost wartości badanego wskaźnika – o odpowiednio 55% i 30%. U pozostałych 13 linii nastąpił spadek PI, u 8 z nich był on istotny statystycznie, jednak najwyższy (87%) odnotowano u linii nr 119. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości wskaźnika PI stwierdzono u linii nr 18 i 1b, a najniższe u linii nr 35 i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 18 i 114 oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 119 i 9 (Tabela 21).

Tabela 21. Wartości wskaźnika funkcjonowania PSII (PI) u linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1                      |   |             | S1                      |   |             | K2                      |   |             | S2                      |   |             |
|----------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|
|                | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           |
| 9              | 1,49 <sup>f-i</sup>     |   | 0,97        | 1,06 <sup>b-f</sup>     |   | 0,47        | 1,67 <sup>f-j</sup>     |   | 1,29        | 0,35 <sup>abc</sup>     |   | 0,25        |
| 12             | 1,20 <sup>b-f</sup>     |   | 0,96        | 1,67 <sup>f-j</sup>     |   | 0,61        | 1,29 <sup>e-i</sup>     |   | 0,56        | 1,65 <sup>f-j</sup>     |   | 0,51        |
| 18             | 2,45 <sup>kl</sup>      |   | 0,33        | 2,29 <sup>jkl</sup>     |   | 0,38        | 3,25 <sup>m</sup>       |   | 0,80        | 2,63 <sup>klm</sup>     |   | 0,73        |
| 23             | 1,99 <sup>g-k</sup>     |   | 0,98        | 1,36 <sup>d-h</sup>     |   | 0,86        | 1,83 <sup>h-k</sup>     |   | 0,94        | 0,82 <sup>a-f</sup>     |   | 0,41        |
| 26             | 1,98 <sup>g-k</sup>     |   | 1,18        | 1,63 <sup>f-j</sup>     |   | 0,91        | 2,10 <sup>ijk</sup>     |   | 1,11        | 1,22 <sup>d-h</sup>     |   | 0,66        |
| 35             | 0,32 <sup>a</sup>       |   | 0,22        | 0,55 <sup>abc</sup>     |   | 0,17        | 0,25 <sup>ab</sup>      |   | 0,09        | 0,39 <sup>a-d</sup>     |   | 0,24        |
| 42             | 1,18 <sup>b-f</sup>     |   | 0,89        | 2,17 <sup>ijk</sup>     |   | 0,63        | 2,12 <sup>ijk</sup>     |   | 1,23        | 0,87 <sup>a-g</sup>     |   | 0,63        |
| 43             | 2,10 <sup>ijk</sup>     |   | 0,91        | 2,01 <sup>h-k</sup>     |   | 0,91        | 3,00 <sup>lm</sup>      |   | 0,40        | 1,47 <sup>e-j</sup>     |   | 0,46        |
| 55             | 0,50 <sup>ab</sup>      |   | 0,29        | 1,26 <sup>c-g</sup>     |   | 0,26        | 2,15 <sup>ijk</sup>     |   | 1,27        | 0,87 <sup>a-g</sup>     |   | 0,58        |
| 83             | 1,75 <sup>f-k</sup>     |   | 0,77        | 1,23 <sup>b-f</sup>     |   | 0,28        | 1,88 <sup>h-k</sup>     |   | 1,23        | 1,07 <sup>b-h</sup>     |   | 0,47        |
| 114            | 2,91 <sup>l</sup>       |   | 0,51        | 1,46 <sup>e-i</sup>     |   | 0,86        | 3,16 <sup>m</sup>       |   | 0,68        | 1,70 <sup>g-j</sup>     |   | 0,77        |
| 119            | 1,36 <sup>d-h</sup>     |   | 0,50        | 0,17 <sup>a</sup>       |   | 0,10        | 1,48 <sup>e-j</sup>     |   | 0,30        | 0,19 <sup>a</sup>       |   | 0,07        |
| 1b             | 2,23 <sup>jk</sup>      |   | 0,51        | 1,14 <sup>b-f</sup>     |   | 0,34        | 3,23 <sup>m</sup>       |   | 0,44        | 1,31 <sup>e-i</sup>     |   | 0,50        |
| 78b            | 1,04 <sup>b-f</sup>     |   | 0,67        | 0,73 <sup>a-e</sup>     |   | 0,25        | 1,10 <sup>c-h</sup>     |   | 0,46        | 0,71 <sup>a-e</sup>     |   | 0,33        |
| Bingo          | 0,70 <sup>a-d</sup>     |   | 0,13        | 0,15 <sup>a</sup>       |   | 0,06        | 2,30 <sup>jkl</sup>     |   | 1,41        | 2,27 <sup>jkl</sup>     |   | 0,56        |
| <b>Średnia</b> | <b>1,55<sup>b</sup></b> |   | <b>0,99</b> | <b>1,26<sup>a</sup></b> |   | <b>0,82</b> | <b>2,05<sup>c</sup></b> |   | <b>1,19</b> | <b>1,17<sup>a</sup></b> |   | <b>0,83</b> |

<sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-m</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

## Tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS (ETo/CS)

Tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS (ETo/CS) w pierwszym dniu suszy było istotnie niższe u obiektów w suszy (S1) niż u obiektów kontrolnych (K1). Różnica wyniosła 6%. U 7 linii OMA oraz u odmiany Bingo odnotowano nieistotne wzrosty wartości ETo/CS na skutek suszy. U pozostałych 7 linii odnotowano obniżenia wartości ETo/CS, z czego u 2 były one istotne statystycznie. Najwyższe spadki wartości ETo/CS stwierdzono u linii nr 35 i 42, gdzie wyniosły odpowiednio 25% i 26%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości parametru odnotowano u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 18 i 83. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 23 i 78b oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 1b i 42 (Tabela 22).

Tabela 22. Tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS (ETo/CS) u linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |                |              | S1            |                |              | K2            |                |              | S2            |                |              |
|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|
|                | 1             | 2              | 3            | 1             | 2              | 3            | 1             | 2              | 3            | 1             | 2              | 3            |
| 9              | 222,38        | <sup>b-h</sup> | 68,22        | 228,99        | <sup>b-h</sup> | 43,69        | 239,55        | <sup>i</sup>   | 59,26        | 180,37        | <sup>b-e</sup> | 37,26        |
| 12             | 249,28        | <sup>e-h</sup> | 60,85        | 197,77        | <sup>a-e</sup> | 19,39        | 246,89        | <sup>i</sup>   | 54,14        | 187,19        | <sup>c-f</sup> | 26,86        |
| 18             | 180,52        | <sup>ab</sup>  | 9,40         | 194,33        | <sup>a-d</sup> | 13,49        | 205,66        | <sup>d-i</sup> | 4,86         | 186,68        | <sup>c-f</sup> | 21,98        |
| 23             | 216,71        | <sup>a-g</sup> | 34,49        | 247,51        | <sup>e-h</sup> | 43,37        | 220,31        | <sup>e-i</sup> | 19,48        | 192,78        | <sup>c-h</sup> | 33,99        |
| 26             | 226,53        | <sup>b-h</sup> | 39,53        | 221,49        | <sup>a-h</sup> | 27,62        | 227,44        | <sup>f-i</sup> | 40,80        | 184,30        | <sup>b-f</sup> | 47,74        |
| 35             | 322,82        | <sup>i</sup>   | 38,53        | 242,42        | <sup>c-h</sup> | 30,30        | 322,42        | <sup>j</sup>   | 60,90        | 211,00        | <sup>e-i</sup> | 46,46        |
| 42             | 253,44        | <sup>fgh</sup> | 64,41        | 187,52        | <sup>ab</sup>  | 12,00        | 220,19        | <sup>e-i</sup> | 34,97        | 100,71        | <sup>a</sup>   | 43,06        |
| 43             | 200,05        | <sup>a-e</sup> | 25,70        | 208,42        | <sup>a-f</sup> | 15,98        | 190,95        | <sup>c-g</sup> | 3,60         | 178,32        | <sup>b-e</sup> | 29,66        |
| 55             | 269,95        | <sup>h</sup>   | 45,19        | 227,00        | <sup>b-h</sup> | 42,71        | 216,06        | <sup>e-i</sup> | 38,57        | 143,26        | <sup>b</sup>   | 34,93        |
| 83             | 191,02        | <sup>abc</sup> | 14,02        | 208,60        | <sup>a-f</sup> | 48,52        | 186,88        | <sup>c-f</sup> | 50,44        | 240,15        | <sup>i</sup>   | 66,37        |
| 114            | 197,79        | <sup>a-e</sup> | 9,71         | 225,18        | <sup>b-h</sup> | 38,71        | 187,90        | <sup>c-f</sup> | 9,69         | 193,83        | <sup>c-h</sup> | 2,96         |
| 119            | 265,48        | <sup>gh</sup>  | 61,40        | 219,27        | <sup>a-h</sup> | 70,47        | 237,13        | <sup>hi</sup>  | 38,73        | 236,81        | <sup>hi</sup>  | 35,81        |
| 1b             | 192,56        | <sup>abc</sup> | 5,97         | 169,86        | <sup>a</sup>   | 17,66        | 203,85        | <sup>d-i</sup> | 5,28         | 153,69        | <sup>bc</sup>  | 21,01        |
| 78b            | 241,64        | <sup>c-h</sup> | 66,60        | 247,04        | <sup>d-h</sup> | 73,83        | 235,51        | <sup>ghi</sup> | 41,64        | 215,13        | <sup>e-i</sup> | 60,62        |
| Bingo          | 259,45        | <sup>fgh</sup> | 50,78        | 271,71        | <sup>h</sup>   | 59,31        | 221,09        | <sup>e-i</sup> | 45,26        | 162,40        | <sup>bcd</sup> | 10,88        |
| <b>Średnia</b> | <b>232,64</b> | <sup>c</sup>   | <b>56,60</b> | <b>219,81</b> | <sup>b</sup>   | <b>47,01</b> | <b>224,12</b> | <sup>bc</sup>  | <b>48,79</b> | <b>184,44</b> | <sup>a</sup>   | <b>49,99</b> |

<sup>a-i</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu wartości ETo/CS spadły o 4% u obiektów kontrolnych (K2) i o 16% u obiektów w suszy (S2) w porównaniu do pierwszego dnia pomiarów. Na skutek suszy wartości tego parametru były o 18% niższe od obiektów kombinacji kontrolnej. Jedynie u dwóch linii odnotowano wzrost wartości, ale tylko u linii nr 83 był istotny statystycznie i wynosił 29%. U 13 linii stwierdzono spadki wartości ETo/CS, a największe u linii nr 42 i 35, odpowiednio 54% i 35%. Łącznie u 7 linii obserwowane spadki były istotne statystycznie. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 35 i 12, a najniższe u linii nr 83 i 114. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 83 i 119, a najniższe u linii nr 42 i 55 (Tabela 22).

Parametr charakteryzujący zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (RC/CS<sub>o</sub>)

W pierwszym dniu analiz wartości RC/CS<sub>o</sub> nie wykazały istotnych różnic pomiędzy obiektami kontrolnymi (K1) a obiektami w suszy (S1). Średnio na skutek suszy wartości spadły o 2%, ale wśród poszczególnych linii zaobserwowano istotne wzrosty lub spadki wartości tego parametru. Najwyższy, 18% wzrost, odnotowano u odmiany Bingo. U 5 genotypów cechujących się wzrostem wartości parametru różnice nie były istotne statystycznie. U 9 genotypów obserwowano spadki wartości parametru, a najwyższe wystąpiły u linii nr 1b i 42, gdzie wyniosły odpowiednio 21% i 17%. Najwyższe wartości RC/CS<sub>o</sub> spośród obiektów kontrolnych (K1) odnotowano u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 9 i 18 oraz u odmiany Bingo. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 35 i 119 oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 1b i 18 (Tabela 23).

W czternastym dniu wartości parametru RC/CS<sub>o</sub> u obiektów kombinacji kontrolnej (K2) wzrosły o 8%, a u obiektów kombinacji w suszy (S2) spadły o 8% w porównaniu do pierwszego dnia analiz. Przełożyło się to na istotne różnice wywołane sposobem traktowania: na skutek suszy po 14 dniach średnie wartości RC/CS<sub>o</sub> u obiektów w suszy (S2) były o 17% niższe niż u obiektów kontrolnych (K2). Tylko u jednego genotypu stwierdzono wzrost wartości parametru: u linii nr 83 odnotowano go na poziomie 17%, co stanowiło istotną statystycznie wartość. U pozostałych 13 genotypów oraz u odmiany Bingo stwierdzono spadek wartości parametru na skutek suszy, a u 10 był istotny statystycznie. Najwyższe spadki odnotowano u linii nr 42 i 55, gdzie wyniosły odpowiednio 50% i 33%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) w czternastym dniu suszy najwyższe wartości odnotowano u linii nr 35 i 55,

a najniższe u linii nr 43 i 83. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości RC/CS<sub>0</sub> stwierdzono u linii nr 83 i 35, a najniższe u linii nr 42 i 1b (Tabela 23).

Tabela 23. Parametr charakteryzujący zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (RC/CS<sub>0</sub>) u linii OMA w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |                |              | S1            |                |              | K2            |                |              | S2            |                |              |
|----------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------------|
|                | 1             | 2              | 3            | 1             | 2              | 3            | 1             | 2              | 3            | 1             | 2              | 3            |
| 9              | 143,23        | <sup>b-e</sup> | 19,83        | 152,36        | <sup>b-h</sup> | 22,66        | 172,27        | <sup>ijk</sup> | 17,00        | 146,63        | <sup>d-g</sup> | 31,82        |
| 12             | 154,46        | <sup>b-i</sup> | 3,77         | 140,29        | <sup>bcd</sup> | 13,70        | 169,22        | <sup>g-k</sup> | 21,32        | 142,65        | <sup>def</sup> | 20,48        |
| 18             | 147,40        | <sup>b-f</sup> | 9,47         | 134,17        | <sup>ab</sup>  | 8,93         | 153,58        | <sup>e-j</sup> | 7,27         | 148,02        | <sup>d-h</sup> | 11,89        |
| 23             | 151,02        | <sup>b-h</sup> | 6,78         | 160,96        | <sup>d-i</sup> | 17,74        | 158,74        | <sup>e-k</sup> | 5,89         | 140,07        | <sup>de</sup>  | 17,68        |
| 26             | 163,94        | <sup>e-i</sup> | 5,19         | 147,80        | <sup>b-f</sup> | 16,43        | 173,83        | <sup>ijk</sup> | 14,96        | 140,79        | <sup>de</sup>  | 33,76        |
| 35             | 175,95        | <sup>ij</sup>  | 10,17        | 187,18        | <sup>j</sup>   | 30,97        | 211,28        | <sup>l</sup>   | 14,25        | 173,99        | <sup>ijk</sup> | 29,83        |
| 42             | 162,64        | <sup>d-i</sup> | 14,99        | 135,01        | <sup>abc</sup> | 14,41        | 158,91        | <sup>e-k</sup> | 9,10         | 79,34         | <sup>a</sup>   | 34,88        |
| 43             | 153,20        | <sup>b-h</sup> | 14,09        | 144,75        | <sup>b-f</sup> | 11,01        | 150,29        | <sup>d-i</sup> | 3,51         | 135,88        | <sup>cde</sup> | 23,61        |
| 55             | 173,11        | <sup>hij</sup> | 9,57         | 163,97        | <sup>e-i</sup> | 20,06        | 175,57        | <sup>jk</sup>  | 17,50        | 117,77        | <sup>bc</sup>  | 22,86        |
| 83             | 159,05        | <sup>d-i</sup> | 5,10         | 150,24        | <sup>b-g</sup> | 36,46        | 153,02        | <sup>e-j</sup> | 39,72        | 178,64        | <sup>k</sup>   | 20,79        |
| 114            | 157,84        | <sup>d-i</sup> | 7,27         | 156,55        | <sup>c-i</sup> | 19,80        | 165,63        | <sup>f-k</sup> | 13,46        | 150,78        | <sup>d-i</sup> | 5,51         |
| 119            | 159,17        | <sup>d-i</sup> | 8,86         | 166,14        | <sup>f-i</sup> | 42,25        | 173,19        | <sup>ijk</sup> | 10,55        | 153,47        | <sup>e-j</sup> | 23,97        |
| 1b             | 148,90        | <sup>b-g</sup> | 5,03         | 117,92        | <sup>a</sup>   | 6,98         | 168,22        | <sup>g-k</sup> | 5,84         | 113,38        | <sup>b</sup>   | 11,69        |
| 78b            | 152,16        | <sup>b-h</sup> | 9,47         | 160,37        | <sup>d-i</sup> | 33,51        | 175,15        | <sup>jk</sup>  | 27,85        | 155,56        | <sup>e-k</sup> | 36,42        |
| Bingo          | 144,29        | <sup>b-f</sup> | 12,56        | 170,36        | <sup>g-j</sup> | 25,74        | 171,53        | <sup>h-k</sup> | 21,67        | 129,10        | <sup>bcd</sup> | 12,12        |
| <b>Średnia</b> | <b>156,42</b> | <sup>b</sup>   | <b>13,49</b> | <b>152,54</b> | <sup>b</sup>   | <b>27,70</b> | <b>168,70</b> | <sup>c</sup>   | <b>21,99</b> | <b>140,40</b> | <sup>a</sup>   | <b>32,87</b> |

<sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

## 6.2.4. Analiza wybranych elementów składowych plonu

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji wybranych elementów składowych plonu stwierdzono, że na badane cechy miały wpływ: sposób traktowania (T), genotyp (G) oraz ich interakcja ( $T \times G$ ). Nieistotny okazał się wpływ pokolenia (P) i interakcji traktowania i pokolenia ( $T \times P$ ) oraz traktowania, pokolenia i genotypu ( $T \times P \times G$ ). Wpływ interakcji pokolenia i genotypu ( $P \times G$ ) okazał się istotny tylko dla liczby i masy ziarniaków. Wartości testu F analizy wariancji wybranych elementów składowych plonu prezentuje Tabela 24.

Tabela 24. Analiza wariancji wybranych elementów składowych plonu linii OMA rosnących w warunkach szklarniowych

| zbiory            | T<br>(df = 1) | P<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | $T \times P$<br>(df = 1) | $T \times G$<br>(df = 14) | $P \times G$<br>(df = 14) | $T \times P \times G$<br>(df = 14) |
|-------------------|---------------|---------------|----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| masa pędów        | 318,02**      | 1,24          | 10,41**        | 1,34                     | 3,58**                    | 1,66                      | 0,82                               |
| liczba ziarniaków | 38,79**       | 0,67          | 35,12**        | 0,29                     | 4,48**                    | 4,57**                    | 0,40                               |
| masa ziarniaków   | 50,01**       | 1,45          | 33,73**        | 0,02                     | 6,42**                    | 4,09**                    | 0,67                               |
| $F_{0,05}$        | 3,894         | 3,894         | 1,747          | 3,894                    | 1,747                     | 1,747                     | 1,747                              |
| $F_{0,01}$        | 6,778         | 6,778         | 2,182          | 6,778                    | 2,182                     | 2,182                     | 2,182                              |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp,  $\times$  – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

## Masa pędów

Wykazano istotne różnice w łącznej masie pędów pomiędzy obiektami kontrolnymi (K) a obiektami w suszy (S). Średnio na skutek suszy zebrano o 43% mniej biomasy części nadziemnych. U żadnego genotypu nie stwierdzono wzrostu masy pędów na skutek suszy. Jedynie u linii nr 114 spadek zebranej łącznej masy nie był istotny statystycznie i wyniósł tylko 31%. U pozostałych linii OMA oraz u odmiany Bingo spadki zebranej biomasy części nadziemnych na skutek suszy były istotne statystycznie. Najwyższe spadki stwierdzono u linii nr 18 i 78b oraz u odmiany Bingo, gdzie wyniosły odpowiednio 58%, 56% i 75%. Spośród obiektów kontrolnych (K) najwyższe masy pędów odnotowano u linii nr 78b i 1b, a najniższe u linii nr 114 i 83. Z kolei wśród obiektów w suszy (S) najwyższe masy pędów stwierdzono u linii nr 1b i 119, a najniższe u linii nr 83 i 18 oraz u odmiany Bingo (Tabela 25).

Tabela 25. Masa pędów linii OMA [g] w doświadczeniu szklarniowym (K – kontrola, S – susza)

| Genotyp        | K            |          |             | S           |          |             |
|----------------|--------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|
|                | 1            | 2        | 3           | 1           | 2        | 3           |
| 9              | 13,25        | efg      | 2,04        | 8,78        | cd       | 3,66        |
| 12             | 14,84        | g-j      | 3,33        | 9,10        | cd       | 0,83        |
| 18             | 13,57        | fgh      | 2,06        | 5,72        | ab       | 1,39        |
| 23             | 16,49        | h-k      | 2,60        | 10,46       | de       | 1,50        |
| 26             | 13,54        | fgh      | 2,32        | 9,27        | cd       | 0,99        |
| 35             | 14,83        | g-j      | 1,09        | 7,84        | bcd      | 1,40        |
| 42             | 12,92        | efg      | 2,19        | 7,95        | bcd      | 4,78        |
| 43             | 13,99        | ghi      | 2,11        | 8,88        | cd       | 1,40        |
| 55             | 14,00        | ghi      | 2,01        | 8,56        | bcd      | 1,50        |
| 83             | 9,46         | d        | 5,41        | 4,50        | a        | 3,28        |
| 114            | 9,04         | cd       | 3,89        | 6,21        | abc      | 1,39        |
| 119            | 16,88        | ijk      | 4,94        | 10,85       | def      | 1,42        |
| 1b             | 17,28        | jk       | 3,07        | 12,71       | efg      | 1,98        |
| 78b            | 18,28        | k        | 3,13        | 8,11        | bcd      | 1,14        |
| Bingo          | 17,16        | jk       | 3,16        | 4,29        | a        | 3,09        |
| <b>Średnia</b> | <b>14,37</b> | <b>b</b> | <b>3,90</b> | <b>8,21</b> | <b>a</b> | <b>3,10</b> |

<sup>a-k</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Liczba ziarniaków

Liczba wykształconych ziarniaków różniła się u poszczególnych genotypów. Na skutek suszy wystąpił istotny statystycznie spadek liczby ziarniaków u obiektów w suszy (S) średnio o 31% w porównaniu do obiektów kontrolnych (K). U kilku genotypów wystąpiły wzrosty liczby wykształconych ziarniaków, ale nie były one istotne statystycznie. Sytuacja taka wystąpiła u linii nr 114, 42 i 55, ale linie te wykształciły ogólnie mało ziarniaków zarówno u obiektów kontrolnych, jak i tych w suszy. Istotne statystycznie spadki liczby ziarniaków wystąpiły u linii nr 23, 78b, 83 i 9 oraz u odmiany Bingo, gdzie wyniosły odpowiednio 52%, 44%, 38%, 25% i 62%. Procentowe spadki u niektórych genotypów były wyższe, ale z racji niskiej liczby wykształconych ziarniaków nie były one istotne statystycznie. Spośród obiektów kontrolnych (K) najwięcej ziarniaków stwierdzono u linii nr 78b i 9, a najmniej u linii nr 114 i 18. Z kolei wśród obiektów w suszy (S) najwięcej ziarniaków odnotowano u linii nr 9 i 78b, a najmniej u linii nr 18 i 114 (Tabela 26).



Tabela 26. Liczba ziarniaków linii OMA owsa w doświadczeniu szklarniowym (K – kontrola, S – susza)

| Genotyp        | K                        |   |              | S                        |   |              |
|----------------|--------------------------|---|--------------|--------------------------|---|--------------|
|                | 1                        | 2 | 3            | 1                        | 2 | 3            |
| 9              | 130,38 <sup>l</sup>      |   | 25,31        | 97,63 <sup>k</sup>       |   | 48,89        |
| 12             | 97,00 <sup>k</sup>       |   | 31,41        | 75,50 <sup>h-k</sup>     |   | 17,20        |
| 18             | 8,25 <sup>ab</sup>       |   | 2,31         | 0,25 <sup>a</sup>        |   | 0,46         |
| 23             | 67,50 <sup>f-j</sup>     |   | 18,83        | 32,25 <sup>b-e</sup>     |   | 8,07         |
| 26             | 46,88 <sup>d-h</sup>     |   | 14,92        | 41,50 <sup>c-g</sup>     |   | 8,07         |
| 35             | 69,25 <sup>g-j</sup>     |   | 22,13        | 58,25 <sup>e-i</sup>     |   | 9,63         |
| 42             | 17,25 <sup>abc</sup>     |   | 12,94        | 26,75 <sup>a-d</sup>     |   | 23,76        |
| 43             | 36,38 <sup>b-e</sup>     |   | 30,27        | 32,88 <sup>b-e</sup>     |   | 23,95        |
| 55             | 40,25 <sup>c-f</sup>     |   | 22,37        | 54,25 <sup>d-h</sup>     |   | 14,03        |
| 83             | 93,75 <sup>jk</sup>      |   | 65,43        | 57,75 <sup>e-i</sup>     |   | 53,60        |
| 114            | 1,00 <sup>a</sup>        |   | 1,07         | 2,67 <sup>a</sup>        |   | 1,57         |
| 119            | 8,88 <sup>ab</sup>       |   | 2,90         | 8,75 <sup>ab</sup>       |   | 2,38         |
| 1b             | 69,75 <sup>g-j</sup>     |   | 23,52        | 41,50 <sup>c-g</sup>     |   | 17,57        |
| 78b            | 149,75 <sup>l</sup>      |   | 63,59        | 83,38 <sup>ijk</sup>     |   | 13,56        |
| Bingo          | 124,25 <sup>l</sup>      |   | 17,34        | 47,75 <sup>d-h</sup>     |   | 31,13        |
| <b>Średnia</b> | <b>64,03<sup>b</sup></b> |   | <b>53,86</b> | <b>44,07<sup>a</sup></b> |   | <b>35,63</b> |

<sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Masa ziarniaków

Masa ziarniaków wykształconych przez jedną roślinę spadła u obiektów w suszy (S) średnio o 34% w porównaniu do obiektów kontrolnych (K). Jedynie u linii nr 114, 42 i 55 stwierdzono nieistotnie statystycznie wzrosty masy ziarniaków. Miało to miejsce w przypadku ogólnej bardzo niskiej liczbie wykształconych ziarniaków. U pozostałych genotypów odnotowano spadki. U linii nr 1b, 83, 78b i 9 oraz u odmiany Bingo były one istotne statystycznie. Najwyższe istotne różnice stwierdzono u linii nr 1b oraz u odmiany Bingo, gdzie wyniosły odpowiednio 43% i 71%. Spośród obiektów kombinacji kontrolnej (K) najwyższe masy ziarniaków odnotowano u linii nr 9 i 78b oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 18 i 114. Z kolei wśród obiektów kombinacji w suszy (S) najwyższe masy stwierdzono u linii nr 9 i 78b, a najniższe u linii nr 18 i 114 (Tabela 27).

