



Określenie fizjologicznych i biochemicznych wskaźników tolerancji pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) na stres suszy i wysokiej temperatury

Zadanie badawcze 3

Okres realizacji: 2021 - 2026

Kierownik projektu: dr inż. Katarzyna Juzoń-Sikora, e-mail: k.juzon@ifr-pan.edu.pl

Wykonawcy:

prof. dr hab. inż. Edyta Skrzypek

dr hab. inż. Ilona Czyczyło-Mysza

dr Marzena Warchoł

dr inż. Kinga Dziurka

dr Michał Dziurka

mgr inż. Kamila Laskoś

dr inż. Agnieszka Ostrowska

dr Anna Maksymowicz

mgr Natalia Hordyńska



Cel projektu

Selekcja tolerancji na suszę glebową rodów/odmian pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) na podstawie analizy wybranych parametrów biochemicznych i elementów składowych plonu. Otrzymane wyniki posłużyły do wyliczenia wskaźników wrażliwości na stres suszy (SSI, DSI, TOL, STI, YI, %R).

Cele szczegółowe:

- Analizy biochemiczne i obliczenie wskaźników SSI – **zrealizowany**
- Określenie indeksów DSI, TOL, STI, YI, %R na podstawie elementów składowych plonu – **zrealizowany**
- Określenie tolerancji na suszę na podstawie korelacji między wskaźnikami SSI, a indeksami DSI, TOL, STI, YI, %R – **zrealizowany**



Figura 1. Pszenica ozima (*Triticum aestivum* L.) w trakcie stresu suszy w szklarni (po lewej) oraz po okresie suszy, w trakcie dojrzewania w tunelu wegetacyjnym (po prawej) (Fot. K. Laskoś)

Materiał i metody

Materiał roślinny:

30 rodzajów/odmian pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) pochodzących z Polskich Spółek Hodowlanych, poddanych **21-dniowej suszy glebowej (25% ppw) w fazie krzewienia**

Metody:

- ❑ **Względna zawartość wody w liściach (LRWC, ang. Leaf Relative Water Content);** Ober *i in.* (2005)
- ❑ **Zawartość barwników fotosyntetycznych** (chlorofilu *a*, *b* i karotenoidów); Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. (1983)
- ❑ **Zawartość związków fenolowych** (wolnych i związanych ze ścianą komórkową); Singleton V.S., Rossi Jr J.A. (1965), Hura T. *i in.* (2012)
- ❑ **Zawartość cukrów rozpuszczalnych;** Dubois M. *i in.* (1956)
- ❑ **Peroksydacja lipidów;** Heath R.L., Packer L. (1968)
- ❑ **Aktywność antyoksydacyjna** (całkowita zawartość antyoksydantów, aktywność enzymów antyoksydacyjnych: SOD, CAT, PX); Brand-Williams W. (1995), Turkmen N. *i in.* (2006), Baltrusaiyte V. *i in.* (2007), McCord J.M., Fiodovich I. (1969), Aebi H. (1984), Lück H. (1962)
- ❑ **Zawartość kwasów: salicylowego (SA), jasmonowego (JA) i abscysynowego (