Tabela 27. Masa ziarniaków linii OMA [g] w doświadczeniu szklarniowym (K – kontrola, S – susza)

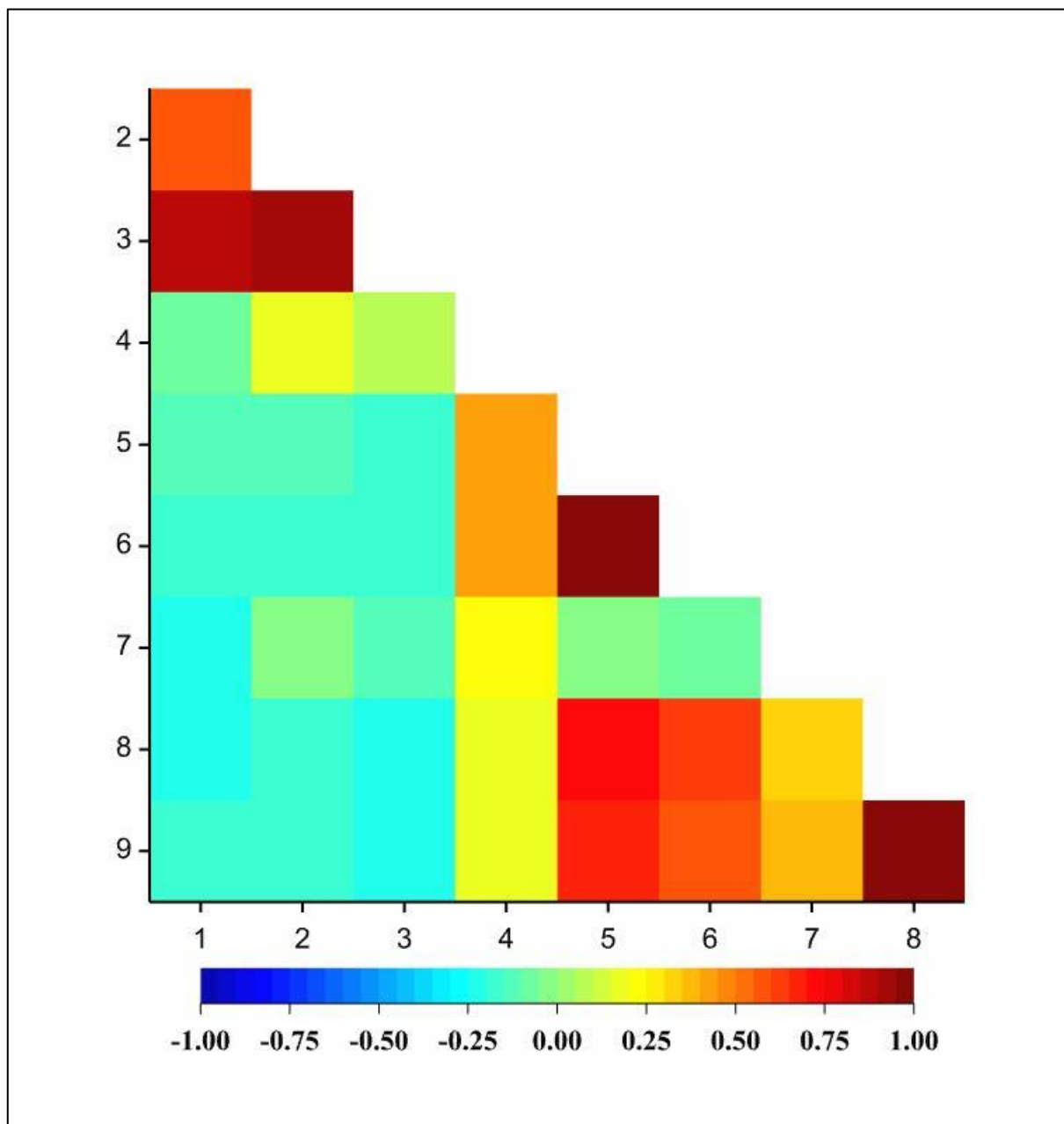
| Genotyp        | K                       |   |             | S                       |   |             |
|----------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|
|                | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           |
| 9              | 5,88 <sup>l</sup>       |   | 2,25        | 3,71 <sup>jk</sup>      |   | 1,94        |
| 12             | 3,77 <sup>k</sup>       |   | 1,21        | 2,98 <sup>g-k</sup>     |   | 0,63        |
| 18             | 0,31 <sup>ab</sup>      |   | 0,09        | 0,01 <sup>a</sup>       |   | 0,01        |
| 23             | 2,73 <sup>e-k</sup>     |   | 0,73        | 1,26 <sup>bcd</sup>     |   | 0,34        |
| 26             | 2,20 <sup>d-i</sup>     |   | 0,70        | 1,90 <sup>c-h</sup>     |   | 0,37        |
| 35             | 2,96 <sup>f-k</sup>     |   | 0,74        | 2,58 <sup>e-j</sup>     |   | 0,37        |
| 42             | 0,75 <sup>abc</sup>     |   | 0,63        | 1,33 <sup>bcd</sup>     |   | 1,25        |
| 43             | 1,65 <sup>cde</sup>     |   | 1,30        | 1,59 <sup>cde</sup>     |   | 1,12        |
| 55             | 1,85 <sup>c-g</sup>     |   | 0,98        | 2,25 <sup>d-i</sup>     |   | 0,66        |
| 83             | 3,80 <sup>k</sup>       |   | 2,50        | 2,22 <sup>d-i</sup>     |   | 2,06        |
| 114            | 0,05 <sup>a</sup>       |   | 0,05        | 0,09 <sup>a</sup>       |   | 0,07        |
| 119            | 0,40 <sup>ab</sup>      |   | 0,08        | 0,32 <sup>ab</sup>      |   | 0,09        |
| 1b             | 3,08 <sup>h-k</sup>     |   | 0,99        | 1,76 <sup>c-f</sup>     |   | 0,76        |
| 78b            | 5,63 <sup>l</sup>       |   | 1,84        | 3,33 <sup>ijk</sup>     |   | 0,48        |
| Bingo          | 6,24 <sup>l</sup>       |   | 0,88        | 1,83 <sup>c-g</sup>     |   | 1,57        |
| <b>Średnia</b> | <b>2,75<sup>b</sup></b> |   | <b>2,28</b> | <b>1,81<sup>a</sup></b> |   | <b>1,44</b> |

<sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### 6.2.5. Korelacje

Obliczono współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy parametrami testu utraty wody a analizowanymi elementami składowymi plonu zarówno dla obiektów kontrolnych, jak i tych w suszy. Zaobserwowano istotne korelacje dodatnie pomiędzy poszczególnymi parametrami testu utraty wody (szybkość utraty wody z liści przez pierwsze i kolejne 3 godziny oraz razem przez 6 godzin), a także pomiędzy elementami plonu biologicznego w kontroli oraz w suszy (łączna masa pędów oraz liczba i masa ziarniaków). Korelacje pomiędzy parametrami testu utraty wody a elementami plonu biologicznego okazały się w większości ujemne. Istotne statystycznie korelacje wystąpiły w przypadku wszystkich 3 parametrów testu utraty wody oraz liczby i masy ziarniaków wykształconych u obiektów poddanych stresowi suszy. Ponadto silna korelacja ( $\alpha = 0,01$ ) w tych warunkach wystąpiła pomiędzy utratą wody w pierwszych 3 godzinach a łączną masą pędów. W warunkach kontrolnych istotna korelacja wystąpiła jedynie dla łącznej masy ziarniaków i szybkości utraty wody z liści przez pierwsze 6 godziny.

Wartości poszczególnych współczynników korelacji przedstawia Tabela 28. Graficzne przedstawienie korelacji za pomocą heatmapy przedstawia Rycina 21.



Rycina 21. Heatmapa przedstawiająca graficznie tabelę korelacji parametrów testu utraty wody z wybranymi elementami składowymi plonu (1 – szybkość utraty wody z liści przez pierwsze 3 h, 2 – szybkość utraty wody z liści przez kolejne 3 h, 3 – szybkość utraty wody z liści przez pierwsze 6 h, 4 – łączna masa pędów – kontrola, 5 – łączna liczba ziarniaków – kontrola, 6 – łączna masa ziarniaków – kontrola, 7 – łączna masa pędów – susza, 8 – łączna liczba ziarniaków – susza, 9 – łączna masa ziarniaków – susza)

Silne korelacje dodatnie wystąpiły także pomiędzy poszczególnymi elementami składowymi plonu w kontroli i w suszy. Ponadto dodatnio korelowały ze sobą łączna liczba ziarniaków w kontroli z łączną masą ziarniaków w suszy oraz łączna liczba ziarniaków w suszy

z łączną masą ziarniaków w kontroli. Korelacja łącznej masy pędów w kontroli z łączną liczbą ziarniaków w suszy wykazała się istotnością przy  $\alpha = 0,05$  (Tabela 28).

Tabela 28. Macierz korelacji liniowej Pearsona wartości rzeczywistych pomiędzy parametrami testu utraty wody a wybranymi elementami składowymi plonu linii OMA w doświadczeniu szklarniowym

|   |                                     | 1     | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     | 7    | 8    | 9 |
|---|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|---|
| 1 | ELWL <sub>0-3 h</sub>               |       |       |       |      |       |       |      |      |   |
| 2 | ELWL <sub>4-6 h</sub>               | 0,56  |       |       |      |       |       |      |      |   |
| 3 | ELWL <sub>0-6 h</sub>               | 0,86  | 0,91  |       |      |       |       |      |      |   |
| 4 | łączna masa pędów – kontrola        | -0,07 | 0,19  | 0,07  |      |       |       |      |      |   |
| 5 | łączna liczba ziarniaków – kontrola | -0,13 | -0,14 | -0,16 | 0,44 |       |       |      |      |   |
| 6 | łączna masa ziarniaków – kontrola   | -0,17 | -0,17 | -0,20 | 0,43 | 0,95  |       |      |      |   |
| 7 | łączna masa pędów – susza           | -0,24 | -0,04 | -0,15 | 0,25 | -0,01 | -0,09 |      |      |   |
| 8 | łączna liczba ziarniaków – susza    | -0,20 | -0,19 | -0,23 | 0,19 | 0,70  | 0,62  | 0,34 |      |   |
| 9 | łączna masa ziarniaków – susza      | -0,20 | -0,19 | -0,23 | 0,18 | 0,65  | 0,57  | 0,38 | 0,99 |   |
|   |                                     | 1     | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     | 7    | 8    | 9 |

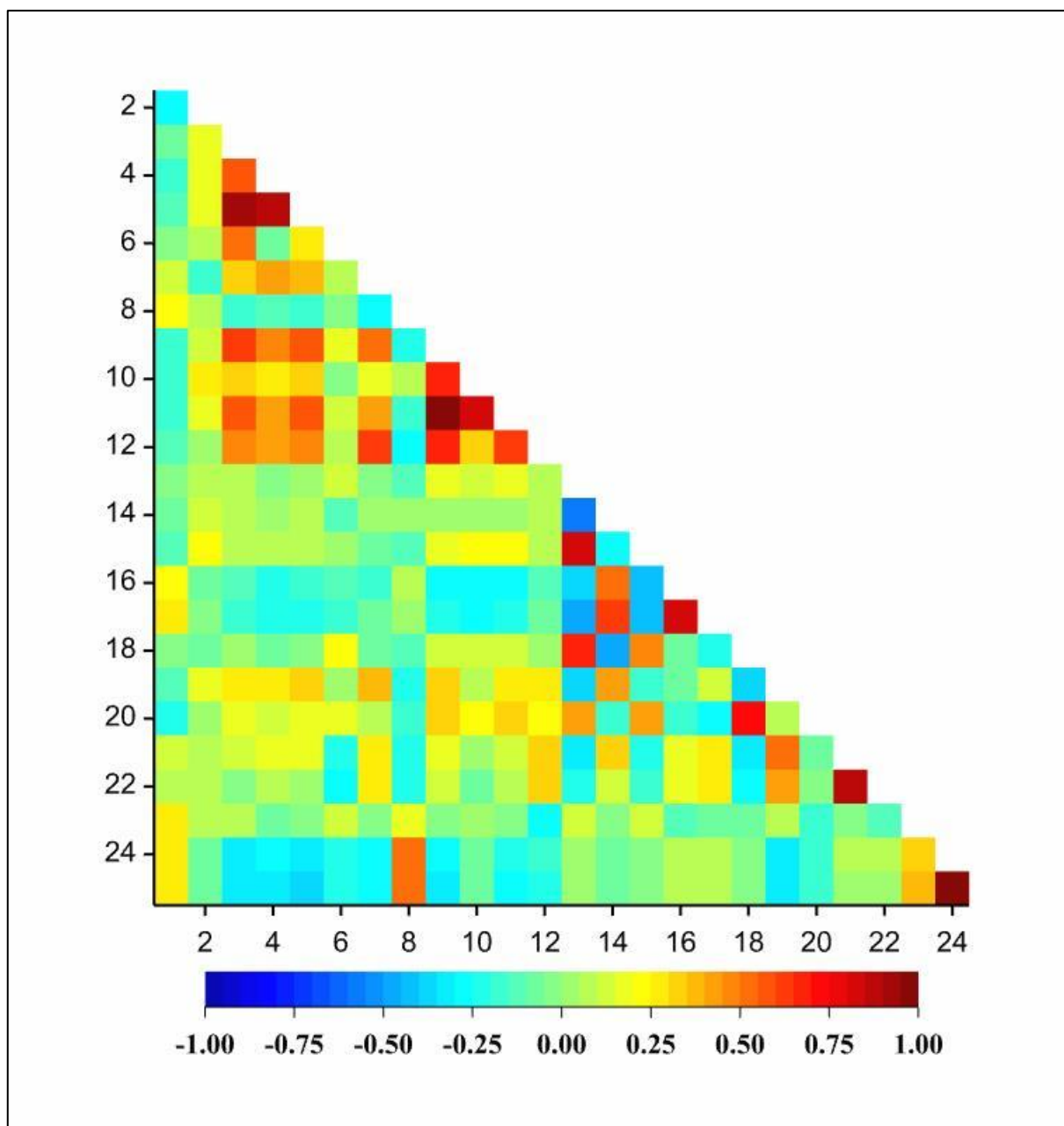
Korelacja:           ujemna                            dodatnia  
 pvalue =           0,01   0,05                            0,05   0,01

Obliczone wartości współczynników korelacji pomiędzy wszystkimi analizowanymi parametrami prezentuje Tabela 29. W doświadczeniu przeprowadzonym w szklarni stwierdzono występowanie 143 istotnych korelacji między analizowanymi dwójkami parametrów spośród 300, z czego 61 z nich było ujemnych, a 82 dodatnich. Zdecydowana większość analizowanych par (111 z 143) z silnymi korelacjami była stwierdzona na wyższym poziomie istotności  $\alpha = 0,01$ . Pomędzy analizowanymi elementami składowymi plonu stwierdzono występowanie silnych korelacji dodatnich z zawartością cukrów rozpuszczalnych w pierwszym dniu suszy, a także związków fenolowych w czternastym dniu. Zaobserwowano także występowanie istotnych korelacji ujemnych pomiędzy liczbą i masą ziarniaków a zawartościami chlorofilu *a* i *b* oraz karotenoidów w pierwszym dniu suszy, a w czternastym dniu suszy istotna korelacja ujemna wystąpiła z zawartością cukrów rozpuszczalnych, chlorofilu *a* oraz *a* i *b*. W czternastym dniu suszy zawartość karotenoidów ujemnie korelowała z masą pędów i ziarniaków. Spośród korelacji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* z elementami plonu istotne korelacje stwierdzono tylko pomiędzy parametrem Area w czternastym dniu suszy. Korelacja ta była ujemna i dotyczyła jedynie liczby i masy ziarniaków (Tabela 29). Graficzne przedstawienie tabeli korelacji w postaci heatmapy przedstawia Rycina 22.

Tabela 29. Macierz korelacji liniowej Pearsona wartości rzeczywistych pomiędzy analizowanymi cechami linii OMA w doświadczeniu szklarniowym

|  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23   | 24   | 25 |  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|----|--|
| 1 zawartość cukrów w terminie 1            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 2 zawartość fenoli w terminie 1            | -0,30 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 3 zawartość chlorofilu a w terminie 1      | -0,06 | 0,16  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 4 zawartość chlorofilu b w terminie 1      | -0,17 | 0,16  | 0,60  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 5 zawartość chlorofilu a i b w terminie 1  | -0,12 | 0,18  | 0,91  | 0,88  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 6 zawartość karotenoidów w terminie 1      | -0,05 | 0,06  | 0,50  | -0,08 | 0,26  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 7 zawartość cukrów w terminie 2            | 0,15  | -0,19 | 0,30  | 0,41  | 0,39  | 0,08  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 8 zawartość fenoli w terminie 2            | 0,21  | 0,07  | -0,17 | -0,15 | -0,18 | -0,05 | -0,30 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 9 zawartość chlorofilu a w terminie 2      | -0,15 | 0,14  | 0,61  | 0,46  | 0,60  | 0,17  | 0,51  | -0,22 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 10 zawartość chlorofilu b w terminie 2     | -0,20 | 0,27  | 0,32  | 0,28  | 0,34  | -0,01 | 0,15  | 0,06  | 0,69  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 11 zawartość chlorofilu a i b w terminie 2 | -0,18 | 0,18  | 0,57  | 0,44  | 0,57  | 0,13  | 0,45  | -0,16 | 0,98  | 0,82  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 12 zawartość karotenoidów w terminie 2     | -0,15 | 0,02  | 0,45  | 0,41  | 0,48  | 0,06  | 0,63  | -0,28 | 0,69  | 0,32  | 0,64  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 13 Fv/Fm w terminie 1                      | -0,03 | 0,08  | 0,05  | -0,03 | 0,02  | 0,14  | -0,05 | -0,12 | 0,16  | 0,14  | 0,16  | 0,08  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 14 Area w terminie 1                       | -0,06 | 0,14  | 0,06  | 0,05  | 0,06  | -0,10 | 0,01  | 0,04  | 0,03  | 0,02  | 0,03  | 0,08  | -0,59 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 15 PI w terminie 1                         | -0,13 | 0,22  | 0,09  | 0,07  | 0,09  | 0,04  | -0,07 | -0,13 | 0,20  | 0,24  | 0,22  | 0,09  | 0,82  | -0,27 |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 16 ETo/CS w terminie 1                     | 0,24  | -0,09 | -0,14 | -0,20 | -0,19 | -0,10 | -0,16 | 0,09  | -0,26 | -0,28 | -0,28 | -0,12 | -0,39 | 0,52  | -0,43 |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 17 RC/CSO w terminie 1                     | 0,26  | -0,05 | -0,16 | -0,21 | -0,20 | -0,18 | -0,09 | 0,04  | -0,21 | -0,25 | -0,24 | -0,06 | -0,48 | 0,63  | -0,42 | 0,84  |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 18 Fv/Fm w terminie 2                      | -0,03 | -0,06 | 0,05  | -0,08 | -0,01 | 0,25  | -0,09 | -0,13 | 0,12  | 0,12  | 0,13  | 0,02  | 0,70  | -0,45 | 0,48  | -0,10 | -0,22 |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 19 Area w terminie 2                       | -0,10 | 0,18  | 0,29  | 0,30  | 0,32  | 0,02  | 0,35  | -0,24 | 0,31  | 0,09  | 0,27  | 0,26  | -0,38 | 0,44  | -0,20 | -0,07 | 0,10  | -0,39 |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 20 PI w terminie 2                         | -0,25 | 0,02  | 0,17  | 0,12  | 0,16  | 0,19  | 0,08  | -0,19 | 0,34  | 0,21  | 0,33  | 0,23  | 0,44  | -0,19 | 0,44  | -0,20 | -0,27 | 0,72  | 0,08  |       |       |       |      |      |    |  |
| 21 ETo/CS w terminie 2                     | 0,11  | 0,08  | 0,12  | 0,17  | 0,16  | -0,21 | 0,26  | -0,22 | 0,18  | 0,02  | 0,14  | 0,30  | -0,33 | 0,31  | -0,22 | 0,20  | 0,30  | -0,35 | 0,53  | -0,08 |       |       |      |      |    |  |
| 22 RC/CSO w terminie 2                     | 0,06  | 0,05  | -0,03 | 0,09  | 0,03  | -0,28 | 0,27  | -0,24 | 0,12  | -0,08 | 0,07  | 0,31  | -0,20 | 0,15  | -0,15 | 0,16  | 0,26  | -0,25 | 0,42  | -0,01 | 0,87  |       |      |      |    |  |
| 23 łączna masa pędów                       | 0,27  | 0,05  | 0,05  | -0,09 | -0,01 | 0,12  | -0,05 | 0,18  | -0,03 | 0,04  | -0,02 | -0,27 | 0,13  | -0,01 | 0,15  | -0,13 | -0,07 | -0,05 | 0,05  | -0,17 | -0,02 | -0,13 |      |      |    |  |
| 24 łączna liczba ziarniaków                | 0,30  | -0,08 | -0,31 | -0,29 | -0,34 | -0,23 | -0,25 | 0,54  | -0,28 | -0,09 | -0,25 | -0,17 | 0,01  | -0,07 | -0,05 | 0,09  | 0,10  | -0,02 | -0,31 | -0,17 | 0,09  | 0,08  | 0,34 |      |    |  |
| 25 łączna masa ziarniaków                  | 0,29  | -0,09 | -0,32 | -0,33 | -0,36 | -0,20 | -0,29 | 0,52  | -0,30 | -0,09 | -0,26 | -0,21 | 0,03  | -0,09 | -0,04 | 0,07  | 0,10  | -0,01 | -0,33 | -0,17 | 0,05  | 0,05  | 0,38 | 0,99 |    |  |

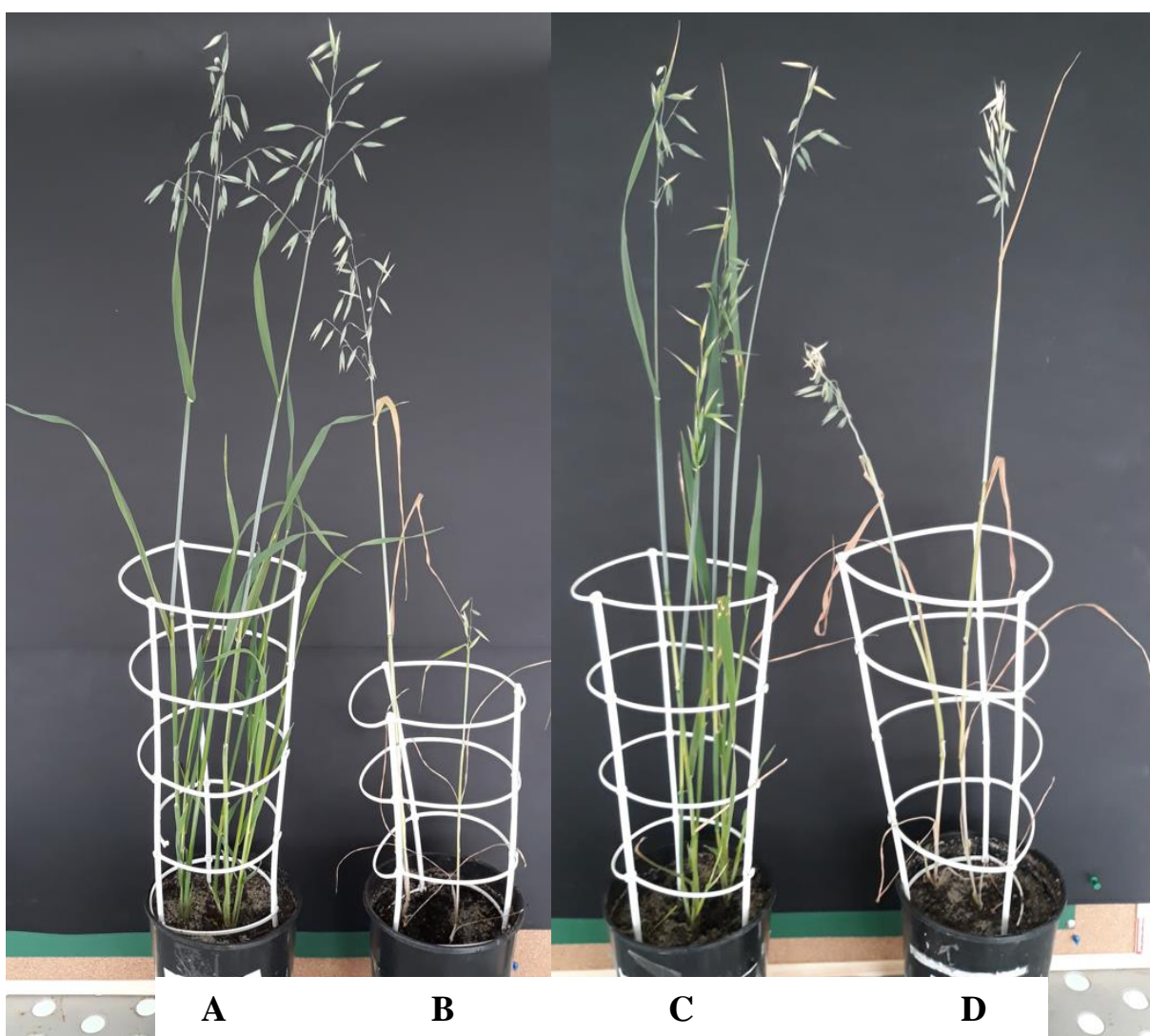
Korelacja: ujemna dodatnia  
 p<sub>value</sub> = 0,01 0,05 0,05 0,01



Rycina 22. Heatmapa przedstawiająca graficznie tabelę korelacji doświadczenia szklarniowego (1 – zawartość cukrów w terminie 1, 2 – zawartość fenoli w terminie 1, 3 – zawartość chlorofilu *a* w terminie 1, 4 – zawartość chlorofilu *b* w terminie 1, 5 – zawartość chlorofilu *a* i *b* w terminie 1, 6 – zawartość karotenoidów w terminie 1, 7 – zawartość cukrów w terminie 2, 8 – zawartość fenoli w terminie 2, 9 – zawartość chlorofilu *a* w terminie 2, 10 – zawartość chlorofilu *b* w terminie 2, 11 – zawartość chlorofilu *a* i *b* w terminie 2, 12 – zawartość karotenoidów w terminie 2, 13 – Fv/Fm w terminie 1, 14 – Area w terminie 1, 15 – PI w terminie 1, 16 – ETo/CS w terminie 1, 17 – RC/CS<sub>o</sub> w terminie 1, 18 – Fv/Fm w terminie 2, 19 – Area w terminie 2, 20 – PI w terminie 2, 21 – ETo/CS w terminie 2, 22 – RC/CS<sub>o</sub> w terminie 2, 23 – łączna masa pędów, 24 – łączna liczba ziarniaków, 25 – łączna masa ziarniaków)

### 6.2.6. Różnice fenotypowe w reakcji na stres

Większość mieszańców owsa z kukurydzą ma pokrój roślin owsa. Natomiast liczba pędów, a także liczba wykształconych wiech jest w dużym stopniu zależna od genotypu badanych linii OMA. W reakcji na stres suszy glebowej niektóre genotypy ograniczały liczbę rozkrzewień w większym stopniu niż inne. Duża liczba wiech w warunkach niedoboru wody prowadziła do wytworzenia w większości słabo wypełnionych ziarniaków lub jedynie plewek bez ziarniaków. Mniejsza liczba wiech lub wykształcenie jedynie pędu głównego zapewniała możliwość prawidłowego wypełnienia ziarniaków pomimo ich mniejszej liczby. Różnice fenotypowe dwóch wybranych linii OMA prezentuje Rycina 23.



Rycina 23. Mieszańce owsa z kukurydzą po zakończeniu okresu suszy – linie nr 78b (A – kontrola, B – susza) i 35 (C – kontrola, D – susza)

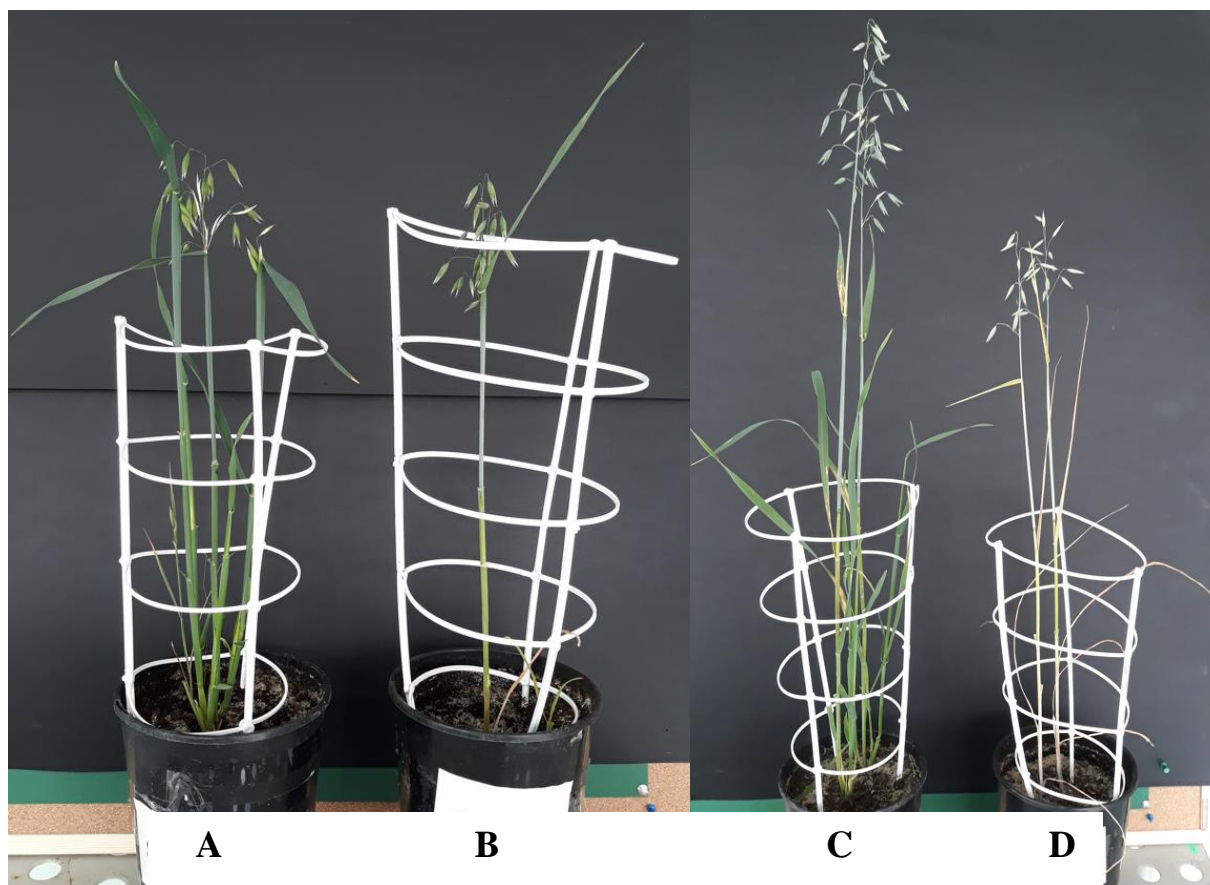
Obiekty w suszy zdecydowanie szybciej dojrzewały i kończyły wegetację niż obiekty kontrolne. Występowały jednak znaczne różnice fenotypowe pomiędzy poszczególnymi liniami dotyczące liczby rozkrzewień i wykształconych wiech, ulistnienia i wysokości roślin czy szybkości dojrzewania. Zredukowane ilości rozkrzewień na skutek suszy u dwóch wybranych linii OMA prezentuje Rycina 24.



Rycina 24. Mieszańce owsa z kukurydzą po zakończeniu okresu suszy – linie nr 23 (A – kontrola, B – susza) i 55 (C – kontrola, D – susza)

Linia nr 83 osiągała zdecydowanie niższą wysokość od pozostałych linii OMA (wykryto u niej obecność chromosomu nr 8 kukurydzy), co widoczne jest w porównaniu do linii o przeciętnej wysokości na Rycinie 25.





Rycina 25. Mieszaniec owsa z kukurydzą po zakończeniu okresu suszy – linie nr 83 (A – kontrola, B – susza) i 9 (C – kontrola, D – susza)

### 6.3. Doświadczenie tunelowe

#### 6.3.1. Analiza parametrów biochemicznych

W doświadczeniu tunelowym w pierwszym dniu suszy wykazano istotny wpływ obu pojedynczych czynników (traktowanie (T) i genotyp (G)) na zmienność cech z wyjątkiem wpływu traktowania (T) na zawartość cukrów rozpuszczalnych. Zaobserwowano z kolei wpływ interakcji traktowania i genotypu ( $T \times G$ ) na wartości tej cechy, czego nie zaobserwowano analizując pozostałe parametry biochemiczne. Wartości testu F analizy wariancji zawartości związków biochemicznych w pierwszym dniu suszy prezentuje Tabela 30.

Tabela 30. Analiza wariancji zawartości związków biochemicznych w liściach linii OMA rosnących w warunkach tunelowych – Termin 1

| pierwszy dzień suszy   | T<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | $T \times G$<br>(df = 14) |
|------------------------|---------------|----------------|---------------------------|
| cukry rozpuszczalne    | 2,79          | 7,22**         | 1,94*                     |
| związki fenolowe       | 24,41**       | 11,26**        | 1,73                      |
| chlorofil <i>a</i>     | 14,22**       | 9,35**         | 1,66                      |
| chlorofil <i>b</i>     | 8,68**        | 13,25**        | 1,54                      |
| chlorofil <i>a i b</i> | 13,40**       | 10,89**        | 1,46                      |
| karotenoidy            | 7,75**        | 8,35**         | 1,67                      |
| $F_{0,05}$             | 3,947         | 1,803          | 1,803                     |
| $F_{0,01}$             | 6,925         | 2,286          | 2,286                     |

T – traktowanie, G – genotyp,  $T \times G$  – interakcja traktowania i genotypu, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

W czternastym dniu suszy obserwowano istotny wpływ czynników traktowania i genotypu (T i G) na większość analizowanych cech. Nie stwierdzono jedynie wpływu traktowania (T) na zawartość chlorofilu *b* oraz karotenoidów. Wpływ interakcji ( $T \times G$ ) okazał się istotny dla 3 z 6 analizowanych cech: zawartości związków fenolowych, chlorofilu *a* oraz *a i b*. Wartości testu F analizy wariancji zawartości związków biochemicznych w czternastym dniu suszy prezentuje Tabela 31.

Tabela 31. Analiza wariancji zawartości związków biochemicznych w liściach linii OMA rosnących w warunkach tunelowych – Termin 2

| czternasty dzień suszy | T<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | T × G<br>(df = 14) |
|------------------------|---------------|----------------|--------------------|
| cukry rozpuszczalne    | 22,58**       | 14,98**        | 1,53               |
| związki fenolowe       | 20,78**       | 3,04**         | 2,11*              |
| chlorofil <i>a</i>     | 10,44**       | 2,78**         | 1,89*              |
| chlorofil <i>b</i>     | 3,09          | 2,92**         | 1,63               |
| chlorofil <i>a i b</i> | 8,66**        | 2,99**         | 1,81*              |
| karotenoidy            | 0,44          | 1,81*          | 1,47               |
| F <sub>0,05</sub>      | 3,947         | 1,803          | 1,803              |
| F <sub>0,01</sub>      | 6,925         | 2,286          | 2,286              |

T – traktowanie, G – genotyp, T × G – interakcja traktowania i genotypu, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$ )

#### Zawartość cukrów rozpuszczalnych

W pierwszym dniu suszy nie zaobserwowano istotnych różnic w zawartościach cukrów rozpuszczalnych pomiędzy obiektami kontrolnymi (K1) a obiektami poddanymi suszy (S1). Średni spadek na skutek suszy wyniósł 5%. U 5 linii OMA oraz u odmiany Bingo nastąpił wzrost zawartości, a najwyższy, wynoszący 24%, odnotowano u linii nr 42. U 9 genotypów odnotowano spadek zawartości cukrów rozpuszczalnych pod wpływem suszy, a najwyższy stwierdzono u linii nr 114, gdzie wyniósł 23%. Wśród obiektów kontrolnych (K1) najniższe zawartości zaobserwowano u linii nr 18 i 1b, a najwyższe u linii nr 83 i 23. U obiektów w suszy (S1) najniższe zawartości stwierdzono u linii nr 18 i 119, a najwyższe u linii nr 83 i 12 oraz u odmiany Bingo (Tabela 32).

W czternastym dniu suszy zawartości cukrów rozpuszczalnych wzrosły w porównaniu do pierwszego dnia suszy. U obiektów kontrolnych (K2) wzrost ten wyniósł 6%, a u obiektów w suszy (S2) 28%. Średnio o 15% więcej cukrów rozpuszczalnych zaobserwowano u obiektów w suszy w porównaniu do obiektów kontrolnych (w czternastym dniu suszy). Nieistotne spadki w porównaniu do kontroli wystąpiły jedynie u 3 genotypów, a u pozostałych linii nastąpił wzrost. U 2 genotypów różnice były istotne, a najwyższy wzrost, wynoszący 43%, odnotowano u linii nr 119. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najniższe zawartości cukrów rozpuszczalnych zaobserwowano u linii nr 1b i 43, a najwyższe u linii nr 23 i 12 oraz u odmiany Bingo. U obiektów w suszy (S2) najniższe zawartości stwierdzono u linii nr 18 i 114, a najwyższe u linii nr 23 i 12 oraz u odmiany Bingo (Tabela 32).

Tabela 32. Zawartość cukrów rozpuszczalnych [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |          |              | S1            |          |              | K2            |          |              | S2            |          |              |
|----------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|
|                | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            |
| 9              | 191,65        | c-i      | 49,32        | 173,21        | b-f      | 21,49        | 216,34        | b-g      | 32,56        | 225,52        | c-h      | 13,73        |
| 12             | 205,53        | c-i      | 25,45        | 227,04        | g-j      | 30,77        | 267,92        | g-j      | 73,84        | 296,72        | jk       | 24,51        |
| 18             | 122,20        | a        | 17,64        | 137,58        | ab       | 21,17        | 177,20        | a-d      | 15,96        | 170,08        | abc      | 12,24        |
| 23             | 242,31        | ij       | 41,40        | 192,86        | c-i      | 30,82        | 285,05        | h-k      | 26,89        | 329,82        | kl       | 31,13        |
| 26             | 201,96        | c-i      | 23,20        | 183,22        | b-h      | 43,67        | 256,07        | f-j      | 51,39        | 246,91        | e-j      | 28,43        |
| 35             | 204,91        | c-i      | 44,94        | 192,67        | c-i      | 21,08        | 266,05        | g-j      | 56,47        | 263,63        | g-j      | 9,35         |
| 42             | 178,03        | b-g      | 35,35        | 220,58        | e-i      | 46,64        | 214,91        | b-g      | 26,78        | 238,49        | e-j      | 39,31        |
| 43             | 165,43        | a-d      | 15,03        | 161,41        | abc      | 23,38        | 160,41        | ab       | 21,41        | 194,53        | a-e      | 10,89        |
| 55             | 235,87        | hij      | 14,43        | 198,45        | c-i      | 19,37        | 177,79        | a-d      | 39,10        | 236,62        | d-i      | 14,46        |
| 83             | 274,03        | j        | 27,52        | 240,49        | ij       | 36,25        | 220,60        | b-g      | 30,43        | 289,10        | ijk      | 40,08        |
| 114            | 218,67        | d-i      | 41,54        | 167,48        | a-e      | 25,82        | 161,30        | ab       | 16,10        | 172,80        | abc      | 29,54        |
| 119            | 205,28        | c-i      | 31,33        | 159,51        | abc      | 50,21        | 163,83        | ab       | 25,28        | 234,83        | d-i      | 39,50        |
| 1b             | 162,17        | abc      | 26,51        | 197,63        | c-i      | 25,94        | 148,87        | a        | 22,26        | 198,88        | a-f      | 11,32        |
| 78b            | 191,81        | c-i      | 13,90        | 195,35        | c-i      | 14,90        | 220,47        | b-g      | 48,20        | 217,90        | b-g      | 22,10        |
| Bingo          | 222,73        | f-i      | 25,15        | 233,01        | hij      | 31,03        | 275,17        | g-k      | 47,42        | 361,93        | l        | 78,58        |
| <b>Średnia</b> | <b>201,50</b> | <b>a</b> | <b>44,74</b> | <b>192,03</b> | <b>a</b> | <b>39,58</b> | <b>214,13</b> | <b>b</b> | <b>57,36</b> | <b>245,18</b> | <b>c</b> | <b>60,67</b> |

<sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-l</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Zawartość związków fenolowych

Istotne różnice w średniej zawartości związków fenolowych pomiędzy kombinacją kontrolną (K1) i poddaną stresowi suszy (S1) wystąpiły już w pierwszym dniu suszy, gdzie średni wzrost tych związków wyniósł 9%. Nieistotne spadki zawartości związków fenolowych u genotypów w kombinacji z suszą w stosunku do kontroli wystąpiły u linii nr 42 i 43 oraz u odmiany Bingo. Najwyższe wzrosty, wynoszące odpowiednio 23% i 20%, zaobserwowano u linii nr 1b i 78b. Istotny był także wzrost zawartości związków fenolowych na skutek suszy u linii nr 9. Najwyższe zawartości badanych związków u obiektów kontrolnych (K1) odnotowano u linii nr 42 i 43, a najniższe u linii nr 12 i 18. Z kolei u obiektów poddawanych stresowi suszy (S1) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 42 i 9, a najniższe u linii nr 12 i 18 oraz u odmiany Bingo (Tabela 33).

W czternastym dniu trwania suszy glebowej zawartość związków fenolowych zarówno u obiektów kontrolnych (K2), jak i poddanych stresowi suszy (S2) wzrosła średnio o 6% w porównaniu do pierwszego terminu (K1 i S1). Porównując średnią zawartość związków fenolowych w obiektach poddawanych stresowi suszy zaobserwowano, iż była ona wyższa o 9% w porównaniu do średniej dla kombinacji kontrolnej. U większości linii w czternastym dniu suszy nastąpił wzrost zawartości związków fenolowych w porównaniu do obiektów kontrolnych. Najwyższe wzrosty odnotowano u linii nr 119 i 114, gdzie wyniosły odpowiednio 39% i 36%. Istotny był także wzrost u linii nr 78b. U obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości związków fenolowych odnotowano u linii nr 42 i 9, a najniższe u linii nr 119 i 114. Z kolei spośród obiektów poddawanych stresowi suszy (S2) najwyższe wartości zaobserwowano u linii nr 78b i 114, a najniższe u linii nr 12 i 55 (Tabela 33).

Tabela 33. Zawartość związków fenolowych [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |             | S1           |          |             | K2           |          |             | S2           |          |             |
|----------------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
|                | 1            | 2        | 3           | 1            | 2        | 3           | 1            | 2        | 3           | 1            | 2        | 3           |
| 9              | 64,02        | d-h      | 5,79        | 75,45        | ijk      | 6,74        | 67,09        | b-f      | 5,84        | 71,84        | c-f      | 4,46        |
| 12             | 50,05        | a        | 4,62        | 55,08        | a-e      | 0,91        | 62,41        | bc       | 3,30        | 60,79        | bc       | 7,38        |
| 18             | 50,85        | ab       | 1,35        | 58,19        | a-f      | 3,79        | 61,29        | bc       | 1,56        | 71,78        | c-f      | 8,14        |
| 23             | 55,05        | a-e      | 1,76        | 59,65        | a-g      | 16,06       | 62,53        | bc       | 3,02        | 66,94        | b-f      | 20,32       |
| 26             | 56,08        | a-f      | 6,69        | 64,16        | d-h      | 12,58       | 60,08        | bc       | 4,82        | 65,01        | b-e      | 6,35        |
| 35             | 59,29        | a-g      | 5,60        | 64,40        | d-h      | 2,01        | 62,99        | bcd      | 5,38        | 66,88        | b-f      | 0,64        |
| 42             | 83,50        | k        | 3,91        | 78,93        | jk       | 3,06        | 75,78        | ef       | 6,04        | 74,70        | def      | 3,66        |
| 43             | 65,42        | fgh      | 8,16        | 60,77        | b-h      | 4,31        | 66,85        | b-f      | 3,11        | 63,51        | bcd      | 3,79        |
| 55             | 57,12        | a-f      | 1,22        | 62,04        | c-h      | 5,02        | 58,69        | b        | 8,41        | 62,64        | bc       | 5,23        |
| 83             | 52,23        | abc      | 2,93        | 60,11        | a-g      | 2,30        | 63,34        | bcd      | 9,25        | 65,66        | b-e      | 5,07        |
| 114            | 61,22        | c-h      | 4,41        | 70,33        | hij      | 2,41        | 55,89        | ab       | 10,20       | 76,01        | ef       | 0,59        |
| 119            | 52,92        | abc      | 6,80        | 59,91        | a-g      | 5,52        | 48,34        | a        | 7,44        | 66,98        | b-f      | 3,69        |
| 1b             | 52,80        | abc      | 4,92        | 65,08        | e-h      | 2,87        | 59,23        | b        | 1,68        | 65,56        | b-e      | 0,58        |
| 78b            | 57,42        | a-f      | 1,50        | 69,17        | ghi      | 7,04        | 63,37        | bcd      | 5,84        | 78,01        | f        | 6,21        |
| Bingo          | 58,10        | a-f      | 7,38        | 54,46        | a-d      | 7,42        | 63,74        | bcd      | 8,72        | 62,78        | bc       | 11,10       |
| <b>Średnia</b> | <b>58,40</b> | <b>a</b> | <b>9,19</b> | <b>63,85</b> | <b>b</b> | <b>9,05</b> | <b>62,11</b> | <b>b</b> | <b>7,95</b> | <b>67,94</b> | <b>c</b> | <b>8,35</b> |

a-k – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, a-f – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, abc – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

Zawartość barwników fotosyntetycznych – chlorofil *a*

Już w pierwszym dniu suszy zaobserwowano istotne statystycznie różnice w zawartości chlorofilu *a* pomiędzy obiektami kontrolnymi (K1) a obiektami w suszy (S1). Średnio w suszy stwierdzono o 10% niższą zawartość chlorofilu *a*. U żadnej linii OMA nie odnotowano istotnych wzrostów zawartości chlorofilu *a* na skutek suszy. U 10 genotypów zaobserwowano spadek zawartości chlorofilu *a* w suszy, z czego najwyższy, istotny statystycznie, stwierdzono u linii nr 12, u której wyniósł 31%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości chlorofilu *a* zaobserwowano u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 78b i 43. U obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 55 i 35, a najniższe u linii nr 23 i 12 (Tabela 34).

Tabela 34. Zawartość chlorofilu *a* [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,682        | c-g      | 0,046        | 0,594        | a-d      | 0,154        | 0,621        | b-e      | 0,062        | 0,564        | b-e      | 0,137        |
| 12             | 0,716        | d-g      | 0,120        | 0,498        | ab       | 0,151        | 0,631        | b-f      | 0,224        | 0,523        | bcd      | 0,080        |
| 18             | 0,825        | ghi      | 0,078        | 0,682        | c-g      | 0,114        | 0,711        | def      | 0,070        | 0,737        | ef       | 0,060        |
| 23             | 0,652        | a-g      | 0,056        | 0,474        | a        | 0,088        | 0,605        | b-e      | 0,064        | 0,653        | b-f      | 0,094        |
| 26             | 0,626        | a-e      | 0,020        | 0,640        | a-f      | 0,070        | 0,574        | b-e      | 0,055        | 0,566        | b-e      | 0,059        |
| 35             | 0,971        | i        | 0,071        | 0,788        | e-h      | 0,064        | 0,547        | bcd      | 0,154        | 0,580        | b-e      | 0,102        |
| 42             | 0,644        | a-f      | 0,152        | 0,669        | b-g      | 0,139        | 0,621        | b-e      | 0,075        | 0,523        | bc       | 0,088        |
| 43             | 0,618        | a-e      | 0,137        | 0,662        | b-g      | 0,025        | 0,544        | bcd      | 0,070        | 0,578        | b-e      | 0,031        |
| 55             | 0,953        | hi       | 0,080        | 0,891        | hi       | 0,095        | 0,805        | f        | 0,175        | 0,584        | b-e      | 0,088        |
| 83             | 0,713        | d-g      | 0,054        | 0,719        | d-g      | 0,085        | 0,651        | b-f      | 0,113        | 0,526        | bcd      | 0,141        |
| 114            | 0,713        | d-g      | 0,063        | 0,601        | a-d      | 0,059        | 0,591        | b-e      | 0,051        | 0,330        | a        | 0,040        |
| 119            | 0,652        | a-g      | 0,173        | 0,509        | abc      | 0,072        | 0,701        | c-f      | 0,194        | 0,475        | ab       | 0,090        |
| 1b             | 0,811        | f-i      | 0,142        | 0,725        | d-g      | 0,052        | 0,657        | b-f      | 0,109        | 0,673        | c-f      | 0,015        |
| 78b            | 0,611        | a-e      | 0,115        | 0,528        | abc      | 0,117        | 0,569        | b-e      | 0,123        | 0,555        | b-e      | 0,121        |
| Bingo          | 0,473        | a        | 0,136        | 0,590        | a-d      | 0,168        | 0,564        | b-e      | 0,125        | 0,574        | b-e      | 0,090        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,711</b> | <b>c</b> | <b>0,158</b> | <b>0,638</b> | <b>b</b> | <b>0,145</b> | <b>0,626</b> | <b>b</b> | <b>0,128</b> | <b>0,563</b> | <b>a</b> | <b>0,119</b> |

<sup>a-i</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-f</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu suszy zaobserwowano spadek zawartości chlorofilu *a* w liściach obiektów poddanych temu stresowi (S2) w konfrontacji z zawartością w pierwszym dniu suszy, podobne tendencje wystąpiły w kombinacji kontrolnej (K2). Spadki w obu kombinacjach wyniosły 12%. Zawartość chlorofilu *a* nadal była istotnie niższa u obiektów w suszy, średnio o 10%. Nieistotne statystycznie wzrosty zawartości chlorofilu *a* na skutek suszy zaobserwowano u 6 genotypów. U pozostałych 9 genotypów odnotowano spadek zawartości chlorofilu *a* w liściach. Najwyższe, istotne statystycznie spadki, stwierdzono u linii nr 114, 119 i 55, gdzie wyniosły odpowiednio 44%, 32% i 27%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższy poziom zaobserwowano u linii nr 55 i 18, a najniższy u linii nr 43 i 35. Z kolei spośród obiektów w suszy (S2) najwyższy poziom chlorofilu *a* stwierdzono u linii nr 18 i 1b, a najniższy u linii nr 114 i 119 (Tabela 34).

#### Zawartość barwników fotosyntetycznych – chlorofil *b*

W pierwszym dniu suszy zawartość chlorofilu *b* u obiektów w suszy (S1) była istotnie niższa niż u obiektów kontrolnych (K1) o 6%. Najwyższe spadki zaobserwowano u linii nr 12, 83 i 1b, odpowiednio 23%, 15% i 15%. Nieistotne statystycznie wzrosty zawartości tego barwnika fotosyntetycznego wystąpiły u linii nr 42 i 55 oraz u odmiany Bingo. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości chlorofilu *b* w liściach odnotowano u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 78b i 43 oraz u odmiany Bingo. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 55 i 35, a najniższe u linii 12 i 23 (Tabela 35).

W czternastym dniu eksperymentu zawartość chlorofilu *b* w liściach spadła, odpowiednio o 12% u obiektów kontrolnych (K2) oraz o 11% u obiektów w suszy (S2) w porównaniu do pierwszego dnia suszy. Poziom chlorofilu *b* nadal był niższy u obiektów w suszy. Analizując średnią zawartość chlorofilu *b* kombinacji kontrolnej i suszy można zauważyć, iż różnica wynosi tylko 5% i nie jest istotna statystycznie. U 8 genotypów stwierdzono spadki zawartości chlorofilu *b* w suszy. Najwyższy wyniósł 29% u linii nr 114 i był on istotny statystycznie. U 7 genotypów wystąpił wzrost zawartości chlorofilu *b*, a najwyższy, wynoszący 25% wystąpił u linii nr 35. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości chlorofilu *b* w liściach stwierdzono u linii nr 18 i 55, a najniższe u linii nr 35 i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości zaobserwowano u linii nr 18 i 35, a najniższe u linii 114 i 119 (Tabela 35).

Tabela 35. Zawartość chlorofilu *b* [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,344        | b-f      | 0,019        | 0,310        | a-d      | 0,048        | 0,309        | bcd      | 0,025        | 0,314        | bcd      | 0,054        |
| 12             | 0,351        | c-f      | 0,025        | 0,269        | a        | 0,048        | 0,325        | b-e      | 0,077        | 0,284        | a-d      | 0,024        |
| 18             | 0,370        | def      | 0,030        | 0,348        | c-f      | 0,029        | 0,388        | e        | 0,031        | 0,354        | de       | 0,036        |
| 23             | 0,321        | a-e      | 0,020        | 0,280        | ab       | 0,028        | 0,295        | bcd      | 0,051        | 0,322        | b-e      | 0,056        |
| 26             | 0,317        | a-e      | 0,028        | 0,305        | a-d      | 0,036        | 0,285        | a-d      | 0,024        | 0,264        | abc      | 0,068        |
| 35             | 0,451        | hi       | 0,021        | 0,443        | hi       | 0,041        | 0,265        | abc      | 0,038        | 0,332        | cde      | 0,044        |
| 42             | 0,340        | b-f      | 0,041        | 0,356        | c-f      | 0,041        | 0,292        | bcd      | 0,038        | 0,282        | a-d      | 0,034        |
| 43             | 0,312        | a-d      | 0,029        | 0,310        | a-d      | 0,046        | 0,293        | bcd      | 0,013        | 0,284        | a-d      | 0,011        |
| 55             | 0,431        | ghi      | 0,033        | 0,464        | i        | 0,028        | 0,355        | de       | 0,090        | 0,293        | bcd      | 0,026        |
| 83             | 0,379        | efg      | 0,031        | 0,322        | a-e      | 0,087        | 0,302        | bcd      | 0,061        | 0,309        | bcd      | 0,057        |
| 114            | 0,355        | c-f      | 0,028        | 0,314        | a-e      | 0,042        | 0,304        | bcd      | 0,011        | 0,216        | a        | 0,019        |
| 119            | 0,323        | a-e      | 0,037        | 0,289        | abc      | 0,021        | 0,318        | b-e      | 0,063        | 0,256        | ab       | 0,032        |
| 1b             | 0,402        | fgh      | 0,053        | 0,342        | b-f      | 0,019        | 0,326        | b-e      | 0,036        | 0,329        | b-e      | 0,021        |
| 78b            | 0,303        | abc      | 0,036        | 0,298        | abc      | 0,060        | 0,283        | a-d      | 0,019        | 0,284        | a-d      | 0,034        |
| Bingo          | 0,265        | a        | 0,047        | 0,302        | abc      | 0,031        | 0,289        | bcd      | 0,027        | 0,296        | bcd      | 0,039        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,351</b> | <b>c</b> | <b>0,056</b> | <b>0,330</b> | <b>b</b> | <b>0,066</b> | <b>0,309</b> | <b>a</b> | <b>0,050</b> | <b>0,295</b> | <b>a</b> | <b>0,049</b> |

<sup>a-i</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-e</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Zawartość barwników fotosyntetycznych – chlorofil *a* i *b*

W pierwszym dniu suszy zawartość chlorofilu *a* i *b* u obiektów w suszy (S1) była istotnie niższa niż u obiektów kontrolnych (K1) o 9%. Jedynie u linii nr 26, 42 i 43 oraz u odmiany Bingo stwierdzono wzrosty zawartości chlorofilu *a* i *b*, ale nie były one istotne statystycznie. U pozostałych 11 genotypów stwierdzono spadek zawartości tych barwników. Najwyższy zaobserwowano u linii nr 12, gdzie istotna statystycznie różnica wyniosła 28%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości chlorofilu *a* i *b* w liściach odnotowano u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 78b i 43 oraz u odmiany Bingo. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii 23 i 12 (Tabela 36).



Po 14 dniach zawartość chlorofilu *a* i *b* w liściach spadła, odpowiednio o 12% u obiektów kontrolnych (K2) oraz o 11% u obiektów w suszy (S2). Poziom chlorofilu *a* i *b* nadal był niższy u obiektów w suszy, a różnica wyniosła 8% i była istotna statystycznie. U linii nr 23, 35, 43 i 1b oraz u odmiany Bingo stwierdzono wzrost zawartości chlorofilu *a* i *b* na skutek suszy, ale różnice te nie były istotne statystycznie. U pozostałych genotypów stwierdzono spadek zawartości chlorofilu *a* i *b*. Najwyższy spadek, wynoszący 39%, wystąpił u linii nr 114. Statystycznie istotne spadki zawartości wystąpiły także u linii nr 119 i 55, gdzie wyniosły odpowiednio 28% i 24%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości chlorofilu *a* i *b* w liściach stwierdzono u linii nr 55 i 18, a najniższe u linii nr 35 i 43. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości zaobserwowano u linii nr 18 i 1b, a najniższe u linii 114 i 119 (Tabela 36).

Tabela 36. Zawartość chlorofilu *a* i *b* [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 1,026        | c-h      | 0,065        | 0,903        | a-e      | 0,201        | 0,930        | b-d      | 0,085        | 0,879        | bcd      | 0,191        |
| 12             | 1,068        | e-h      | 0,145        | 0,767        | ab       | 0,198        | 0,957        | b-d      | 0,300        | 0,807        | bc       | 0,104        |
| 18             | 1,195        | f-i      | 0,108        | 1,030        | c-h      | 0,144        | 1,099        | de       | 0,100        | 1,091        | de       | 0,088        |
| 23             | 0,972        | a-f      | 0,072        | 0,755        | ab       | 0,115        | 0,900        | bcd      | 0,100        | 0,974        | b-d      | 0,145        |
| 26             | 0,942        | a-e      | 0,048        | 0,945        | a-e      | 0,094        | 0,859        | bcd      | 0,076        | 0,830        | bc       | 0,107        |
| 35             | 1,422        | j        | 0,091        | 1,231        | hij      | 0,105        | 0,813        | bc       | 0,190        | 0,912        | bcd      | 0,145        |
| 42             | 0,984        | b-g      | 0,191        | 1,025        | c-h      | 0,179        | 0,913        | bcd      | 0,096        | 0,805        | bc       | 0,122        |
| 43             | 0,930        | a-e      | 0,165        | 0,973        | a-f      | 0,071        | 0,836        | bc       | 0,082        | 0,862        | bcd      | 0,042        |
| 55             | 1,384        | ij       | 0,111        | 1,355        | ij       | 0,119        | 1,160        | e        | 0,246        | 0,877        | bcd      | 0,094        |
| 83             | 1,092        | e-h      | 0,083        | 1,041        | d-h      | 0,167        | 0,953        | b-d      | 0,145        | 0,835        | bc       | 0,197        |
| 114            | 1,068        | e-h      | 0,091        | 0,915        | a-e      | 0,100        | 0,895        | bcd      | 0,058        | 0,545        | a        | 0,059        |
| 119            | 0,976        | a-f      | 0,208        | 0,799        | abc      | 0,093        | 1,018        | cde      | 0,257        | 0,731        | ab       | 0,120        |
| 1b             | 1,213        | g-j      | 0,194        | 1,067        | e-h      | 0,071        | 0,983        | cde      | 0,144        | 1,001        | cde      | 0,036        |
| 78b            | 0,913        | a-e      | 0,151        | 0,826        | a-d      | 0,175        | 0,852        | bcd      | 0,142        | 0,840        | bc       | 0,154        |
| Bingo          | 0,738        | a        | 0,182        | 0,892        | a-e      | 0,197        | 0,853        | bcd      | 0,149        | 0,871        | bcd      | 0,128        |
| <b>Średnia</b> | <b>1,062</b> | <b>c</b> | <b>0,213</b> | <b>0,968</b> | <b>b</b> | <b>0,205</b> | <b>0,935</b> | <b>b</b> | <b>0,170</b> | <b>0,857</b> | <b>a</b> | <b>0,162</b> |

<sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-e</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

## Zawartość barwników fotosyntetycznych – karotenoidy

W pierwszym dniu suszy zawartość karotenoidów u obiektów w suszy (S1) była istotnie niższa niż u obiektów kontrolnych (K1) średnio o 11%. Jedynie u linii nr 42, 43, 55 i 1b oraz u odmiany Bingo stwierdzono wzrosty zawartości karotenoidów, ale nie były one istotne statystycznie. Spadki zawartości na skutek suszy odnotowano u 10 genotypów. Najwyższy zaobserwowano u linii nr 23, 119 i 35, gdzie wyniosły odpowiednio 42%, 36% i 29%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe zawartości karotenoidów w liściach odnotowano u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 78b i 43 oraz u odmiany Bingo. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe zawartości stwierdzono u linii nr 55 i 42, a najniższe u linii 23 i 119 (Tabela 37).

Tabela 37. Zawartość karotenoidów [mg/g s.m.] w liściach linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,117        | b-g      | 0,010        | 0,102        | a-g      | 0,037        | 0,113        | a-e      | 0,008        | 0,104        | a-e      | 0,025        |
| 12             | 0,126        | d-g      | 0,028        | 0,087        | a-d      | 0,016        | 0,112        | a-e      | 0,051        | 0,104        | a-e      | 0,014        |
| 18             | 0,144        | ghi      | 0,010        | 0,123        | c-g      | 0,025        | 0,115        | b-e      | 0,028        | 0,145        | e        | 0,031        |
| 23             | 0,116        | b-g      | 0,009        | 0,067        | a        | 0,016        | 0,111        | a-e      | 0,023        | 0,127        | cde      | 0,025        |
| 26             | 0,100        | a-g      | 0,011        | 0,098        | a-f      | 0,025        | 0,084        | a-d      | 0,011        | 0,097        | a-e      | 0,029        |
| 35             | 0,187        | j        | 0,012        | 0,132        | e-h      | 0,007        | 0,104        | a-e      | 0,041        | 0,112        | a-e      | 0,023        |
| 42             | 0,127        | d-g      | 0,029        | 0,136        | fgh      | 0,030        | 0,082        | a-d      | 0,041        | 0,089        | a-d      | 0,017        |
| 43             | 0,099        | a-f      | 0,016        | 0,102        | a-g      | 0,039        | 0,092        | a-d      | 0,020        | 0,098        | a-e      | 0,018        |
| 55             | 0,170        | hij      | 0,036        | 0,179        | ij       | 0,051        | 0,131        | de       | 0,067        | 0,066        | ab       | 0,019        |
| 83             | 0,127        | d-g      | 0,019        | 0,118        | b-g      | 0,054        | 0,093        | a-d      | 0,038        | 0,087        | a-d      | 0,026        |
| 114            | 0,123        | c-g      | 0,006        | 0,115        | b-g      | 0,029        | 0,065        | a        | 0,017        | 0,102        | a-e      | 0,012        |
| 119            | 0,109        | a-g      | 0,022        | 0,070        | a        | 0,020        | 0,116        | cde      | 0,036        | 0,094        | a-d      | 0,023        |
| 1b             | 0,119        | c-g      | 0,033        | 0,133        | e-h      | 0,013        | 0,107        | a-e      | 0,032        | 0,123        | cde      | 0,002        |
| 78b            | 0,091        | a-e      | 0,016        | 0,074        | ab       | 0,035        | 0,080        | abc      | 0,009        | 0,097        | a-e      | 0,022        |
| Bingo          | 0,080        | abc      | 0,019        | 0,102        | a-g      | 0,008        | 0,103        | a-e      | 0,030        | 0,118        | cde      | 0,019        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,122</b> | <b>b</b> | <b>0,033</b> | <b>0,109</b> | <b>a</b> | <b>0,039</b> | <b>0,101</b> | <b>a</b> | <b>0,034</b> | <b>0,104</b> | <b>a</b> | <b>0,026</b> |

<sup>a-j</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-e</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu zawartość karotenoidów w liściach spadła w porównaniu do pierwszego dnia suszy, o odpowiednio 18% u obiektów kontrolnych (K2) oraz o 5% u obiektów w suszy (S2). Średni poziom karotenoidów u obiektów w suszy nie różnił się istotnie od obiektów kontrolnych. Nieistotne statystycznie wzrosty zawartości karotenoidów wystąpiły u 9 genotypów oraz u odmiany Bingo. Tylko u jednej linii – nr 114, zaobserwowano statystycznie istotny wzrost zawartości karotenoidów wynoszący 56%. U 5 genotypów stwierdzono spadki zawartości karotenoidów na skutek suszy, a najwyższy, istotny statystycznie, wynoszący 50%, wystąpił u linii nr 55. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe zawartości karotenoidów w liściach stwierdzono u linii nr 55 i 119, a najniższe u linii nr 114 i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe zawartości zaobserwowano u linii nr 18 i 23, a najniższe u linii 55 i 83 (Tabela 37).

### 6.3.2. Analiza fluorescencji chlorofilu *a*

W pierwszym dniu suszy analiza wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* wykazała istotny wpływ genotypu (G), a także, w większości parametrów, traktowania (T) i interakcji tych dwóch czynników ( $T \times G$ ). Wpływ traktowania (T) nie był istotny w przypadku parametru Area oraz ETo/CS, a interakcja ( $T \times G$ ) nie była istotna dla zmienności parametru PI. Wartości testu F analizy wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu w pierwszym dniu suszy prezentuje Tabela 38.

Tabela 38. Analiza wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* linii OMA rosnących w warunkach tunelowych – Termin 1

| pierwszy dzień suszy | T<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | $T \times G$<br>(df = 14) |
|----------------------|---------------|----------------|---------------------------|
| Fv/Fm                | 55,70**       | 9,00**         | 4,90**                    |
| Area                 | 0,12          | 3,09**         | 3,78**                    |
| PI                   | 59,69**       | 9,68**         | 1,37                      |
| ETo/CS               | 0,24          | 5,54**         | 1,95*                     |
| RC/CS <sub>o</sub>   | 49,52**       | 10,70**        | 2,81**                    |
| F <sub>0,05</sub>    | 3,886         | 1,739          | 1,739                     |
| F <sub>0,01</sub>    | 6,757         | 2,168          | 2,168                     |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

W czternastym dniu suszy glebowej istotny wpływ na kształtowanie się wartości parametrów fluorescencji chlorofilu *a* miała interakcja traktowania i genotypu ( $T \times G$ ). Ponadto pojedyncze czynniki doświadczalne tj. traktowanie (T) i genotyp (G) okazały się istotne w przypadku większości badanych parametrów. Wpływ traktowania (T) nie był istotny jedynie w przypadku parametrów Fv/Fm i PI, a wpływ genotypu (G) na parametr Fv/Fm. Wartości testu F analizy wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu w czternastym dniu suszy prezentuje Tabela 39.

Tabela 39. Analiza wariancji parametrów fluorescencji chlorofilu *a* linii OMA rosnących w warunkach tunelowych – Termin 2

| czternasty dzień suszy | T<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | T × G<br>(df = 14) |
|------------------------|---------------|----------------|--------------------|
| Fv/Fm                  | 0,60          | 0,90           | 1,80*              |
| Area                   | 30,18**       | 5,58**         | 2,46**             |
| PI                     | 2,60          | 4,62**         | 1,79*              |
| ETo/CS                 | 4,16*         | 8,26**         | 2,30**             |
| RC/CS <sub>0</sub>     | 9,49**        | 5,22**         | 2,84**             |
| F <sub>0,05</sub>      | 3,886         | 1,739          | 1,739              |
| F <sub>0,01</sub>      | 6,757         | 2,168          | 2,168              |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \* – istotność dla  $\alpha = 0,05$ , \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

#### Maksymalna wydajność kwantowa PSII (Fv/Fm)

W pierwszym dniu suszy wartości współczynnika maksymalnej fotochemicznej wydajności PSII u obiektów w suszy (S1) były istotnie niższe niż u obiektów kontrolnych (K1). Średnio spadek wartości współczynnika na skutek suszy wyniósł 2%. Wzrostów nie odnotowano u żadnej z badanych linii, jedynie u odmiany Bingo stwierdzono wzrost wartości parametru o 1%. Istotnie statystycznie spadki wystąpiły u 5 genotypów. Najwyższy spadek wartości współczynnika odnotowano u linii nr 114, gdzie wyniósł on 9%. U linii nr 9, 12 i 23 nie stwierdzono zmian w wartościach parametru na skutek suszy. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości Fv/Fm stwierdzono u linii nr 43 i 18, a najniższe u linii nr 119 i 78b. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości współczynnika odnotowano u linii nr 9 i 12 oraz u odmiany Bingo, natomiast najniższe u linii nr 114 i 78b (Tabela 40).

W czternastym dniu suszy wartość Fv/Fm u roślin kontrolnych (K2) utrzymywała się na tym samym poziomie, natomiast u roślin poddanych działaniu suszy (S2) wzrosła o 2%. Przełożyło się to na brak istotnych statystycznie różnic pomiędzy obiektami kontrolnymi a obiektami w suszy. W K2 najwyższe wartości Fv/Fm stwierdzono u linii nr 114 i 9, a najniższe u linii nr 35 i 23. Z kolei w S2 najwyższe wartości współczynnika odnotowano u linii nr 43 i 83, a najniższe u linii nr 114 i 12 (Tabela 40).

Tabela 40. Wartości maksymalnej wydajności kwantowej PSII (Fv/Fm) u linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1           |          |              | S1           |          |              | K2           |          |              | S2           |          |              |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|--------------|----------|--------------|
|                | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            | 1            | 2        | 3            |
| 9              | 0,811        | fgh      | 0,014        | 0,814        | gh       | 0,008        | 0,814        | c        | 0,007        | 0,804        | abc      | 0,012        |
| 12             | 0,811        | fgh      | 0,012        | 0,813        | gh       | 0,010        | 0,807        | abc      | 0,021        | 0,786        | ab       | 0,011        |
| 18             | 0,812        | fgh      | 0,014        | 0,807        | e-h      | 0,009        | 0,801        | abc      | 0,011        | 0,800        | abc      | 0,013        |
| 23             | 0,805        | e-h      | 0,014        | 0,806        | e-h      | 0,011        | 0,796        | abc      | 0,021        | 0,798        | abc      | 0,026        |
| 26             | 0,809        | fgh      | 0,009        | 0,800        | d-h      | 0,013        | 0,803        | abc      | 0,017        | 0,800        | abc      | 0,020        |
| 35             | 0,808        | fgh      | 0,025        | 0,792        | c-h      | 0,012        | 0,794        | abc      | 0,021        | 0,808        | abc      | 0,020        |
| 42             | 0,809        | fgh      | 0,013        | 0,770        | bc       | 0,018        | 0,799        | abc      | 0,013        | 0,809        | bc       | 0,020        |
| 43             | 0,817        | h        | 0,007        | 0,782        | cde      | 0,012        | 0,797        | abc      | 0,026        | 0,813        | c        | 0,019        |
| 55             | 0,805        | d-h      | 0,022        | 0,781        | cd       | 0,015        | 0,801        | abc      | 0,021        | 0,811        | bc       | 0,017        |
| 83             | 0,810        | fgh      | 0,014        | 0,790        | c-g      | 0,016        | 0,813        | c        | 0,016        | 0,812        | c        | 0,017        |
| 114            | 0,803        | d-h      | 0,003        | 0,730        | a        | 0,072        | 0,820        | c        | 0,011        | 0,782        | a        | 0,037        |
| 119            | 0,787        | c-f      | 0,022        | 0,750        | ab       | 0,027        | 0,806        | abc      | 0,025        | 0,812        | bc       | 0,009        |
| 1b             | 0,805        | d-h      | 0,025        | 0,799        | d-h      | 0,010        | 0,797        | abc      | 0,015        | 0,795        | abc      | 0,013        |
| 78b            | 0,796        | d-h      | 0,015        | 0,749        | ab       | 0,032        | 0,812        | bc       | 0,025        | 0,801        | abc      | 0,050        |
| Bingo          | 0,803        | d-h      | 0,012        | 0,813        | gh       | 0,009        | 0,806        | abc      | 0,023        | 0,802        | abc      | 0,020        |
| <b>Średnia</b> | <b>0,806</b> | <b>b</b> | <b>0,017</b> | <b>0,786</b> | <b>a</b> | <b>0,034</b> | <b>0,804</b> | <b>b</b> | <b>0,019</b> | <b>0,802</b> | <b>b</b> | <b>0,023</b> |

a-h – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, abc – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, ab – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Wielkość pola akceptorów transportu elektronów z PSII (Area)

W pierwszym dniu suszy średnie wielkości pola akceptorów transportu elektronów z PSII obiektów kontrolnych (K1) i w suszy (S1) nie różniły się istotnie, natomiast wśród poszczególnych genotypów obserwowano istotne statystycznie spadki i wzrosty wartości

parametru na skutek suszy glebowej. Najwyższy wzrost parametru Area odnotowano u linii nr 114 i 35, gdzie wyniósł on odpowiednio 72% i 28%, a najwyższy spadek u linii nr 9 i 18, gdzie wyniósł kolejno 21% i 17%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości parametru stwierdzono u linii nr 119 i 42, a najniższe u linii nr 114 i 43. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 114 i 35, a najniższe u linii nr 18 i 9 oraz u odmiany Bingo (Tabela 41).

Tabela 41. Wielkości pola akceptorów transportu elektronów z PSII (Area) u linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |          |              | S1            |          |              | K2            |          |              | S2            |          |              |
|----------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|
|                | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            |
| 9              | 35 600        | b-e      | 7 129        | 28 200        | a-d      | 3 948        | 41 975        | f-i      | 3 546        | 35 200        | a-f      | 5 369        |
| 12             | 34 000        | a-e      | 7 120        | 30 425        | a-d      | 3 433        | 41 275        | e-i      | 3 722        | 35 292        | a-f      | 7 524        |
| 18             | 30 850        | a-d      | 6 901        | 25 675        | a        | 5 608        | 36 850        | a-h      | 3 513        | 36 371        | a-g      | 7 760        |
| 23             | 31 925        | a-e      | 2 963        | 30 025        | a-d      | 3 553        | 37 825        | a-h      | 4 857        | 32 875        | abc      | 6 662        |
| 26             | 28 750        | a-d      | 4 945        | 28 950        | a-d      | 3 703        | 41 150        | d-i      | 7 710        | 38 750        | b-h      | 4 888        |
| 35             | 31 175        | a-d      | 5 264        | 39 800        | ef       | 10 081       | 32 000        | ab       | 2 761        | 33 275        | a-d      | 5 402        |
| 42             | 36 125        | cde      | 4 539        | 36 725        | de       | 8 375        | 44 200        | g-j      | 8 315        | 37 925        | b-h      | 9 850        |
| 43             | 27 800        | abc      | 4 244        | 30 150        | a-d      | 5 291        | 32 250        | ab       | 4 234        | 30 657        | ab       | 3 894        |
| 55             | 28 825        | a-d      | 5 569        | 35 000        | b-e      | 6 887        | 29 750        | a        | 3 670        | 31 375        | ab       | 3 813        |
| 83             | 33 275        | a-e      | 6 361        | 30 800        | a-d      | 7 864        | 40 700        | c-h      | 5 981        | 32 175        | ab       | 5 252        |
| 114            | 27 225        | ab       | 7 867        | 46 725        | f        | 18 054       | 49 367        | j        | 4 320        | 33 800        | a-e      | 15 784       |
| 119            | 39 575        | ef       | 7 002        | 33 950        | a-e      | 7 036        | 48 600        | ij       | 9 433        | 34 150        | a-f      | 3 982        |
| 1b             | 33 300        | a-e      | 9 891        | 28 325        | a-d      | 5 791        | 44 325        | hij      | 8 062        | 41 325        | e-i      | 6 215        |
| 78b            | 31 125        | a-d      | 4 095        | 30 375        | a-d      | 9 892        | 34 950        | a-f      | 5 876        | 31 075        | ab       | 5 200        |
| Bingo          | 28 125        | a-d      | 6 323        | 27 350        | ab       | 2 513        | 36 625        | a-h      | 9 482        | 37 225        | a-h      | 4 651        |
| <b>Średnia</b> | <b>31 845</b> | <b>a</b> | <b>6 789</b> | <b>32 165</b> | <b>a</b> | <b>9 053</b> | <b>39 456</b> | <b>c</b> | <b>8 092</b> | <b>34 765</b> | <b>b</b> | <b>7 287</b> |

a-f – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, a-j – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, abc – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu zaobserwowano istotne zmiany wartości parametru Area, które u obiektów kombinacji kontrolnej (K2) wzrosły o 24%, a u obiektów kombinacji w suszy (S2) jedynie o 8% w konfrontacji z pierwszym dniem suszy. Przełożyło się to na istotne różnice w wartościach parametru Area na skutek suszy. Średnio u wszystkich genotypów spadek wyniósł 12%, ale poszczególne obiekty wykazały się różnymi reakcjami na stres suszy. U linii nr 35 i 55 oraz u odmiany Bingo odnotowano nieistotne statystycznie wzrosty wartości

parametru, a najwyższy stwierdzono u linii nr 55, gdzie wyniósł 5%. U pozostałych 12 genotypów odnotowano spadki wartości parametru Area na skutek suszy, a u linii nr 83, 114 i 119 były to wartości istotne statystycznie. Najwyższy spadek odnotowano u linii nr 114, u której wyniósł 32%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości parametru stwierdzono u linii nr 114 i 119, a najniższe u linii nr 55 i 35. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 1b i 26, a najniższe u linii nr 43 i 78b (Tabela 41).

#### Wskaźnik funkcjonowania PSII (PI)

W pierwszym dniu suszy wartości wskaźnika funkcjonowania PSII były niższe u obiektów w suszy (S1) w porównaniu do obiektów kontrolnych (K1). Spadek wyniósł średnio 23% i był istotny statystycznie. Jedynie u odmiany Bingo odnotowano wzrost wartości wskaźnika o 20%, a u pozostałych genotypów stwierdzono spadki wartości wskaźnika. Spośród badanych genotypów najmniejszy wpływ suszy stwierdzono u linii nr 12, 114 i 1b, gdzie spadki nie przekraczały 16%. U 8 linii na skutek suszy stwierdzono wystąpienie istotnych różnic, a najwyższe spadki wartości wskaźnika odnotowano u linii nr 42 i 78b, gdzie wyniosły one odpowiednio 40% i 38%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości wskaźnika PI stwierdzono u linii nr 9 i 12, a najniższe u linii nr 78b i 114. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości wskaźnika odnotowano u linii nr 12 i 9, a najniższe u linii nr 78b i 119 (Tabela 42).

W czternastym dniu stwierdzono 9% spadek wartości wskaźnika PI u obiektów kontrolnych (K2), co wobec 12% wzrostu wartości wskaźnika u obiektów w suszy (S2) przełożyło się na brak istotnych różnic w wartościach wskaźnika po takim czasie trwania suszy. Średnio wartość wskaźnika PI obiektów kombinacji w suszy była o 5% niższa od wartości wskaźnika u obiektów kombinacji kontrolnej. Wśród poszczególnych genotypów obserwowano różne reakcje na stres suszy w postaci zmian wskaźnika funkcjonowania PSII. U 6 genotypów zaobserwowano wzrost wartości wskaźnika, a u pozostałych 9 jego spadek. Najwyższy, wynoszący 31%, wzrost stwierdzono u linii nr 35, a najwyższy spadek odnotowano u linii nr 114, gdzie wyniósł 37%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości wskaźnika stwierdzono u linii nr 1b i 114, a najniższe u linii nr 35 i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 1b i 9, a najniższe u linii nr 83 i 114 (Tabela 42).

Tabela 42. Wartości wskaźnika funkcjonowania PSII (PI) u linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1                      |   |             | S1                      |   |             | K2                      |   |             | S2                      |   |             |
|----------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|-------------------------|---|-------------|
|                | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           | 1                       | 2 | 3           |
| 9              | 2,33 <sup>k</sup>       |   | 0,73        | 1,82 <sup>e-j</sup>     |   | 0,51        | 1,88 <sup>e-h</sup>     |   | 0,31        | 1,84 <sup>d-h</sup>     |   | 0,57        |
| 12             | 2,25 <sup>jk</sup>      |   | 0,50        | 2,00 <sup>g-k</sup>     |   | 0,34        | 1,77 <sup>c-h</sup>     |   | 0,45        | 1,44 <sup>a-e</sup>     |   | 0,20        |
| 18             | 2,05 <sup>h-k</sup>     |   | 0,58        | 1,55 <sup>c-g</sup>     |   | 0,42        | 2,05 <sup>gh</sup>      |   | 0,17        | 1,76 <sup>c-h</sup>     |   | 0,58        |
| 23             | 2,15 <sup>ijk</sup>     |   | 0,49        | 1,66 <sup>d-i</sup>     |   | 0,35        | 1,83 <sup>d-h</sup>     |   | 0,38        | 1,74 <sup>b-h</sup>     |   | 0,72        |
| 26             | 2,00 <sup>g-k</sup>     |   | 0,68        | 1,48 <sup>c-f</sup>     |   | 0,27        | 1,97 <sup>fgh</sup>     |   | 0,51        | 1,68 <sup>b-h</sup>     |   | 0,26        |
| 35             | 2,14 <sup>ijk</sup>     |   | 0,33        | 1,49 <sup>c-f</sup>     |   | 0,22        | 1,14 <sup>a</sup>       |   | 0,23        | 1,50 <sup>a-f</sup>     |   | 0,33        |
| 42             | 1,92 <sup>f-k</sup>     |   | 0,58        | 1,14 <sup>abc</sup>     |   | 0,18        | 1,58 <sup>a-h</sup>     |   | 0,34        | 1,62 <sup>a-h</sup>     |   | 0,53        |
| 43             | 1,60 <sup>c-h</sup>     |   | 0,16        | 1,14 <sup>abc</sup>     |   | 0,21        | 1,29 <sup>abc</sup>     |   | 0,33        | 1,56 <sup>a-h</sup>     |   | 0,21        |
| 55             | 1,81 <sup>e-j</sup>     |   | 0,60        | 1,41 <sup>cde</sup>     |   | 0,26        | 1,41 <sup>a-e</sup>     |   | 0,23        | 1,53 <sup>a-g</sup>     |   | 0,39        |
| 83             | 1,71 <sup>d-i</sup>     |   | 0,29        | 1,27 <sup>bcd</sup>     |   | 0,34        | 1,66 <sup>b-h</sup>     |   | 0,52        | 1,28 <sup>abc</sup>     |   | 0,28        |
| 114            | 1,33 <sup>b-e</sup>     |   | 0,23        | 1,15 <sup>abc</sup>     |   | 0,50        | 2,05 <sup>h</sup>       |   | 0,41        | 1,29 <sup>abc</sup>     |   | 0,67        |
| 119            | 1,39 <sup>cde</sup>     |   | 0,44        | 0,87 <sup>ab</sup>      |   | 0,19        | 1,72 <sup>b-h</sup>     |   | 0,61        | 1,55 <sup>a-h</sup>     |   | 0,32        |
| 1b             | 1,95 <sup>f-k</sup>     |   | 0,48        | 1,64 <sup>d-h</sup>     |   | 0,45        | 2,07 <sup>h</sup>       |   | 0,31        | 2,02 <sup>fgh</sup>     |   | 0,52        |
| 78b            | 1,30 <sup>bcd</sup>     |   | 0,34        | 0,81 <sup>a</sup>       |   | 0,37        | 1,23 <sup>ab</sup>      |   | 0,32        | 1,34 <sup>a-d</sup>     |   | 0,57        |
| Bingo          | 1,41 <sup>cde</sup>     |   | 0,18        | 1,70 <sup>d-i</sup>     |   | 0,31        | 1,28 <sup>abc</sup>     |   | 0,42        | 1,43 <sup>a-e</sup>     |   | 0,47        |
| <b>Średnia</b> | <b>1,82<sup>c</sup></b> |   | <b>0,56</b> | <b>1,41<sup>a</sup></b> |   | <b>0,46</b> | <b>1,66<sup>b</sup></b> |   | <b>0,48</b> | <b>1,57<sup>b</sup></b> |   | <b>0,49</b> |

<sup>a-k</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-h</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>abc</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS (ETo/CS)

Wartości parametru ETo/CS w pierwszym dniu suszy nie różniły się istotnie pomiędzy obiektami kombinacji kontrolnej (K1) a obiektami kombinacji w suszy (S1). Średnio u obiektów w suszy wartość parametru była wyższa o 1%. Poszczególne genotypy różnie reagowały na stres suszy. Najwyższy wzrost wartości parametru ETo/CS stwierdzono u linii nr 114, u której wyniósł on 21%. Wzrost wartości parametru ETo/CS odnotowano także u 5 innych genotypów oraz u odmiany Bingo. U pozostałych 8 linii stwierdzono spadki wartości. Najwyższy spadek wyniósł 9% u linii nr 9. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości badanego parametru stwierdzono u linii nr 35 i 23, a najniższe u linii nr 43 i 114. Z kolei u obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości stwierdzono u linii nr 35 i 55, a najniższe u linii nr 43 i 18 (Tabela 43).



W czternastym dniu suszy stwierdzono spadek wartości parametru ETo/CS odpowiednio o 3% u obiektów kontrolnych (K2) i o 6% u obiektów w suszy (S2) w porównaniu z wynikami z pierwszego dnia suszy. Przełożyło się to na niższą o 2% średnią wartość parametru u obiektów kombinacji w suszy w porównaniu do obiektów kombinacji kontrolnej, jednak różnice te nie były istotne statystycznie. U 6 linii stwierdzono wzrost, a u 9 linii spadek wartości badanego parametru. U linii nr 26 stwierdzono istotny spadek o 11%. Z kolei najwyższy wzrost wartości parametru odnotowano u linii nr 35, gdzie wyniósł 8%. Spośród obiektów kontrolnych (K2) najwyższe wartości parametru stwierdzono u linii nr 26 i 23, a najniższe u linii nr 43 i 78b. Z kolei wśród obiektów w suszy (S2) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 12 i 42, a najniższe u linii nr 83 i 114 (Tabela 43).

Tabela 43. Tempo transportu elektronów w przeliczeniu na CS (ETo/CS) u linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1            |          |              | S1            |          |              | K2            |          |              | S2            |          |              |
|----------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|
|                | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            | 1             | 2        | 3            |
| 9              | 190,68        | b-e      | 20,70        | 173,82        | ab       | 14,45        | 187,04        | e-i      | 9,67         | 173,95        | a-f      | 17,28        |
| 12             | 191,96        | b-e      | 13,12        | 184,25        | a-e      | 12,78        | 191,61        | f-i      | 15,94        | 202,59        | i        | 16,55        |
| 18             | 178,86        | abc      | 28,26        | 172,38        | ab       | 18,27        | 183,71        | d-i      | 11,95        | 164,19        | a-d      | 15,20        |
| 23             | 198,07        | c-f      | 23,65        | 188,24        | a-e      | 8,86         | 198,99        | hi       | 15,15        | 188,66        | e-i      | 12,91        |
| 26             | 184,22        | a-e      | 24,61        | 182,93        | a-d      | 10,06        | 200,10        | hi       | 26,87        | 177,66        | b-g      | 6,14         |
| 35             | 214,45        | f        | 23,46        | 215,75        | f        | 16,13        | 170,24        | a-e      | 9,57         | 183,19        | d-i      | 6,54         |
| 42             | 193,02        | b-e      | 22,73        | 202,96        | def      | 12,13        | 194,72        | ghi      | 13,41        | 200,40        | hi       | 39,01        |
| 43             | 166,11        | a        | 5,13         | 171,05        | ab       | 9,97         | 157,81        | a        | 12,49        | 165,57        | a-d      | 9,21         |
| 55             | 188,26        | a-e      | 14,67        | 206,33        | ef       | 17,85        | 185,64        | e-i      | 11,51        | 178,96        | c-g      | 15,03        |
| 83             | 188,28        | a-e      | 11,22        | 184,49        | a-e      | 17,13        | 177,62        | b-g      | 9,67         | 158,43        | ab       | 8,16         |
| 114            | 170,38        | ab       | 30,92        | 205,86        | ef       | 34,54        | 181,18        | c-h      | 14,77        | 163,34        | abc      | 33,86        |
| 119            | 187,95        | a-e      | 15,22        | 178,70        | abc      | 15,67        | 174,38        | a-f      | 13,03        | 173,81        | a-f      | 8,60         |
| 1b             | 187,47        | a-e      | 12,96        | 181,93        | a-d      | 17,01        | 192,37        | f-i      | 9,72         | 185,87        | e-i      | 13,77        |
| 78b            | 180,68        | a-d      | 19,55        | 180,27        | a-d      | 29,29        | 162,86        | abc      | 11,34        | 164,60        | a-d      | 27,18        |
| Bingo          | 173,52        | ab       | 9,18         | 182,80        | a-d      | 10,11        | 162,93        | abc      | 16,97        | 174,97        | a-f      | 5,89         |
| <b>Średnia</b> | <b>186,26</b> | <b>b</b> | <b>21,77</b> | <b>187,45</b> | <b>b</b> | <b>21,29</b> | <b>181,41</b> | <b>a</b> | <b>18,63</b> | <b>177,08</b> | <b>a</b> | <b>21,62</b> |

a-f – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, a-i – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, ab – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

Parametr charakteryzujący zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (RC/CS<sub>0</sub>)

W pierwszym dniu doświadczenia wartości RC/CS<sub>0</sub> istotnie różniły się u obiektów kontrolnych (K1) i obiektów w suszy (S1). Średnio na skutek suszy wartość parametru spadła o 8%. Jedynie u linii nr 114 oraz u odmiany Bingo stwierdzono wzrosty wartości parametru o odpowiednio 7% i 5%, ale nie były one istotne statystycznie. U pozostałych 13 genotypów stwierdzono spadki wartości parametru, które u 6 linii były istotne statystycznie. Najwyższe spadki wystąpiły u linii nr 23 i 9, które wyniosły po 15%. Spośród obiektów kontrolnych (K1) najwyższe wartości parametru stwierdzono u linii nr 35 i 9, a najniższe u linii nr 114 i 119. Z kolei wśród obiektów w suszy (S1) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 55 i 35, a najniższe u linii nr 78b i 119 (Tabela 44).

Tabela 44. Parametr charakteryzujący zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (RC/CS<sub>0</sub>) u linii OMA w doświadczeniu tunelowym w pierwszym (K1, S1) i czternastym (K2, S2) dniu suszy

| Genotyp        | K1                        |              |                           | S1           |                           |              | K2                        |              |   | S2 |   |   |
|----------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---|----|---|---|
|                | 1                         | 2            | 3                         | 1            | 2                         | 3            | 1                         | 2            | 3 | 1  | 2 | 3 |
| 9              | 154,46 <sup>jk</sup>      | 12,06        | 130,83 <sup>b-h</sup>     | 8,50         | 161,40 <sup>fgh</sup>     | 9,99         | 137,57 <sup>bc</sup>      | 19,41        |   |    |   |   |
| 12             | 146,83 <sup>ij</sup>      | 9,12         | 131,59 <sup>b-h</sup>     | 6,71         | 159,29 <sup>e-h</sup>     | 16,92        | 153,25 <sup>c-h</sup>     | 14,13        |   |    |   |   |
| 18             | 132,54 <sup>c-h</sup>     | 18,26        | 124,68 <sup>a-e</sup>     | 7,95         | 149,55 <sup>b-h</sup>     | 12,87        | 148,41 <sup>b-f</sup>     | 10,43        |   |    |   |   |
| 23             | 142,08 <sup>g-j</sup>     | 18,45        | 120,16 <sup>abc</sup>     | 7,42         | 157,16 <sup>d-h</sup>     | 9,52         | 140,98 <sup>bcd</sup>     | 11,75        |   |    |   |   |
| 26             | 137,22 <sup>d-i</sup>     | 14,57        | 123,53 <sup>a-d</sup>     | 5,48         | 164,58 <sup>gh</sup>      | 22,44        | 148,09 <sup>b-f</sup>     | 7,07         |   |    |   |   |
| 35             | 163,28 <sup>k</sup>       | 7,28         | 139,93 <sup>f-i</sup>     | 12,50        | 147,32 <sup>b-f</sup>     | 11,17        | 158,07 <sup>e-h</sup>     | 5,76         |   |    |   |   |
| 42             | 144,31 <sup>hij</sup>     | 8,96         | 123,61 <sup>a-d</sup>     | 4,69         | 150,77 <sup>c-h</sup>     | 15,49        | 148,90 <sup>b-g</sup>     | 23,23        |   |    |   |   |
| 43             | 129,04 <sup>b-g</sup>     | 4,63         | 121,58 <sup>abc</sup>     | 6,95         | 122,77 <sup>a</sup>       | 12,09        | 133,65 <sup>ab</sup>      | 3,33         |   |    |   |   |
| 55             | 150,64 <sup>ij</sup>      | 16,95        | 144,73 <sup>hij</sup>     | 11,39        | 147,51 <sup>b-f</sup>     | 13,94        | 151,15 <sup>c-h</sup>     | 14,65        |   |    |   |   |
| 83             | 140,20 <sup>f-i</sup>     | 10,13        | 129,70 <sup>b-g</sup>     | 13,16        | 159,99 <sup>fgh</sup>     | 9,30         | 143,48 <sup>b-e</sup>     | 9,53         |   |    |   |   |
| 114            | 117,23 <sup>ab</sup>      | 22,32        | 125,16 <sup>b-e</sup>     | 25,26        | 152,83 <sup>c-h</sup>     | 19,46        | 143,27 <sup>b-e</sup>     | 20,09        |   |    |   |   |
| 119            | 118,05 <sup>ab</sup>      | 8,38         | 117,60 <sup>ab</sup>      | 7,69         | 148,48 <sup>b-f</sup>     | 7,42         | 137,31 <sup>bc</sup>      | 8,39         |   |    |   |   |
| 1b             | 137,93 <sup>e-i</sup>     | 12,59        | 129,01 <sup>b-g</sup>     | 9,08         | 165,06 <sup>h</sup>       | 10,57        | 148,95 <sup>b-g</sup>     | 10,29        |   |    |   |   |
| 78b            | 128,44 <sup>b-g</sup>     | 9,74         | 111,01 <sup>a</sup>       | 11,28        | 134,03 <sup>ab</sup>      | 8,62         | 139,93 <sup>bc</sup>      | 15,45        |   |    |   |   |
| Bingo          | 126,64 <sup>b-f</sup>     | 8,61         | 132,74 <sup>c-h</sup>     | 6,01         | 139,53 <sup>bc</sup>      | 15,68        | 146,98 <sup>b-f</sup>     | 6,61         |   |    |   |   |
| <b>Średnia</b> | <b>137,93<sup>b</sup></b> | <b>17,60</b> | <b>127,06<sup>a</sup></b> | <b>13,05</b> | <b>150,68<sup>d</sup></b> | <b>17,17</b> | <b>145,33<sup>c</sup></b> | <b>14,01</b> |   |    |   |   |

<sup>a-k</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 1, <sup>a-h</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii w obrębie terminu 2, <sup>a-d</sup> – testowanie średnich z poszczególnych terminów i traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

W czternastym dniu doświadczenia wartości RC/CS<sub>0</sub> wzrosły u obiektów kombinacji kontrolnej (K<sub>2</sub>) o 9%, a u obiektów kombinacji w suszy (S<sub>2</sub>) o 14% w stosunku do pierwszego dnia doświadczenia. Przełożyło się to na niższe średnie wartości obiektów w suszy o 4% od obiektów kontrolnych, co stanowiło istotną statystycznie różnicę. U 4 genotypów oraz u odmiany Bingo stwierdzono wzrosty wartości parametru, ale nie były one istotne statystycznie. Najwyższy, wynoszący 9%, odnotowano u linii nr 43. U pozostałych 10 genotypów wystąpiły spadki wartości parametru, które u 4 linii były istotne statystycznie. Najwyższe wystąpiły u linii nr 9 i 83, gdzie wyniosły odpowiednio 15% i 10%. Spośród obiektów kontrolnych (K<sub>2</sub>) najwyższe wartości RC/CS<sub>0</sub> stwierdzono u linii nr 1b i 26, a najniższe u linii nr 43 i 78b. Z kolei u obiektów w suszy (S<sub>2</sub>) najwyższe wartości odnotowano u linii nr 35 i 12, a najniższe u linii nr 43 i 119 (Tabela 44).

### 6.3.3. Analiza wybranych elementów składowych plonu

Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji wybranych elementów składowych plonu można stwierdzić, że na badane cechy miał wpływ sposób traktowania (T) oraz genotyp (G), natomiast ich interakcja (T × G) miała istotny wpływ tylko na liczbę i masę ziarniaków. Wartości testu F analizy wariancji wybranych elementów składowych plonu prezentuje Tabela 45.

Tabela 45. Analiza wariancji wybranych elementów składowych plonu linii OMA rosnących w warunkach tunelowych

| zbiory            | T<br>(df = 1) | G<br>(df = 14) | T × G<br>(df = 14) |
|-------------------|---------------|----------------|--------------------|
| masa pędów        | 41,16**       | 3,75**         | 1,45               |
| liczba ziarniaków | 43,35**       | 11,49**        | 2,64**             |
| masa ziarniaków   | 54,71**       | 11,83**        | 2,41**             |
| F <sub>0,05</sub> | 3,947         | 1,803          | 1,803              |
| F <sub>0,01</sub> | 6,925         | 2,286          | 2,286              |

T – traktowanie, P – pokolenie, G – genotyp, × – poszczególne interakcje, df – liczba stopni swobody, \*\* – istotność dla  $\alpha = 0,01$

#### Masa pędów

Stwierdzono istotne statystycznie spadki masy pędów na skutek suszy. Średnio spadek wyniósł 30% i wystąpił u każdego z analizowanych genotypów. Nieistotne statystycznie różnice pomiędzy obiektami kontrolnymi (K) a obiektami w suszy (S) wystąpiły u linii nr 9, 18, 35, 42, 43, 55, 83, 114, 119 i 1b oraz u odmiany Bingo. Najmniejsze różnice wystąpiły

u linii nr 18 oraz u odmiany Bingo, u których nie przekroczyły 5%. Istotnie statystycznie spadki masy pędów wystąpiły u linii nr 23, 26, 78b i 12, gdzie wyniosły odpowiednio 55%, 47%, 39% i 36%. Spośród obiektów kombinacji kontrolnej (K) najwyższe masy pędów stwierdzono u linii nr 26 i 1b, a najniższe u linii nr 18 i 114. Z kolei u obiektów kombinacji w suszy (S) najwyższą biomasa części nadziemnych odnotowano u linii nr 1b i 55, a najniższe u linii nr 35 i 18 (Tabela 46).

Tabela 46. Masa pędów linii OMA [g] w doświadczeniu tunelowym (K – kontrola, S – susza)

| Genotyp        | K           |          |             | S           |          |             |
|----------------|-------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|
|                | 1           | 2        | 3           | 1           | 2        | 3           |
| 9              | 3,61        | b-g      | 1,09        | 2,32        | ab       | 0,94        |
| 12             | 4,51        | fgh      | 1,34        | 2,89        | a-e      | 1,31        |
| 18             | 1,94        | a        | 0,45        | 1,91        | a        | 0,26        |
| 23             | 4,45        | e-h      | 1,75        | 2,01        | ab       | 0,93        |
| 26             | 5,38        | h        | 1,80        | 2,85        | a-d      | 0,63        |
| 35             | 2,83        | a-d      | 0,57        | 1,79        | a        | 0,25        |
| 42             | 3,05        | a-f      | 1,15        | 2,83        | a-d      | 1,39        |
| 43             | 3,11        | a-f      | 0,79        | 2,89        | a-e      | 0,43        |
| 55             | 4,10        | c-h      | 0,50        | 2,90        | a-e      | 0,88        |
| 83             | 3,06        | a-f      | 0,54        | 2,02        | ab       | 1,01        |
| 114            | 2,81        | a-d      | 0,58        | 2,44        | ab       | 0,30        |
| 119            | 3,17        | a-f      | 0,90        | 2,02        | ab       | 0,35        |
| 1b             | 4,82        | gh       | 0,36        | 3,40        | a-g      | 0,37        |
| 78b            | 4,40        | d-h      | 1,80        | 2,70        | abc      | 0,67        |
| Bingo          | 2,82        | a-d      | 0,63        | 2,69        | abc      | 0,49        |
| <b>Średnia</b> | <b>3,60</b> | <b>b</b> | <b>1,32</b> | <b>2,51</b> | <b>a</b> | <b>0,82</b> |

<sup>a-h</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Liczba ziarniaków

Spadek średniej liczby wykształconych ziarniaków na skutek suszy wynosił 44%. Jedynie u linii nr 55 oraz u odmiany Bingo stwierdzono nieistotne statystycznie wzrosty liczby wykształconych ziarniaków. U pozostałych genotypów odnotowano spadki, które były istotne statystycznie u linii nr 12, 23, 26, 78b, 9 i 83. Spośród obiektów kontrolnych (K) najwięcej ziarniaków stwierdzono u linii nr 9 i 78b, a najmniej u linii nr 18 i 119. Z kolei u obiektów

w suszy (S) najczęściej ziarniaków odnotowano u linii nr 9 i 78b oraz u odmiany Bingo, a najmniej u linii nr 18 i 114 (Tabela 47).

Tabela 47. Liczba ziarniaków linii OMA w doświadczeniu tunelowym (K – kontrola, S – susza)

| Genotyp        | K            |                |              | S            |                |              |
|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------|--------------|
|                | 1            | 2              | 3            | 1            | 2              | 3            |
| 9              | 61,75        | <sup>k</sup>   | 25,14        | 32,25        | <sup>ghi</sup> | 12,69        |
| 12             | 57,75        | <sup>k</sup>   | 14,41        | 16,75        | <sup>a-g</sup> | 13,89        |
| 18             | 2,33         | <sup>abc</sup> | 2,05         | 0,00         | <sup>a</sup>   | 0,00         |
| 23             | 52,75        | <sup>jk</sup>  | 14,06        | 21,25        | <sup>b-g</sup> | 15,84        |
| 26             | 43,00        | <sup>h-k</sup> | 14,40        | 17,50        | <sup>a-g</sup> | 5,00         |
| 35             | 24,25        | <sup>d-h</sup> | 6,29         | 19,67        | <sup>a-g</sup> | 1,89         |
| 42             | 9,00         | <sup>a-f</sup> | 8,04         | 3,75         | <sup>a-d</sup> | 1,50         |
| 43             | 26,67        | <sup>e-h</sup> | 2,62         | 20,67        | <sup>a-g</sup> | 1,25         |
| 55             | 21,75        | <sup>c-g</sup> | 14,55        | 26,25        | <sup>e-h</sup> | 14,68        |
| 83             | 50,75        | <sup>ijk</sup> | 9,81         | 29,50        | <sup>e-h</sup> | 19,94        |
| 114            | 21,00        | <sup>a-g</sup> | 26,17        | 0,50         | <sup>ab</sup>  | 0,58         |
| 119            | 8,50         | <sup>a-e</sup> | 6,45         | 2,75         | <sup>abc</sup> | 2,22         |
| 1b             | 34,33        | <sup>g-j</sup> | 3,77         | 22,00        | <sup>c-g</sup> | 6,48         |
| 78b            | 61,00        | <sup>k</sup>   | 21,02        | 30,25        | <sup>fgh</sup> | 14,73        |
| Bingo          | 37,75        | <sup>g-j</sup> | 9,64         | 43,00        | <sup>h-k</sup> | 16,59        |
| <b>Średnia</b> | <b>34,17</b> | <sup>b</sup>   | <b>22,91</b> | <b>19,07</b> | <sup>a</sup>   | <b>15,64</b> |

<sup>a-k</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe

#### Masa ziarniaków

Istotny statystycznie spadek masy ziarniaków wykształconych przez jedną roślinę na skutek suszy wyniósł średnio 46%. U żadnego genotypu nie stwierdzono wzrostu masy ziarniaków, a najmniejszy spadek odnotowano u linii nr 55, wynoszący jedynie 1%. Istotne statystycznie spadki wystąpiły u linii nr 26, 12, 23, 83, 9 i 78b, gdzie wyniosły odpowiednio 68%, 65%, 60%, 48%, 47% i 46%. Spośród obiektów kombinacji kontrolnej (K) najwyższe masy ziarniaków odnotowano u linii nr 12 i 23, a najniższe u linii nr 18 i 119. Z kolei wśród obiektów w suszy (S) najwyższe masy stwierdzono u linii nr 9 i 78b oraz u odmiany Bingo, a najniższe u linii nr 18 i 114 (Tabela 48).

Tabela 48. Masa ziarniaków linii OMA [g] w doświadczeniu tunelowym (K – kontrola, S – susza)

| Genotyp        | K           |          |             | S           |          |             |
|----------------|-------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|
|                | 1           | 2        | 3           | 1           | 2        | 3           |
| 9              | 1,68        | jk       | 0,54        | 0,88        | e-h      | 0,35        |
| 12             | 1,82        | k        | 0,51        | 0,65        | b-h      | 0,56        |
| 18             | 0,07        | ab       | 0,07        | 0,00        | a        | 0,00        |
| 23             | 1,72        | jk       | 0,49        | 0,69        | c-h      | 0,46        |
| 26             | 1,61        | jk       | 0,47        | 0,52        | a-f      | 0,20        |
| 35             | 0,73        | d-h      | 0,13        | 0,56        | a-g      | 0,06        |
| 42             | 0,33        | a-e      | 0,27        | 0,11        | abc      | 0,05        |
| 43             | 0,91        | e-h      | 0,03        | 0,77        | d-h      | 0,02        |
| 55             | 0,79        | d-h      | 0,53        | 0,79        | d-h      | 0,41        |
| 83             | 1,54        | ijk      | 0,39        | 0,81        | d-h      | 0,52        |
| 114            | 0,49        | a-f      | 0,53        | 0,03        | a        | 0,03        |
| 119            | 0,26        | a-d      | 0,19        | 0,07        | ab       | 0,06        |
| 1b             | 1,17        | g-j      | 0,14        | 0,79        | d-h      | 0,20        |
| 78b            | 1,61        | jk       | 0,64        | 0,87        | d-h      | 0,35        |
| Bingo          | 1,18        | hij      | 0,54        | 1,00        | f-i      | 0,29        |
| <b>Średnia</b> | <b>1,06</b> | <b>b</b> | <b>0,68</b> | <b>0,57</b> | <b>a</b> | <b>0,43</b> |

<sup>a-k</sup> – testowanie średnich z poszczególnych linii, <sup>ab</sup> – testowanie średnich z traktowania, 1 – średnia arytmetyczna, 2 – grupa średnich, 3 – odchylenie standardowe)


#### 6.3.4. Korelacje

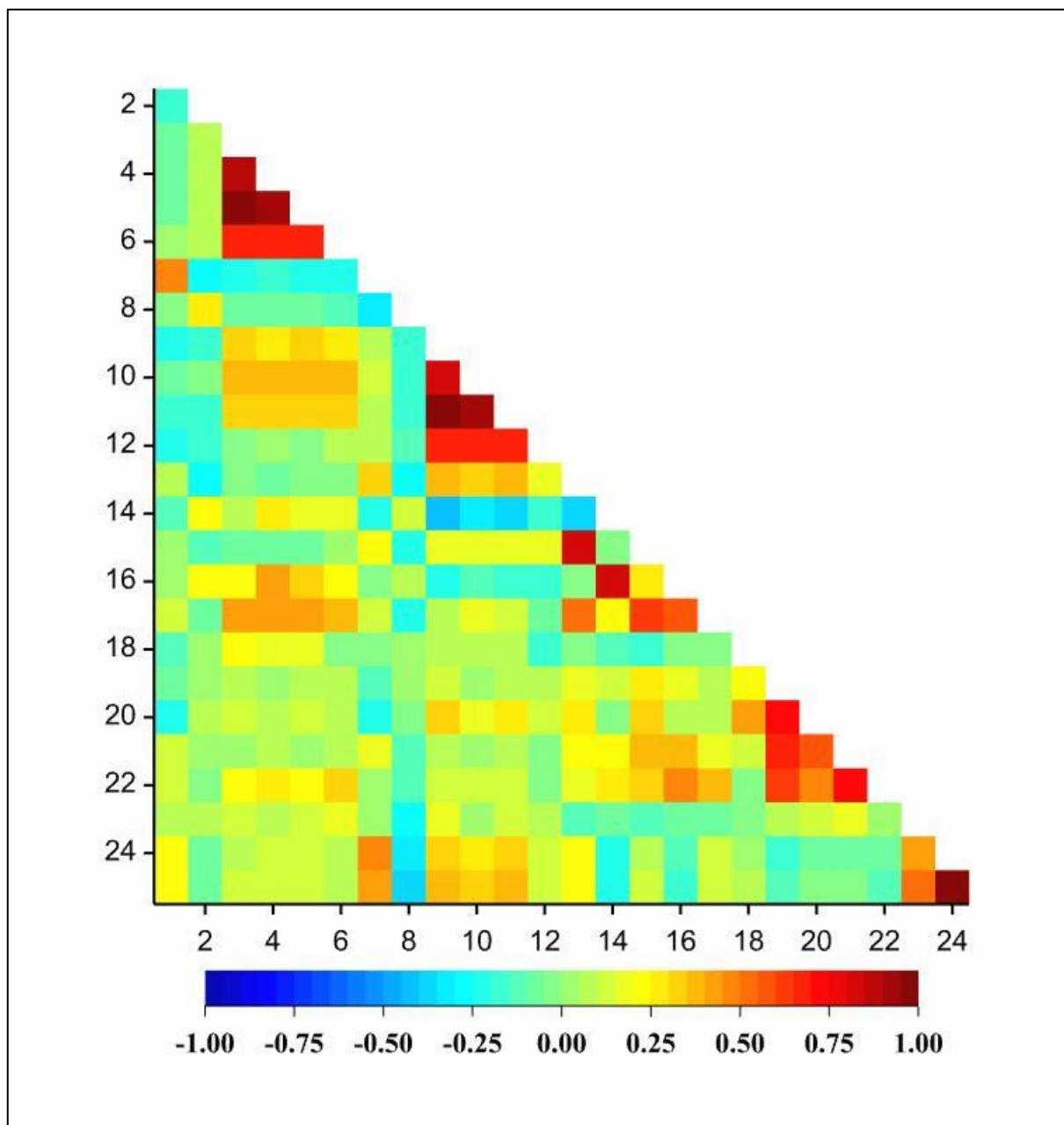
W doświadczeniu przeanalizowano 300 korelacji między parami analizowanych parametrów. U 86 stwierdzono występowanie silnych korelacji: 10 z nich było ujemnych, a 76 dodatnich. Większość stwierdzonych silnych korelacji była istotna na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$ . Stwierdzono występowanie istotnych korelacji pomiędzy analizowanymi elementami składowymi plonu a parametrami biochemicznymi w czternastym dniu suszy. Korelacja dodatnia wystąpiła pomiędzy liczbą i masą ziarniaków a zawartością cukrów rozpuszczalnych, chlorofilu *a*, *b* oraz sumy *a* i *b*. Natomiast korelację ujemną stwierdzono pomiędzy wszystkimi analizowanymi elementami składowymi plonu a zawartością związków fenolowych. Ponadto stwierdzono dodatnie korelacje pomiędzy analizowanymi elementami składowymi plonu. Wartości poszczególnych współczynników korelacji z zaznaczonymi istotnościami korelacji prezentuje Tabela 49, natomiast graficzną interpretację wyników przedstawia Rycina 26.

Tabela 49. Macierz korelacji liniowej Pearsona wartości rzeczywistych pomiędzy analizowanymi cechami linii OMA w doświadczeniu tunelowym

|  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23   | 24   | 25 |  |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|----|--|
| 1 zawartość cukrów w terminie 1            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 2 zawartość fenoli w terminie 1            | -0,16 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 3 zawartość chlorofilu a w terminie 1      | -0,06 | 0,06  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 4 zawartość chlorofilu b w terminie 1      | -0,09 | 0,07  | 0,87  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 5 zawartość chlorofilu a i b w terminie 1  | -0,07 | 0,07  | 0,99  | 0,94  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 6 zawartość karotenoidów w terminie 1      | 0,00  | 0,08  | 0,66  | 0,69  | 0,69  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 7 zawartość cukrów w terminie 2            | 0,49  | -0,28 | -0,25 | -0,19 | -0,24 | -0,21 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 8 zawartość fenoli w terminie 2            | -0,05 | 0,29  | -0,10 | -0,06 | -0,09 | -0,13 | -0,33 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 9 zawartość chlorofilu a w terminie 2      | -0,21 | -0,19 | 0,31  | 0,30  | 0,32  | 0,26  | 0,07  | -0,20 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 10 zawartość chlorofilu b w terminie 2     | -0,09 | -0,04 | 0,37  | 0,36  | 0,38  | 0,40  | 0,12  | -0,17 | 0,85  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 11 zawartość chlorofilu a i b w terminie 2 | -0,18 | -0,15 | 0,34  | 0,33  | 0,34  | 0,31  | 0,09  | -0,19 | 0,99  | 0,92  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 12 zawartość karotenoidów w terminie 2     | -0,24 | -0,16 | -0,02 | 0,00  | -0,01 | 0,09  | 0,05  | -0,11 | 0,67  | 0,69  | 0,70  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 13 Fv/Fm w terminie 1                      | 0,10  | -0,26 | -0,02 | -0,09 | -0,04 | 0,00  | 0,33  | -0,29 | 0,37  | 0,33  | 0,37  | 0,20  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 14 Area w terminie 1                       | -0,14 | 0,25  | 0,10  | 0,28  | 0,16  | 0,15  | -0,22 | 0,13  | -0,42 | -0,31 | -0,40 | -0,19 | -0,36 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 15 PI w terminie 1                         | 0,02  | -0,13 | -0,10 | -0,09 | -0,10 | 0,00  | 0,24  | -0,21 | 0,19  | 0,20  | 0,20  | 0,17  | 0,82  | -0,01 |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 16 ETo/CS w terminie 1                     | 0,02  | 0,22  | 0,25  | 0,43  | 0,31  | 0,25  | -0,01 | 0,07  | -0,21 | -0,10 | -0,19 | -0,19 | -0,03 | 0,81  | 0,27  |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 17 RC/CSO w terminie 1                     | 0,11  | -0,10 | 0,40  | 0,44  | 0,43  | 0,38  | 0,11  | -0,21 | 0,08  | 0,17  | 0,11  | -0,07 | 0,51  | 0,22  | 0,64  | 0,55  |       |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 18 Fv/Fm w terminie 2                      | -0,11 | 0,04  | 0,21  | 0,15  | 0,20  | 0,00  | -0,03 | 0,02  | 0,10  | 0,07  | 0,09  | -0,16 | -0,02 | -0,14 | -0,16 | -0,01 | -0,02 |       |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 19 Area w terminie 2                       | -0,07 | 0,02  | 0,09  | 0,04  | 0,08  | 0,06  | -0,12 | 0,01  | 0,12  | 0,02  | 0,09  | 0,07  | 0,17  | 0,14  | 0,27  | 0,19  | 0,06  | 0,25  |       |       |       |       |      |      |    |  |
| 20 PI w terminie 2                         | -0,20 | 0,05  | 0,11  | 0,08  | 0,10  | 0,05  | -0,21 | -0,04 | 0,30  | 0,18  | 0,28  | 0,12  | 0,27  | -0,03 | 0,32  | 0,07  | 0,08  | 0,44  | 0,75  |       |       |       |      |      |    |  |
| 21 ETo/CS w terminie 2                     | 0,13  | 0,04  | 0,00  | 0,10  | 0,03  | 0,07  | 0,17  | -0,13 | 0,09  | 0,04  | 0,08  | -0,05 | 0,23  | 0,20  | 0,35  | 0,37  | 0,16  | 0,14  | 0,66  | 0,60  |       |       |      |      |    |  |
| 22 RC/CSO w terminie 2                     | 0,13  | -0,04 | 0,21  | 0,28  | 0,24  | 0,33  | 0,03  | -0,14 | 0,10  | 0,10  | 0,11  | -0,05 | 0,20  | 0,26  | 0,34  | 0,46  | 0,35  | -0,02 | 0,61  | 0,47  | 0,72  |       |      |      |    |  |
| 23 łączna masa pędów                       | 0,10  | 0,10  | 0,11  | 0,08  | 0,10  | 0,18  | 0,01  | -0,26 | 0,17  | 0,04  | 0,14  | 0,07  | -0,13 | -0,07 | -0,13 | -0,10 | -0,10 | -0,03 | 0,10  | 0,13  | 0,18  | 0,01  |      |      |    |  |
| 24 łączna liczba ziarniaków                | 0,24  | -0,10 | 0,10  | 0,12  | 0,11  | 0,07  | 0,48  | -0,34 | 0,32  | 0,29  | 0,32  | 0,13  | 0,23  | -0,21 | 0,09  | -0,14 | 0,11  | 0,02  | -0,15 | -0,07 | -0,07 | -0,10 | 0,44 |      |    |  |
| 25 łączna masa ziarniaków                  | 0,21  | -0,07 | 0,12  | 0,11  | 0,12  | 0,06  | 0,41  | -0,39 | 0,35  | 0,31  | 0,35  | 0,12  | 0,23  | -0,22 | 0,11  | -0,16 | 0,10  | 0,05  | -0,15 | -0,01 | -0,03 | -0,12 | 0,51 | 0,95 |    |  |

Korelacja:      ujemna                      dodatnia  
 p<sub>value</sub> =      0,01   0,05                      0,05   0,01





Rycina 26. Heatmapa przedstawiająca graficznie tabelę korelacji doświadczenia tunelowego (1 – zawartość cukrów w terminie 1, 2 – zawartość fenoli w terminie 1, 3 – zawartość chlorofilu *a* w terminie 1, 4 – zawartość chlorofilu *b* w terminie 1, 5 – zawartość chlorofilu *a* i *b* w terminie 1, 6 – zawartość karotenoidów w terminie 1, 7 – zawartość cukrów w terminie 2, 8 – zawartość fenoli w terminie 2, 9 – zawartość chlorofilu *a* w terminie 2, 10 – zawartość chlorofilu *b* w terminie 2, 11 – zawartość chlorofilu *a* i *b* w terminie 2, 12 – zawartość karotenoidów w terminie 2, 13 – Fv/Fm w terminie 1, 14 – Area w terminie 1, 15 – PI w terminie 1, 16 – ETo/CS w terminie 1, 17 – RC/CS<sub>o</sub> w terminie 1, 18 – Fv/Fm w terminie 2, 19 – Area w terminie 2, 20 – PI w terminie 2, 21 – ETo/CS w terminie 2, 22 – RC/CS<sub>o</sub> w terminie 2, 23 – łączna masa pędów, 24 – łączna liczba ziarniaków, 25 – łączna masa ziarniaków)



## 7. DYSKUSJA

Zjawisko introgresji materiału genetycznego formy zapylającej do genomu rośliny zapylanej w trakcie krzyżowania oddalonego zostało opisane u wielu gatunków. Włączanym materiałem mogą być całe chromosomy lub tylko ich fragmenty. W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono introgresję materiału genetycznego kukurydzy u 15 spośród 120 przebadanych podwojonych haploidów owsa, czyli 12,5% z nich stanowiły linie OMA. W oparciu o reakcje SSR-PCR stwierdzono introgresję od 0 do 4 chromosomów kukurydzy, czyli w niektórych przypadkach włączone zostały jedynie fragmenty chromosomów.

W przypadku krzyżowania oddalonego owsa z kukurydzą część chromosomów rośliny stanowiącej donor pyłku nie jest eliminowana w embriogenezie, w trakcie podziałów mitotycznych zachowują się tak jak chromosomy owsa i zostają na stałe włączone do genomu nowopowstałych mieszańców. Linie OMA (ang. *oat × maize addition lines*) mogą stanowić potencjalnie przydatne genotypy w hodowli roślin. Są także pomocne w mapowaniu genomu kukurydzy (Okagaki i in. 2001). Również w przypadku zapylenia owsa prosem obserwuje się duży udział trwałych mieszańców w pokoleniu potomnym. W obserwowanych po 7 dniach od zapylenia komórkach stwierdzono obecność chromosomów prosa u wszystkich, a u 91,5% zaobserwowano 7 z 8 chromosomów tej rośliny. U pozostałych stwierdzono obecność 5 lub 6 chromosomów, co jest efektem nondysjunkcji. W tych samych badaniach zapylano (również prosem) różne gatunki pszenic (*T. aestivum*, *T. spelta*, *T. durum*, *T. monococcum*), a także pszenżyto czy żyto. Ilość komórek z chromosomami prosa wynosiła tylko od 0 do 3,6% (Ishii i in. 2010). Pomimo tego, że zarówno kukurydza, jak i proso należą do tej samej podrodziny prosowatych efekty zapylenia ich pyłkiem roślin owsa daje różne efekty. Bardziej stabilne od chromosomów kukurydzy u nowopowstałych mieszańców są te pochodzące od prosa, ale mimo to obce chromosomy mogą obniżać żywotność tych roślin i szansę przejścia do fazy generatywnej czy potem wytworzenia nasion (Riera-Lizarazu i in. 1996; Rines i in. 2009; Ishii i in. 2013).

Całkowitą eliminację chromosomów formy zapylającej zaobserwowano u pszenicy krzyżowanej z jęczmieniem *Hordeum bulbosum*, kukurydzą *Zea mays*, prosem *Pennisetum glaucum* czy sorgo *Sorghum bicolor* (Kasha i Kao 1970; Inagaki i Mujeeb-Kazi 1995). Eliminacja materiału genetycznego następuje na różnych etapach po zapłodnieniu. W przypadku chromosomów *Hordeum bulbosum* były one eliminowane na etapie pierwszych podziałów mitotycznych nowopowstałej zygoty. Nieprawidłowości następowały w anafazie

i telofazie (Zenkteler i Straub 1979). Jeśli rośliną zapylającą była kukurydza jej chromosomy w trakcie metafazy układały się w płaszczyźnie równikowej, ale na skutek nieprzyłączenia się włókien wrzeciona kariokinetycznego do centromerów nie dostawały się one do komórek potomnych zygoty (Mochida i in. 2004). Podczas krzyżowania pszenicy z prosem eliminacja chromosomów formy zapylającej następowała podczas początkowych etapów embriogenezy na skutek nieprawidłowego przebiegu kondensacji chromatyny, tworzenia się mikrojąder czy fragmentacji chromosomów, co było efektem wielu nieprawidłowości w przebiegu podziałów mitotycznych (Gernand i in. 2005).

Mechanizm przetrwania chromosomów ojcowskich u powstałych mieszańców związany jest z zachowaniem chromosomów w trakcie anafazy pierwszych podziałów mitotycznych. Opisano specyficzny dla centromeru histon H3 (CENH3), który jest odpowiedzialny za przyłączanie włókien wrzeciona kariokinetycznego i właściwe rozejście się chromatyd do komórek potomnych. W komórkach mieszańców skład CENH3 jest inny niż w komórkach matecznych przed zapłodnieniem. Wyjątkowo duże podobieństwo regionów genu kodującego histon H3 u owsa i prosa sprzyja utrzymaniu chromosomów formy zapylającej podczas embriogenezy. Podobne analogie występują u chromosomów włączanych trwale do genomu mieszańców owsa z kukurydzą. Nie występuje to jednak u większości chromosomów jak w przypadku prosa, a jedynie u kilku różnych chromosomów. Skuteczność wytwarzania haploidów jęczmienia metodą krzyżowania oddalonego *Hordeum vulgare* z *Hordeum bulbosum* również opiera się na utracie białka CENH3 w trakcie mitozy, które nie utrzymuje się w niestabilnych mieszańcach (Sanei i in. 2011; Ishii i in. 2015).

Mieszańce owsa z kukurydzą w większości przypadków prezentują pokrój owsa, ale wiele genów zawartych na dodanych chromosomach kukurydzy ulega ekspresji, co może mieć przełożenie na fenotyp mieszańców. Owies jest rośliną, która przeprowadza fotosyntezę typu C3, który to typ wiąże się z istotnym występowaniem zjawiska fotooddychania, które w obecnych warunkach atmosferycznych ogranicza potencjał roślin o 40% (Matsuoka i in. 2001). W warunkach stresowych wartości te wzrastają. U roślin przeprowadzających fotosyntezę typu C4 fotooddychanie jest mocno ograniczone dzięki zwiększaniu stężenia dwutlenku węgla w pochwach okołowiązkowych. Przewaga roślin C4 nad C3 ujawnia się szczególnie w warunkach wysokich temperatur. Ponadto dzięki mechanizmowi koncentracji dwutlenku węgla możliwa jest szybka asymilacja także w warunkach suszy dzięki mniejszemu zapotrzebowaniu na wodę. Kukurydza jest rośliną przeprowadzającą fotosyntezę typu C4. Charakteryzuje się współczynnikiem transpiracji na poziomie 350, natomiast u owsa wartość

ta wynosi ponad 600. Udowodniono, że u linii OMA, które posiadają dodatkowe chromosomy kukurydzy obserwowana jest aktywność enzymów karboksylazy fosfoenolopirogronianowej PEPC i dikinazy ortofosforanowej pirogronianu PPDK występujących jedynie u roślin przeprowadzających fotosyntezę typu C4. Aktywność PPDK występowała, gdy w genomie linii OMA obecny był chromosom nr 6 kukurydzy i była równa aktywności tego enzymu u kukurydzy. Aktywność PEPC u linii OMA wzrastała jeszcze bardziej, gdy w ich genomie występował oprócz chromosomu nr 6 również nr 9, ale aktywność ta nie dorównywała tej obserwowanej u kukurydzy (Kowles i in. 2008).

W badaniach nad indywidualnym wpływem poszczególnych chromosomów kukurydzy w genomie mieszańców wykazano różny wpływ na ekspresję poszczególnych genów markerowych, a także na fenotyp roślin (Kynast i in. 2002). Linie OMA z potwierdzonym w testach z użyciem starterów SSR udziałem konkretnych chromosomów krzyżowano wstecznie z rodzicielską linią owsa, co skutkowało otrzymaniem monosomików. Włączenie chromosomu nr 3 objawiało się zakrzywionymi wiechami, a także bezliściastym pokrojem (Muehlbauer i in. 2000). Wpływ występowania u linii OMA chromosomu nr 6 objawiał się pojawianiem zmian na liściach przypominających objawy chorób grzybowych. Innymi występującymi różnicami w fenotypie były także: niska wysokość roślin (chromosom nr 7 i 8), wyprostowane blaszki liściowe (chromosom nr 1) czy jasnozielone blaszki liściowe i drobne nasiona (chromosom nr 4). Potwierdziło się to w badaniach własnych w przypadku linii nr 83, która w doświadczeniu osiągała zdecydowanie mniejszą wysokość, a w badaniach molekularnych stwierdzono u niej występowanie chromosomu nr 8 kukurydzy. Niektórzy autorzy zwracają uwagę również na występowanie odporności u linii OMA na charakterystyczne dla owsa patogeny wywołujące rdze, jak: *Puccinia coronata* f. sp. *avenae* czy *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* (Ohm i Shaner 1992; Kynast i in. 2002).

W przedstawionych badaniach własnych skupiono się na reakcji mieszańców owsa z kukurydzą na stres suszy glebowej. W tym celu wykonano doświadczenia i szereg pomiarów parametrów fizjologicznych i biochemicznych związanych z gospodarką wodną roślin, których celem było wykazanie różnic w badanych genotypach i wskazanie linii najbardziej odpornych. Wykonany test utraty wody w doświadczeniu własnym wykazał istotne różnice pomiędzy badanymi genotypami. Ujemne korelacje pomiędzy procentowymi wartościami utraty wody a analizowanymi elementami składowymi plonu wskazują genotypy, które lepiej radzą sobie w warunkach stresu suszy. Jeśli utrata wody jest niższa plon w warunkach stresu suszy jest wyższy. Na tej podstawie można wytypować genotypy potencjalnie wartościowe dla hodowli

rekombinacyjnej ukierunkowanej na kreowanie odmian tolerancyjnych na stres suszy. Istotne różnice w wartościach parametrów ELWL pomiędzy różnymi genotypami stwierdzono u wielu gatunków zbóż (Munjal i Dhandu 2005; Sallam i in. 2019). Różne rośliny uprawne, a w ich obrębie różne genotypy, dla których stwierdzono niskie wartości parametrów ELWL, w czasie suszy mają większą zdolność do zachowania równowagi wodnej w liściach, za co w dużym stopniu odpowiedzialne w roślinie są także cukry rozpuszczalne. Kombinacja niskiej utraty wody oraz wysokiej zawartości cukrów rozpuszczalnych pozwala zachować równowagę wodną w czasie stresów i zapewnia takim genotypom tolerancję na stres suszy, a tym samym wyższą stabilizację plonów (Sallam i in. 2019). W doświadczeniu własnym linia nr 23 odznaczała się najmniejszą utratą wody spośród wszystkich genotypów i charakteryzowała się ponadto najwyższymi zawartościami cukrów rozpuszczalnych, szczególnie na tle innych genotypów poddanych stresowi suszy.

Zawartość cukrów rozpuszczalnych w roślinach owsa w doświadczeniach własnych rosła na skutek suszy glebowej. Zawartości te były jednak istotnie różne pomiędzy poszczególnymi genotypami. Wykazało to zarówno doświadczenie szklarniowe, jak i tunelowe. W trakcie długotrwałe utrzymujących się warunków suszy zawartość cukrów rozpuszczalnych spadała (porównanie pierwszego i czternastego dnia suszy), ale nadal była wyższa u roślin poddanych suszy niż u obiektów kontrolnych. Ponadto w doświadczeniu szklarniowym stwierdzono istotną korelację dodatnią zawartości cukrów rozpuszczalnych z analizowanymi elementami składowymi plonu. Akumulację cukrów rozpuszczalnych w roślinach stwierdzono u wielu gatunków jako reakcję na stres suszy np. u kukurydzy, owsa, rzepaku czy ryżu, u którego dodatkowo badano reakcję na stres zasolenia (Mohammadkhani i Heidari 2008; Redillas i in. 2011; Rezayian i in. 2018). Korzystny wpływ cukrów rozpuszczalnych w trakcie utrzymujących się niedoborów wody w dużym stopniu przejawiał się poprzez regulację ciśnienia osmotycznego roślin, co zapobiega istotnym spadkom turgoru. W doświadczeniu szklarniowym z 9 odmianami kukurydzy zbadano wpływ interwałów podlewania na zawartość cukrów rozpuszczalnych. U obiektów kontrolnych podlewano wszystkie obiekty co drugi dzień, natomiast warunki niedoboru wody indukowano na dwóch poziomach: podlewając tylko co 8 lub 12 dni. Na skutek indukowanych warunków stwierdzono znaczące wzrosty zawartości cukrów rozpuszczalnych w liściach kukurydzy wynoszące, w zależności od genotypu, wielokrotność od kilku do kilkuset razy w porównaniu do wartości u obiektów kontrolnych (Sinay i Karuwal 2014).

Zawartość związków fenolowych to kolejny z badanych parametrów mający wskazać genotypy tolerancyjne na stres suszy. W trakcie trwania doświadczenia szklarniowego i tunelowego wzrastała ona zarówno u obiektów kontrolnych, jak i tych w suszy. W większości przypadków wartości na skutek stresu były wyższe. W obu doświadczeniach (szklarniowym i tunelowym) i obu terminach (pierwszym i czternastym dniu suszy) istotny wpływ na zawartość związków fenolowych miał genotyp, co wskazuje na różną reakcję badanych linii OMA na niedobór wody. W doświadczeniach nad stresem suszy u pszenżyta jarego stwierdzono wzrost zawartości związków fenolowych, a parametr ten uznano za przydatny w selekcyonowaniu genotypów ze względu na odporność na suszę (Hura i in. 2014). U ziemniaka także zaobserwowano zwiększone zawartości związków fenolowych na skutek suszy, w trakcie której analizowane wtórne metabolity odpowiedzialne były za dobrą ogólną kondycję roślin (André i in. 2009). Pozytywny wpływ związków fenolowych jako przeciwutleniaczy wspierających rośliny w walce z reaktywnymi formami tlenu, których ilości w trakcie stresów wzrastają, wykazano także u innych gatunków takich, jak rzepak czy ziemniak (André i in. 2009; Rezayian i in. 2018).

Kolejnych źródeł sukcesu w radzeniu sobie ze stresem suszy u linii OMA szukano w przebiegu procesu fotosyntezy i zawartościach, kluczowych dla jej prawidłowego przebiegu, barwników fotosyntetycznych. Jednym z kluczowych substratów dla prawidłowego przebiegu fotosyntezy jest woda, ponieważ jej niedobory wpływają między innymi na mniejszą koncentrację dwutlenku węgla dostępnego dla celów fotosyntezy. Energię dla tego procesu zapewnia światło słoneczne, które w postaci kwantów jest wychwytywane przez barwniki fotosyntetyczne, głównie chlorofil *a* i *b* (Li i in. 2006).

W warunkach stresowych prawidłowy przebieg procesu fotosyntezy bywa zakłócony. Długotrwale utrzymujące się warunki niedoboru wody prowadzą do obniżenia się zawartości chlorofili w liściach, co uwidacznia się w postaci chlorozy (Chaves i in. 2009). Naturalnie niższa zawartość chlorofili występuje u starszych roślin podczas końcowych faz rozwojowych, kiedy proces fotosyntezy zachodzi z mniejszą intensywnością i następuje zamieranie roślin. Zawartość chlorofilu *a* i *b* jest więc wyznacznikiem kondycji rośliny w warunkach stresu suszy (Vijayalakshmi i in. 2010). Zbadano, że genotypy kukurydzy z wyższą ogólną zawartością chlorofilu wykształciły większy plon w warunkach suszy od genotypów z naturalnie niższą jego zawartością (Gholamin i Khayatnezhad 2020). Oprócz barwników podstawowych w roślinach występują barwniki dodatkowe, które umożliwiają bezpieczne i bezproblemowe przeprowadzenie procesu fotosyntezy. Funkcje takie pełnią karotenoidy, których wyższa

zawartość świadczy o przygotowaniu roślin do radzenia sobie z pojawiającymi się w czasie stresu reaktywnymi formami tlenu. Zwiększona zawartość karotenoidów może być jednym ze sposobów roślin zwiększających ich tolerancję na stres suszy (Jaleel i in. 2009).

Występowanie warunków suszy związane jest z pojawieniem się wielu związków pełniących zarówno funkcje sygnałowe, jak i wywołujących destrukcyjny wpływ na funkcjonowanie całej rośliny. Związkami takimi są np. różne reaktywne formy tlenu. Wywołują one między innymi ekspresję wielu genów wpływających na reakcję całej rośliny (Rao i Chaitanya 2016). Zmiany zawartości chlorofilu, uszkodzenia aparatu fotosyntetycznego czy zmiany w składzie barwników fotosyntetycznych na skutek stresu suszy obserwowane są u wielu gatunków roślin (Jaleel i in. 2009; Kannan i Kulandaivelu 2011). Wykazano także np. 15% spadek zawartości chlorofilu u pszenicy rosnącej w warunkach stresu suszy względem warunków odpowiedniego zaopatrzenia w wodę (Pour-Aboughadareh i in. 2017). Redukcję zawartości chlorofilu na skutek stresu suszy stwierdzono także u takich gatunków jak: burak cukrowy, marchew, rzepak, ogórek, arbuż, orzech ziemny, soja, jęczmień, pszenica, sorgo czy trzcina cukrowa (Monteoliva i in. 2021).

W przeprowadzonych doświadczeniach własnych wykazano istotny wpływ traktowania roślin (kontrola i kombinacja z suszą) i genotypu na zawartości chlorofilu *a* i *b* oraz karotenoidów. Istotne różnice w zawartości chlorofili pomiędzy obiektami kontrolnymi a poddanymi suszy glebowej w przeprowadzonych doświadczeniach widoczne były już w pierwszym dniu suszy, a w czternasty dzień jeszcze mocniej się przejawiały. Różnice można było zaobserwować także w barwie liści za sprawą występujących chloroz, za co właśnie odpowiada w największym stopniu niższa zawartość chlorofili. Kryterium to można użyć w poszukiwaniu odporności bądź tolerancji na ten stresor dla nowych odmian. Z kolei na zawartość karotenoidów istotny wpływ miał genotyp oraz traktowanie z wyjątkiem czternastego dnia suszy w doświadczeniu tunelowym, kiedy to nie wykazano różnic pomiędzy roślinami kontrolnymi a poddanymi suszy. W doświadczeniu szklarniowym zawartość karotenoidów była istotnie niższa u roślin w stresie suszy w obu terminach. Wyższa zawartość chlorofili w trakcie wegetacji ma przełożenie na wyższy plon, co wykazały badania np. w kukurydzy (Gholamin i Khayatnezhad 2020). Poszukiwanie źródeł odporności na stres badając zawartość chlorofilu okazało się skuteczne w badaniach nad różnymi odmianami pszenicy, jęczmienia, ryżu czy roślin z rodziny psiankowatych *Solanaceae* (Li i in. 2006; Jaleel i in. 2009; Nikolaeva i in. 2010; Kannan i Kulandaivelu 2011).

Kondycja aparatu fotosyntetycznego w warunkach stresowych może być badana przy użyciu różnego rodzaju wskaźników (Juzoń i in. 2020). Szczególnie przydatne jest mierzenie fluorescencji chlorofilu *a*, która zmienia się w trakcie nie tylko uszkodzenia aparatu fotosyntetycznego, ale również podczas jego adaptacji do nowych warunków (Maxwell i Johnson 2000). Funkcjonowanie fotosystemu PSII jest najbardziej czułym wskaźnikiem występowania czynników stresowych w trakcie wegetacji roślin (Lang i in. 1996). Istotne różnice pomiędzy badanymi w doświadczeniu szklarniowym i tunelowym liniami wystąpiły w przypadku wszystkich analizowanych parametrów fluorescencji chlorofilu tj. maksymalnej wydajności kwantowej PSII (Fv/Fm), wielkości pola akceptorów transportu elektronów z PSII (Area), wskaźnika funkcjonowania PSII (PI), tempa transportu elektronów w przeliczeniu na CS (ETo/CS) czy parametru charakteryzującego zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (RC/CSo).

Badania pszenicy w warunkach stresu suszy wykazały o 28% wyższą fluorescencję w porównaniu do kontrolnych warunków z właściwym zaopatrzeniem w wodę (Pour-Aboughadareh i in. 2017). Zmiany parametrów fluorescencji chlorofilu obserwuje się także podczas stresów biotycznych. U linii DH jęczmienia inokulowanych zarodnikami *Fusarium culmorum* stwierdzono spadek aktywnych centrów reakcji u testowanych linii nieoplewionych, podczas gdy zmiany w parametrach fluorescencji chlorofilu u oplewionych linii były nieistotne (Warzecha i in. 2019). Reakcje na czynniki biotyczne obserwowano również u pszenicy infekowanej *Fusarium avenaceum* i *Fusarium culmorum*, gdzie aktywność fotosystemu PSII istotnie zmalała (Ajigboye i in. 2016).

Fv/Fm przyjmuje niższe wartości bardzo szybko po pojawieniu się czynnika stresowego, lecz już po kilku dniach jego wartości wracają do normy. Zależności te stwierdzono w badaniach nad wieloma gatunkami roślin w różnorodnych warunkach (Larsson i in. 1998). Poznanie wartości tego współczynnika może szybko dać pierwszą informację o wystąpieniu danego stresora (Björkman i Demmig 1987). Zarówno w doświadczeniu szklarniowym, jak i tunelowym stwierdzono istotny spadek wartości Fv/Fm w pierwszym dniu suszy, natomiast w czternastym dniu istotne różnice nie wystąpiły, a zmierzone wtedy wartości tworzyły jedną grupę średnich razem z wartościami obiektów kontrolnych w pierwszym dniu suszy glebowej (K1, K2, S2). W innych badaniach nad jęczmieniem stwierdzono wyższe wartości Fv/Fm oraz wyższą zawartość chlorofilu w trakcie suszy u genotypów bardziej odpornych na ten stres, co pozwala na uznanie tych wskaźników jako wiarygodnych indykatorów odporności na suszę (Li i in. 2006).

Powierzchnia nad krzywą indukcji fluorescencji chlorofilu *a* jest wprost proporcjonalna do ilości puli akceptorów elektronów w fotosystemie PSII. Podczas stresu wartość parametru Area ulega zmniejszeniu, gdy dochodzi do zablokowania transportu elektronów do plastochinonów z centrów reakcji. Jest to oznaka występowania zaburzeń w przebiegu fazy ciemnej fotosyntezy. W doświadczeniu szklarniowym duży spadek wartości Area obserwowano już w pierwszym dniu suszy i różnice te utrzymały się do dnia czternastego, natomiast w doświadczeniu tunelowym w pierwszym dniu suszy istotne różnice nie wystąpiły, ale pojawiły się w czternastym dniu suszy, gdy jej negatywne konsekwencje utrzymywały się dłuży czas. W badaniach nad łubinem i grochem stwierdzono spadek wartości Area już w pierwszym dniu suszy u łubinu, podczas gdy u grochu istotny spadek zaobserwowano dopiero w czternastym dniu. W badaniach tych uznano parametry Fv/Fm, Area oraz PI za odpowiednie do przedstawienia zmian w funkcjonowaniu aparatu fotosyntetycznego w warunkach suszy (Juzoń i in. 2019).

Wartości wskaźnika PI również związane są z funkcjonowaniem fotosystemu PSII. Jego wyższe wartości stwierdzono w warunkach dobrego zaopatrzenia roślin w wodę (van Heerden i in. 2007). W doświadczeniu szklarniowym wartości PI były niższe u obiektów w suszy zarówno w pierwszym, jak i czternastym dniu suszy, natomiast w doświadczeniu tunelowym prawidłowości takie stwierdzono tylko w pierwszym dniu. W dniu czternastym zaobserwowano spadki u obiektów w suszy w porównaniu do kontroli, ale różnice nie były istotne statystycznie. Badania Juzoń i in. (2019) dotyczące parametrów fluorescencji chlorofilu roślin strączkowych poddanych suszy również wykazały spadek wartości PI na skutek suszy u grochu przy braku istotnych różnic w kształtowaniu się parametru PI u łubinu żółtego. W badaniach nad kukurydzą uprawianą w różnych rejonach świata wartości Fv/Fm, jak i PI były znacząco obniżone w roślinach poddanych stresowi suszy. Występujące różnice pomiędzy poszczególnymi liniami, jak i rejonami uprawy pozwalają na wyselekcjonowanie najbardziej odpornych na stres suszy genotypów w danych warunkach (Badr i Brüggemann 2020).

Wskaźnik transportu elektronów przez centra reakcji na skutek stresów również może ulegać zmianie. W doświadczeniu szklarniowym obiekty w suszy wykazały niższe wartości ETo/CS zarówno w pierwszym, jak i czternastym dniu suszy. Z kolei w doświadczeniu tunelowym wartości tego wskaźnika na skutek suszy nie zmieniały się istotnie, ale zaobserwowano spadek jego wartości w czternastym dniu względem dnia pierwszego. W badaniach nad łubinem i grochem nie wykazano jednoznacznych zmian w wartościach ETo/CS i nie uznano go za dobry wskaźnik stresu (Juzoń i in. 2019). Z kolei w badaniach nad



słonecznikiem oraz wiśnią parametr ETo/CS wykazywał zmiany w wartościach zarówno w przypadku stresu niedoboru, jak i nadmiaru wody (Çiçek i in. 2019; Lee i in. 2022).

Wartości parametru charakteryzującego zagęszczenie centrów reakcji w jednostce powierzchni liścia (RC/CS<sub>0</sub>) w doświadczeniu szklarniowym w pierwszym dniu suszy nie różniły się istotnie pomiędzy obiektami kontrolnymi i poddanymi suszy glebowej. Istotne różnice stwierdzono dopiero w czternastym dniu suszy, a polegały one na wzroście wartości tego wskaźnika w kombinacji kontrolnej w stosunku do pierwszego dnia analiz oraz jego spadku u linii OMA w kombinacji z suszą. Z kolei w doświadczeniu tunelowym różnice pomiędzy obiektami w suszy i kontrolnymi wystąpiły zarówno w pierwszym, jak i czternastym dniu suszy, przy czym w pierwszym dniu wartości były istotnie niższe. Inne badania wykazały spadek wartości RC/CS<sub>0</sub> u sadzonek ryżu poddanego warunkom stresu suszy (Sen i Puthur 2021). Zmiany w parametrach fluorescencji chlorofilu zachodzą także pod wpływem stresów biotycznych. U jęczmienia inokulowanego *Fusarium culmorum* stwierdzono spadek parametrów Fv/Fm, PI czy RC/CS<sub>0</sub> na skutek infekcji patogenem (Warzecha i in. 2015; Warzecha i in. 2019).

Ostatnimi analizowanymi parametrami były wybrane elementy plonu oraz biomasa nadziemna. Wystąpienie dwutygodniowego okresu suszy w trakcie trwania wegetacji mieszańców owsa z kukurydzą miało wpływ na wytworzoną łączną suchą masę części nadziemnych, a także na liczbę i masę ziarniaków. Istotny wpływ na występujące różnice miał genotyp, traktowanie oraz ich interakcja. Średni spadek wytworzonej łącznej masy nadziemnej wyniósł w doświadczeniu szklarniowym 43%, a w doświadczeniu tunelowym 30%. U najbardziej podatnych genotypów spadek sięgał 75%, a u tolerancyjnych różnice nie były istotne statystycznie. W doświadczeniach stwierdzono także znaczną redukcję liczby i masy ziarniaków.

Spośród wszystkich analizowanych linii najwyższe wartości elementów składowych plonu osiągały linie nr 9 i 78b, szczególnie w przypadku liczby i masy ziarniaków. Łączna wytworzona biomasa części nadziemnych u tych linii na skutek suszy spadała, ale były to jedne z najmniejszych procentowych spadków tych wartości. Linie te jako jedyne spośród 14 analizowanych linii OMA osiągały wyższe lub zbliżone wartości do odmiany Bingo w kontroli, a nawet przewyższały ją w warunkach suszy w doświadczeniu szklarniowym i tunelowym. Żaden z genotypów nie osiągnął wyższej liczby i masy ziarniaków w stresie suszy

niż linie nr 9 i 78b. Jedynie u niektórych elementów plonu zbliżone wartości osiągnęła odmiana Bingo.

W badaniach nad liniami DH owsa stwierdzono występowanie korelacji pomiędzy plonem biomasy a innymi zmierzonymi wartościami jak np. parametrami fluorescencji chlorofilu (Noga i in. 2017). Badania prowadzone u pszenicy wykazały niższe wartości biomasy u roślin rosnących w warunkach suszowych w porównaniu do kontroli z dostatecznym dostępem do wody. Spadki wytworzonego plonu wyniosły 59% dla świeżej masy oraz 51% dla suchej masy (Pour-Aboughadareh i in. 2017). W innych badaniach nad stresem suszy u jęczmienia stwierdzono znaczący spadek liczby ziarniaków, a także ich masy na skutek suszy zarówno w przypadku indukcji łagodnej, jak i silnej suszy. Na skutek suszy skrócił się okres nalewania ziarna aż o  $\frac{1}{3}$  w przypadku silnego stresu suszy. Nalewanie ziarna zakończyło się szybciej, co przełożyło się na skrócenie okresu wegetacji i doprowadziło do sytuacji, w której po 17 dniach od początku tej fazy średnia waga jednego ziarniaka była wyższa u roślin poddanych stresowi suszy niż u obiektów kontrolnych. Nalewanie ziarna u obiektów kontrolnych po 17 dniach od początku tej fazy trwało nadal, więc zdecydowanie wyższe od obiektów w suszy masy ziarniaków zostały osiągnięte dopiero po zakończeniu wegetacji w suszy (Samarach 2005). W doświadczeniu własnym także zaobserwowano szybsze dojrzewanie i zamieranie roślin poddanych stresowi suszy.

Dla wszystkich badanych parametrów w suszy w doświadczeniu szklarniowym i tunelowym wykonano analizy korelacji, które wykazały istnienie wielu istotnych zależności, także pomiędzy elementami plonu i biomasy nadziemnej. W doświadczeniu tunelowym wykazano istnienie korelacji dodatnich pomiędzy zawartością chlorofilu w czternastym dniu suszy a liczbą i masą ziarniaków. Takie zależności zostały potwierdzone u wielu roślin. U kukurydzy wykazano największą odporność na suszę przejawiającą się najwyższym plonowaniem u genotypów z największą zawartością chlorofilu, która mogła wynosić nawet 1,2 średniej zawartości chlorofilu badanych genotypów (Gholamin i Khayatnezhad 2020). Dodatkowo korelacje pomiędzy zawartością chlorofilu a plonem stwierdzono także u ciecierzycy *Cicer arietinum* (współczynnik korelacji = 0,33), orzecha ziemnego *Arachis hypogaea* (0,43), soczewicy *Lens culinaris ssp. culinaris Medikus* (0,30), jęczmienia *Hordeum vulgare* (0,67), pszenicy zwyczajnej *Triticum aestivum* (0,84) i twardej *Triticum durum* (0,39), sorga *Sorgum bicolor* (0,64) czy trzciny cukrowej *Saccharum spp.* (0,36) (Monteoliva i in. 2021). W doświadczeniu szklarniowym korelacje tego typu nie wystąpiły, ale stwierdzono większą produkcję biomasy oraz wyższą liczbę i masę ziarniaków przy wyższych zawartościach cukrów

rozpuszczalnych w pierwszym dniu suszy czy wyższych zawartościach związków fenolowych w czternastym dniu suszy.

Podsumowując, analiza wyników doświadczenia szklarniowego i tunelowego pozwala na stwierdzenie przydatności użytych metod bezpośrednich i pośrednich do oceny odporności roślin na stres suszy glebowej. Przydatność tego typu metod znalazła również potwierdzenie np. w badaniach nad burakiem cukrowym (Ober i in. 2005).

## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Wśród 120 badanych linii owsa powstałych na drodze krzyżowania oddalonego z kukurydzą potwierdzono obecność 105 linii podwojonych haploidów (DH) oraz 15 mieszańców owsa z kukurydzą (linii OMA), co stanowi 12,5% wszystkich linii.
2. Zaobserwowano zróżnicowany poziom introgresji materiału genetycznego kukurydzy do genomu owsa: od fragmentów chromatyny do całych chromosomów.
3. W przypadku dwóch linii OMA nie wykryto obecności chromosomów, ale wystąpiły produkty markerowe dla fragmentów retrotraspozonu Grande 1, co świadczy o włączeniu chromatyny kukurydzy bez markerowych sekwencji mikrosatelitarnych. Pozostałe linie posiadały 1, 2, 3 lub 4 całe chromosomy kukurydzy.
4. Zastosowanie analizy SSR-PCR pozwoliło na stwierdzenie, że u badanych linii OMA najczęściej występował chromosom nr 10 (u 5 linii), a najrzadziej chromosom nr 1 (u 1 linii).
5. Analiza wariancji wykazała istotny wpływ suszy glebowej na kształtowanie się 8 parametrów biochemicznych i parametrów fluorescencji chlorofilu *a* w pierwszym dniu suszy glebowej spośród 11 analizowanych zarówno w doświadczeniu szklarniowym, jak i tunelowym. W czternastym dniu suszy glebowej odnotowano istotny wpływ stresu na wszystkie 11 analizowanych parametrów w doświadczeniu szklarniowym oraz 7 parametrów w doświadczeniu tunelowym spośród 11 badanych. Susza w obu eksperymentach spowodowała również istotne obniżenie biomasy nadziemnej roślin i wybranych elementów plonu.
6. Genotyp testowanych roślin miał istotny wpływ na kształtowanie się wszystkich analizowanych wartości testu utraty wody, parametrów biochemicznych i fluorescencji chlorofilu *a* oraz wybranych elementów składowych plonu w reakcji na stres suszy.
7. Stres suszy glebowej spowodował obniżenie większości parametrów biochemicznych i parametrów fluorescencji chlorofilu *a* już w pierwszym dniu suszy i nasilił się w czternastym dniu suszy z wyjątkiem większej zawartości cukrów rozpuszczalnych u roślin poddanych suszy w porównaniu z roślinami kontrolnymi oraz porównywalnej dla obydwu traktowań maksymalnej wydajności kwantowej PSII w czternastym dniu suszy.
8. W całym doświadczeniu najbardziej wyróżniały się linie nr 9 i 78b, które osiągały jako jedyne spośród analizowanych genotypów wyższe wartości badanych elementów

- składowych plonu od odmiany Bingo zarówno w kontroli, jak i w warunkach suszy glebowej.
9. Analiza korelacji wykazała silne relacje pomiędzy analizowanymi parametrami zarówno dodatnie, jak i ujemne.
  10. Na uwagę zasługuje wynik korelacji dla linii OMA nr 9, gdzie wysokie wartości plonu związane były z małą utratą wody z liści wykazaną w teście ELWL. Wszystkie 3 wartości ELWL klasyfikowały linię nr 9 wśród 3 genotypów o najniższej utracie wody, z czego można wyciągnąć wnioski o większej tolerancji tego genotypu na stres suszy.
  11. Na uwagę zasługuje także strategia budowania plonu u linii OMA nr 78b, która w warunkach kontrolnych osiągała wysokie wartości wszystkich elementów składowych plonu, a w warunkach suszy redukowała łączną masę pędów nadal wykształcając wysoką liczbę i masę ziarniaków.
  12. Linie OMA nr 9 i 78b należy uznać za najlepiej predestynowane do dalszych prac hodowlanych nad odpornością owsa na stres suszy glebowej. Ponadto u obu tych linii stwierdzono wysokie zawartości związków fenolowych, skorelowane z wysokim plonem ziarniaków w warunkach suszy. Parametr ten może służyć jako biochemiczny wskaźnik tolerancji owsa na suszę.

## 9. SPIS LITERATURY

Adamski T., Surma M., Ponitka A., Ślusarkiewicz-Jazina A., Krystkowiak K., Kuczyńska A., Pudelska H., Rubrycki K., Trzeciak R., Woźna J. 2009. Efektywność uzyskiwania haploidów pszenicy metodą kultur pylnikowych oraz krzyżowania z kukurydzą. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 252: 73-80.

Adamus A. 2009. Mutacje. [W:] *Hodowla roślin z elementami genetyki i biotechnologii*. Red. B. Michalik. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań, ss. 56-58.

Ajigboye, O., Bousquet L., Murchie E., Ray R. 2016. Chlorophyll fluorescence parameters allow the rapid detection and differentiation of plant responses in three different wheat pathosystems. *Functional Plant Biology*, 43: 356-369.

Ananiev E., Phillips R., Rines R. 1998. Complex structure of knob DNA on maize chromosome 9: Retrotransposon invasion into heterochromatin. *Genetics*, 149: 2025-2037.

André C., Schafleitner R., Guignard C., Oufir M., Aliaga C., Nomberto G., Hoffmann L., Hausman JF., Evers D., Larondelle Y. 2009. Modification of the health-promoting value of potato tubers field grown under drought stress: emphasis on dietary antioxidant and glycoalkaloid contents in five native Andean cultivars (*Solanum tuberosum* L.), *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57: 599-609.

André C., Schafleitner R., Legay S., Lefèvre I., Aliaga C., Nomberto G., Hoffmann L., Hausman JF., Larondelle Y., Evers D. 2009. Gene expression changes related to the production of phenolic compounds in potato tubers grown under drought stress. *Phytochemistry*, 70(9): 1107-1116.

Badr A., Brüggemann W. 2020. Comparative analysis of drought stress response of maize genotypes using chlorophyll fluorescence measurements and leaf relative water content. *Photosynthetica*, 58(SI): 638-645.

Barnabás B., Jäger K., Fehér A. 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment*, 31: 11-38.

Bennetzen J., Schrick K., Springer P., Brown W., SanMiguel P. 1994. Active maize genes are unmodified and flanked by diverse classes of modified, highly repetitive DNA. *Genome*, 37: 565-576.

- Björkman O., Demmig B. 1987. Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170: 489-504.
- Blakeslee A.F., Belling J., Farnham M.E., Bergner A. 1922. A haploid mutant in the Jimson Weed, "*Datura stramonium*". *Science*, 55(1433): 646-647.
- Boguszewska D. 2007. Wpływ niedoboru wody na zawartość wybranych składników chemicznych w bulwach ziemniaka. *ŻYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 5(54): 93-101.
- Budzyński W., Szempliński W. 2003. Rośliny zbożowe. [W:] Szczegółowa uprawa roślin. Red. Z. Jasińska i A. Kotecki. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław, ss. 237-249.
- Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych. 2021. Lista odmian rolniczych wpisanych do krajowego rejestru w Polsce. Wydawca: Centralny Ośrodek Badania Odmian Roślin Uprawnych Słupia Wielka.
- Chaves M.M., Flexas J., Pinheiro C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103: 551-560.
- Çiçek N., Pekcan V., Arslan Ö., Erdal Ş., Nalçaiyi A., Çil A., Şahin V., Kaya Y., Ekmekçi Y. 2019. Assessing drought tolerance in field-grown sunflower hybrids by chlorophyll fluorescence kinetics. *Brazilian Journal of Botany*, 42: 249-260.
- Clarke J. M., McCaig T.N. 1982. Evaluation of techniques for screening for drought resistance in wheat. *Crop Science*, 22(3): 503-506.
- Czyczyło-Mysza I., Marcińska I., Skrzypek E., Bocianowski J., Dziurka K., Rančić D., Radošević R., Pekić-Quarrie S., Dodig D., Quarrie S. 2018. Genetic analysis of water loss of excised leaves associated with drought tolerance in wheat. *PeerJ*, 6: e5063.
- Dai A. 2011. Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2: 45-65.
- Daryanto S., Wang L., Jacinthe P. 2016. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *Public Library of Science ONE*, 11(5): e0156362.
- Datta S. K. 2005. Androgenic haploids: factors controlling development and its application in crop improvement. *Current Science Association*, 89: 1870-1878.

- Doroszewski A., Jadczyzyn J., Kozyra J., Pudełko R., Stuczyński T., Mizak K., Łopatka A., Koza P., Górski T., Wróblewska E. 2012. Fundamentals of the agricultural drought monitoring system. *A Water-Environ-Rural Areas*, 12: 77-91.
- Doroszewski A., Józwicki T., Wróblewska E., Kozyra J. 2014. Susza rolnicza w Polsce w latach 1961-2010. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy.
- Drażkiewicz K. 2021. Owies zwyczajny i nagi. Plon ziarna odmian. [W:] Wstępne wyniki plonowania odmian w doświadczeniach porejestrowych. Zboża jare 2021. Red. H Bujak i M. Behnke. Wydawnictwo Centralnego Ośrodka Badania Odmian Roślin Uprawnych, Słupia Wielka.
- Drzazga T., Krajewski P., Śmiałowski T., Śmiałek E. 2011. Ocena odmian pszenicy ozimej pod względem tolerancji na suszę. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, nr 260/261: 135-143.
- Dubois M., Gilles K.A., Hamilton J.K., Roberts P.A., Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350-356.
- Dziurka K., Dziurka M., Warchoł M., Czyczyło-Mysza I., Marcińska I., Noga A., Kapłoniak K., Skrzypek E. 2019. Endogenous phytohormone profile during oat (*Avena sativa* L.) haploid embryo development. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 55: 221-229.
- Dziurka K., Dziurka M., Muszyńska E., Czyczyło-Mysza I., Warchoł M., Juzoń K., Laskoś K., Skrzypek E. 2022. Anatomical and hormonal factors determining the development of haploid and zygotic embryos of oat (*Avena sativa* L.). *Scientific Reports*, 12: 548.
- Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29: 185-212.
- Farrar J.F. 1989. Fluxes and turnover of sucrose and fructans in healthy and diseased plants. *Journal of Plant Physiology*, 134, 2: 137-140.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/%3F%23data/> (dostęp 22.03.2022).
- Gernand D., Rutten T., Varshney A., Rubtsova M., Prodanovic S., Brub C., Kumlehn J., Houben A. 2005. Uniparental chromosome elimination at mitosis and interphase in wheat and pearl millet crosses involves micronucleus formation, progressive heterochromatinization, and DNA fragmentation. *Plant Cell*, 17: 2431–2438.



- Gholamin R., Khayatnezhad M. 2020. Assessment of the correlation between chlorophyll content and drought resistance in corn cultivars (*Zea mays*). *Helix – The Scientific Explorer, Peer Reviewed Bimonthly International Journal*, 10(05): 93-97.
- Główny Urząd Statystyczny. 2021 a. Rocznik Statystyczny Rolnictwa. Publikacja dostępna na stronie internetowej <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-rolnictwa-2021,6,15.html> (dostęp 31.03.2022).
- Główny Urząd Statystyczny. 2021 b. Rolnictwo w 2020 r. Publikacja dostępna na stronie internetowej <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/rolnictwo/rolnictwo-w-2020-roku,3,17.html> (dostęp 31.02.2022).
- Góral H. 2009. Selekcja i postęp genetyczny. [W:] *Hodowla roślin z elementami genetyki i biotechnologii*. Red. B. Michalik. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań, ss. 115-122.
- Guha S., Maheshwari S. 1964. *In vitro* production of embryos from anthers of datura. *Nature* 204, 497.
- Hashimoto H., Uragami C., Cogdell R. 2016. Carotenoids and Photosynthesis. [W:] *Carotenoids in Nature. Biosynthesis, Regulation and Function*. Red. C. Stange, Springer, ss. 111-139.
- Herbers K., Meuwly P., Frommer W.B., Metraux J.P., Sonnewald U. 1996. Systemic acquired resistance mediated by the ectopic expression of invertase: possible hexose sensing in the secretory pathway. *The Plant Cell*, 8, 5: 793-803.
- Hoekstra F., Buitink J. 2001. Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Trends Plant Science*, 8: 431-438.
- Houben A., Sanei M., Pickering R. 2011. Barley doubled-haploid production by uniparental chromosome elimination. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 104: 321-327.
- Hura T., Hura K., Grzesiak M.T. 2009. The usefulness of chlorophyll fluorescence parameters in harvest prediction in 10 genotypes of winter triticale under optimal growth conditions. *Plant Biosystems*, 143: 496-503.
- Hura T., Hura K., Grzesiak S. 2014. Leaf dehydration induces different content of phenolics and ferulic acid in drought-resistant and -sensitive genotypes of spring triticale. *Verlag der Zeitschrift für Naturforschung*, 64(1-2): 85-95.

- Idziak-Helmcke D., Warzecha T., Sowa M., Warchoł M., Dziurka K., Czyczyło-Mysza I., Skrzypek E. 2020. 3-D nucleus architecture in oat × maize addition lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 21: 4280.
- Inagaki M., Mujeeb-Kazi A. 1995. Comparison of polyhaploid production frequencies in crosses of hexaploid wheat with maize, pearl millet and sorghum. *Breeding Science*, 45: 157-161.
- Ishii T., Ueda T., Tanaka H., Tsujimoto H. 2010. Chromosome elimination by wide hybridization between *Triticeae* or oat plant and pearl millet: pearl millet chromosome dynamics in hybrid embryo cells. *Chromosome Research*, 18: 821–831.
- Ishii T., Tanaka H., Eltayeb A., Tsujimoto H. 2013. Wide hybridization between oat and pearl millet belonging to different subfamilies of *Poaceae*. *Plant Reproduction*, 26: 25-32.
- Ishii T., Sunamura N., Matsumoto A., Eltayeb A., Tsujimoto H. 2015. Preferential recruitment of the maternal centromere-specific histone H3 (CENH3) in oat (*Avena sativa* L.) × pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) hybrid embryos. *Chromosome Research*, 23(4): 709-18.
- Jaleel C., Manivannan P., Wahid A., Farooq M., Somasundaram R., Panneerselvam R. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11: 100-105.
- Juzoń K., Czyczyło-Mysza I., Ostrowska A., Marcińska I., Skrzypek E. 2019. Chlorophyll fluorescence for prediction of yellow lupin (*Lupinus luteus* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) susceptibility to drought. *Photosynthetica*, 57(4): 950-959.
- Juzoń K., Idziak-Helmcke D., Rojek-Jelonek M., Warzecha T., Warchoł M., Czyczyło-Mysza I., Dziurka K., Skrzypek E. 2020. Functioning of the photosynthetic apparatus in response to drought stress in oat × maize addition lines. *International Journal of Molecular Sciences*, 21: 6958.
- Juzoń K., Warchoł M., Dziurka K., Czyczyło-Mysza I., Marcińska I., Skrzypek E. 2022. The effect of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on the production of oat (*Avena sativa* L.) doubled haploid lines through wide hybridization. *PeerJ*, 10: e12854.
- Kalaji H.M. 2011. Oddziaływanie abiotycznych czynników stresowych na fluorescencję chlorofilu w roślinach wybranych odmian jęczmienia *Hordeum vulgare* L., *Rozprawy Naukowe i Monografie. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*, nr 378.

- Kang M. 2002. Crop improvement – challenges in the twenty-first century. Food Product Press.
- Kannan N., Kulandaivelu G. 2011. Drought induced changes in physiological, biochemical and phytochemical properties of *Withania somnifera* Dun. Journal of Medicinal Plants Research, 5: 3929-3935.
- Kasha K. J., Kao K. N. 1970. High frequency haploid production in barley (*Hordeum vulgare* L.). Nature, 225: 874-876.
- Kishii M., Yamada T., Sasakuma T., Tsujimoto H. 2004. Production of wheat–*Leymus racemosus* chromosome addition lines. Theoretical and Applied Genetics, 109: 255-260.
- Kołodziej J. 2003. Wpływ opadów atmosferycznych na kształtowanie się wybranych cech ziarna owsa uprawianego w warunkach górskich. Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 229: 175-183.
- Kowles R., Walch M., Minnerath J., Bernacchi C., Stec A., Rines H., Phillips R. 2008. Expression of C4 photosynthetic enzymes in oat-maize chromosome addition lines. Maydica, 53: 69-78.
- Kumar A., Sharma S. 2006. Genetics of excised-leaf water loss and relative water Content in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Cereal Research Communications, 35(1): 43-52.
- Kuś J., Smagacz J. 1999. Ocena wartości przedplonowej owsa w płodozmianach zbożowych. Żywność, 1(18): 53-59.
- Kynast R., Riera-Lizarazu O., Vales M., Okagaki R., Maquieira S., Chen G., Ananiev E., Odland W., Russell C., Stec A., Livingston S., Zaia H., Rines H., Phillips R. 2001. A Complete set of maize individual chromosome additions to the oat genome. Plant Physiology, 125: 1216-1227.
- Kynast R., Okagaki R., Rines H., Phillips R. 2002. Maize individualized chromosome and derived radiation hybrid lines and their use in functional genomics. Functional & Integrative Genomic, 2: 60-69.
- Lafitte R. 2002. Relationship between leaf relative water content during reproductive stage water deficit and grain formation in rice. Field Crops Research, 76(2-3): 165-174.

- Lal R., Delgado J., Gulliford J., Nielsen D., Rice C., Scott Van Pelt R. 2012. Adapting agriculture to drought and extreme events. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(6): 162-166.
- Lang M., Lichtenthaler H.K., Sowinska M., Heisel F., Meier J.A. 1996. Fluorescence imaging of water and temperature stress in plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 148(5): 613-621.
- Larsson E.H., Bornman J.F., Asp H. 1998. Influence of UV-B radiation and Cd<sup>2+</sup> on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*. *Journal of Experimental Botany*, 49(323): 1031-1039.
- Lee K.C., Kweon H., Sung J.W., Kim Y., Song Y., Cha S., Koo N. 2022. Physiological response analysis for the diagnosis of drought and waterlogging damage in *Prunus yedoensis*. *Forest Science and Technology*, 18(1): ss 14-25.
- Li R., Guo P., Baum M., Grando S., Salvatore C. 2006. Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, 5(10): 751-757.
- Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11: 591-592.
- Lichtenthaler H.K., Buschmann C., Rinderle U., Schmuck G. 1986. Application of chlorophyll fluorescence in ecophysiology. *Radiation and Environmental Biophysics* 25: 297-308.
- Lobell D., Schlenker W., Costa-Roberts J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042): 616-620.
- Lugojan C., Ciulca S. 2011. Analysis of excised leaves water loss in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 15(2): 178-182.
- Łabędzki L., Leśny J. 2008. Skutki susz w rolnictwie – obecne i przewidywane w związku z globalnymi zmianami klimatycznymi. *Wiadomości melioracyjne i łąkarskie*, 1: 7-9.
- Malepszy S., Niemirowicz-Szczytt K., Przybecki Z. 1989. *Biotechnologia w genetyce i hodowli roślin*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, ss. 81-140.
- Marcińska I., Nowakowska A., Skrzypek E., Czyczyło-Mysza I. 2013. Production of double haploids in oat (*Avena sativa* L.) by pollination with maize (*Zea mays* L.). *Central European Journal of Biology*, 8: 306-313.

- Marcińska I., Czyczyło-Mysza I., Skrzypek E., Grzesiak M., Popielarska-Konieczna M., Warchoł M., Grzesiak S. 2017. Application of photochemical parameters and several indices based on phenotypical traits to assess intraspecific variation of oat (*Avena sativa* L.) tolerance to drought. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39: 153.
- Matsuoka R., Furbank R., Fukayama H., Miyao M. 2001. Molecular engineering of C4 photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 52: 297-314.
- Maxwell K., Johnson G. 2000. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345): 659-668.
- Michalik B. 2009. Zastosowanie kultur *in vitro*. [W:] Hodowla roślin z elementami genetyki i biotechnologii. Red. B. Michalik. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań, ss. 304-311.
- Mochida K., Tsujimoto H., Sasakuma T. 2004. Confocal analysis of chromosome behavior in wheat×maize zygotes. *Genome*, 47: 199-205.
- Mohammadkhani N., Heidari R. 2008. Drought-induced accumulation of soluble sugars and proline in two maize varieties. *World Applied Sciences Journal* 3(3): 448-453.
- Monfort A., Vincent C., Raz R., Puigdomenech P., Martinez-Izquierdo J. 1995. Molecular analysis of a putative transposable retroelement from the *Zea* genus with internal clusters of tandem repeats. *DNA Research*, 2: 255-261.
- Monteoliva M., Guzzo M., Posada G. 2021. Breeding for drought tolerance by monitoring chlorophyll content. *Gene Technology*, 10(3): 165.
- Muehlbauer G., Riera-Lizarazu O., Kynast R., Martin D., Phillips R., Rines H. 2000. A maize-chromosome 3 addition line of oat exhibits expression of the maize homeobox gene *liguleless3* and alterations of cell fate. *Genome*, 43: 1055-1064.
- Munjjal R., Dhanda S. 2005. Physiological evaluation of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought resistance. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 65(4): 307-308.
- Nikolaeva M., Maevskaya S., Shugaev A., Bukhov N. 2010. Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 57(1): 87-95.

- Nita Z. 2003. Współczesne osiągnięcia i perspektywy hodowli owsa w Polsce. Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 229: 13-20.
- Noga A., Skrzypek E., Warchoń M., Czyczyło-Mysza I., Dziurka K., Marcińska I., Juzoń K., Warzecha T., Sutkowska A., Nita Z., Werwińska K. 2016. Conversion of oat (*Avena sativa* L.) haploid embryos into plants in relation to embryo developmental stage and regeneration media. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 52: 590-597.
- Noga A, Warchoń M., Czyczyło-Mysza I., Marcińska I., Dziurka K. Warzecha T., Skrzypek E. 2017. Chlorophyll *a* fluorescence parameters in the evaluation of oat DH lines yield components. *Cereal Research Communications*, 45(4): 665-674.
- Nowakowska A., Skrzypek E., Marcińska I., Czyczyło-Mysza I., Dziurka K., Juzoń K., Cyganek K., Warchoń M. 2015. Application of chosen factors in the wide crossing method for the production of oat doubled haploids. *Open Life Sciences*, 10: 112-118.
- Ober E.S., Blos M.L., Clark C.J.A., Royal A., Jagard K.W., Pidgeon J.D. 2005. Evaluation of physiological traits as indirect selection criteria for drought tolerance in sugar beet. *Field Crops Res.*, 91(2): 231-249.
- Ohm H., Shaner G. 1992. Breeding oat for resistance to diseases. [W:] *Oat science and technology*. Red. H. Marshall, M. Sorrells. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, ss. 657-698.
- Okagaki R., Kynast R., Livingston S., Russell C., Rines H., Phillips R. 2001. Mapping maize sequences to chromosomes using oat-maize chromosome addition materials. *Plant Physiology*, 125: 1228-1235.
- Oleksiak T., Spyroglou I., Pacoń D., Matysik P., Pernisová M., Rybka K. 2021. Effect of drought on wheat production in Poland between 1961 and 2019. *Crop Science*, 62: 728-743.
- Papageorgiou G. C., Govindjee, 2011. Photosystem II fluorescence: slow changes – scaling from the past. *Journal Photochem Photobiol B*, 104: 258-270.
- Parus A. 2013. Przeciwtleniające i farmakologiczne właściwości kwasów fenolowych. *Postępy fitoterapii*, 1/2013: 48-53.
- Paul M., Pellny T. 2003. Carbon metabolite feedback regulation of leaf photosynthesis and development. *Journal of Experimental Botany*, 54(382): 539-547.

- Pluta M., Bartosiewicz J., Grynia J. 2013. Metody uzyskiwania podwojonych haploidów oraz ich wykorzystanie w hodowli pszenicy. *EPISTEME*, 21: 271-277.
- Pour-Aboughadareh A., Ahmadi J., Mehrabi A., Etminan A., Moghaddam M., Siddique K. 2017. Physiological responses to drought stress in wild relatives of wheat: implications for wheat improvement. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39: 106.
- Rao D., Chaitanya K. 2016. Photosynthesis and antioxidative defense mechanisms in deciphering drought stress tolerance of crop plants. *Biologia Plantarum*, 60(2): 201-218.
- Redillas M., Park SH., Lee J., Kim Y., Jeong J., Jung H., Bang S., Hahn TR., Kim JK. 2011. Accumulation of trehalose increases soluble sugar contents in rice plants conferring tolerance to drought and salt stress. *Plant Biotechnology Reports*, 6: 89-96.
- Rejowski A., Grzesiuk S. 1967. Naturalne inhibitory wzrostu i ich rola w życiu roślin wyższych. *Postępy Nauk Rolniczych*, nr 1(103): 9-33.
- Rezayian, M., Niknam V., Ebrahimzadeh H. 2018. Differential responses of phenolic compounds of *Brassica napus* under drought stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 8(3): 2417-2425.
- Riera-Lizarazu O., Rines H., Phillips R. 1996. Cytological and molecular characterization of oat × maize partial hybrids. *Theoretical and Applied Genetics*, 93: 123-135.
- Rines H., Phillips R., Kynast R., Okagaki R., Galatowitsch M., Huettl P., Stec A., Jacobs M., Suresh J., Porter H., Walch M., Cabral C. 2009. Addition of individual chromosomes of maize inbreds B73 and Mo17 to oat cultivars Starter and Sun II: maize chromosome retention, transmission, and plant phenotype. *Theoretical and Applied Genetics*, 119: 1255-1264.
- Sallam A., Alqudah A., Dawood M., Baenziger S., Börner A. 2019. Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 3137.
- Samarah N. 2005. Effects of drought stress on growth and yield of barley. *Agronomy for Sustainable Development*, 25: 145-149.
- Samarah N., Alqudah A., Amayreh J., McAndrews G. 2009. The effect of late-terminal drought stress on yield components of four barley cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195: 427-441.

- Sanei M., Pickering R., Kumke K., Nasuda S., Houben A. 2011. Loss of centromeric histone H3 (CENH3) from centromeres precedes uniparental chromosome elimination in interspecific barley hybrid. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(33): E498-E505.
- SanMiguel P., Tikhonov A., Jin Y., Motchoulskaia N., Zakharov D., Melake-Berhan A., Springer P., Edwards K., Lee M., Avramova Z., Bennetzen J. 1996. Nested retrotransposons in the intergenic regions of the maize genome. *Science*, 274: 765-768.
- Sen A., Puthur J. 2021. Halo- and UV-B priming-mediated drought tolerance and recovery in rice seedlings. *Plant Stress*, 2: 100011.
- Shakhatreh Y., Kafawin O., Ceccarelli S., Saoub H. 2001. Selection of barley lines for drought tolerance in low rainfall areas. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186: 119-127.
- Simmonds N. 1987. *Podstawy hodowli roślin*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Sinay H., Karuwal R. 2014. Proline and total soluble sugar content at the vegetative phase of six corn cultivars from Kisar Island Maluku, grown under drought stress conditions. *International Journal of Advance Agricultural Research*, 2: 77-82.
- Singleton V., Rossi J. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagent. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16: 144-158.
- Skrzypek E., Warchoń M., Czyczyło-Mysza I., Marcińska I., Nowakowska A., Dziurka K., Juzoń K., Noga A. 2016. The effect of light intensity on the production of oat (*Avena sativa* L.) doubled haploids through oat × maize crosses. *Cereal Research Communications*, 44: 490-500.
- Skrzypek E., Warzecha T., Noga A., Warchoń M., Czyczyło-Mysza I., Dziurka K., Marcińska I., Kapłoniak K., Sutkowska A., Nita Z., Werwińska K., Idziak-Helmcke D., Rojek M., Hosiawa-Barańska M. 2018. Complex characterization of oat (*Avena sativa* L.) lines obtained by wide crossing with maize (*Zea mays* L.). *PeerJ*, 6: e5107.
- Smorowska U. 2009. Wzrost zagrożenia suszą hydrologiczną w różnych regionach geograficznych Polski w XX wieku. *Prace i Studia Geograficzne* T. 43: 97-114.
- Soltys-Kalina D., Plich J., Strzelczyk-Żyta D., Śliwka J., Marczewski W. 2016. The effect of drought stress on the leaf relative water content and tuber yield of a half-sib family of 'Katahdin'-derived potato cultivars. *Breeding Science*, 66: 328-331.



- Sosnowska K. 2011. Wykorzystanie krzyżowania oddalonego do poszerzania zmienności genetycznej w rodzaju *Brassica sp.* Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 23: 211-222.
- Spiss L. 2009 a. Konwencjonalne metody hodowli roślin. [W:] Hodowla roślin z elementami genetyki i biotechnologii. Red. B. Michalik. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań, ss. 169-198.
- Spiss L. 2009 b. Wykorzystanie mieszańców oddalonych w hodowli roślin. [W:] Hodowla roślin z elementami genetyki i biotechnologii. Red. B. Michalik. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań, ss. 260-267.
- Stefaniak B. 2004. Komórki roślinne w warunkach stresu. Tom 2. Komórki *in vitro*. Red. A. Woźny i K. Przybył. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.
- Stitt M., Hurry V. 2002. A plant for all seasons: alterations in photosynthetic carbon metabolism during cold acclimation in *Arabidopsis*. Current Opinion in Plant Biology, 5: 199-206.
- Surma M. 2016. Kuczyńska A. Adamski T. Metody biotechnologiczne w hodowli pszenicy. Instytut Genetyki Roślin, Polska Akademia Nauk, Poznań, ss. 5-15.
- Sykut-Domańska E. 2012. Charakterystyka wybranych cech fizycznych ziarna owsa nagiego i zwyczajnego (*Avena sativa* L.). Acta Agrophysica, 19(4): 845-856.
- System Monitoringu Suszy Rolniczej, Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach, <https://susza.iung.pulawy.pl/> (dostęp 28.03.2022).
- Thomas H. 1997. Drought resistance in plants. [W:] Mechanisms of environmental stress resistance in plants. Red. A. S. Basra, R. K. Basra. Harwood Academic Publishers, Netherlands, ss. 1-42.
- van Heerden P.D.R., Swanepoel J.W., Krüger G.H.J. 2007. Modulation of photosynthesis by drought in two desert scrub species exhibiting C<sub>3</sub>-mode CO<sub>2</sub> assimilation. Environmental and Experimental Botany, 61: 124-136.
- Vijayalakshmi K., Fritz A.K., Paulsen G.M., Bai G., Pandravada S., Gill B.S. 2010. Modeling and mapping QTL for senescence-related traits in winter wheat under high temperature. Molecular Breeding, 26(2): 163-175.

- Warchoł M., Skrzypek E., Nowakowska A., Marcińska I., Czyczyło-Mysza I., Dziurka K., Juzoń K., Cyganek K. 2016. The effect of auxin and genotype on the production of *Avena sativa* L. doubled haploid lines. *Plant Growth Regulation*, 78: 155-165.
- Warchoł M., Czyczyło-Mysza I., Marcińska I., Dziurka K., Noga A., Skrzypek E. 2018. The effect of genotype, media composition, pH and sugar concentrations on oat (*Avena sativa* L.) doubled haploid production through oat × maize crosses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40: 93.
- Warzecha T.; Skrzypek E.; Sutkowska A. 2015. Effect of *Fusarium culmorum* infection on the selected physiological and biochemical parameters of barley (*Hordeum vulgare* L.) DH lines. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 89: 62-69.
- Warzecha T., Skrzypek E., Adamski T., Surma M., Kaczmarek Z., Sutkowska A. 2019. Chlorophyll *a* fluorescence parameters of hulled and hull-less barley (*Hordeum vulgare* L.) DH lines inoculated with *Fusarium culmorum*. *The Plant Pathology Journal*, 35(2): 112-124.
- Wojciechowski A. 1985. Interspecific hybrids between *Brassica campestris* L. and *B. oleracea* L. I. effectiveness of crossing, pollen tube growth, embryogenesis. *Genetica Polonica*, 26(4): 423-436.
- Woloshuk C.P., Meulenhof J.S., Sela-Buurlage M., van den Elzen P.J.M., Cornelissen B.J.C., 1991. Pathogen-induced proteins with inhibitor activity toward *Phytophthora infestans*, *Plant Cell*, 3: 619-628.
- Woś A. 2002. *Meteorologia dla geografów*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Poznań.
- Wójcik I., Doroszewski A., Wróblewska E., Koza P. 2019. Susza rolnicza w uprawie zbóż jarych w Polsce w latach 2006-2017. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, T. 19, Z. 1(65): 77-95.
- Yoshida M., Abe J., Moriyama M., Shimokawa S. Nakamura Y. 1997. Seasonal changes in the physical state of crown water associated with freezing tolerance in winter wheat. *Physiologia Plantarum*, 99: 396-370.
- Zenkter M., Straub J. 1979. Cytoembryological studies on the process of fertilization and the development of haploid embryos of *Triticum aestivum* L. (2n=42) after crossing with *Hordeum bulbosum* (2n=14). *Zeitschrift fuer Pflanzenzuechtung*, 82: 36-44.

Zenkteler M. 2007. Kultura zalążków, zalążni i zarodków. W: Biotechnologia roślin. Red. S. Malepszy. PWN, Warszawa, 70-87.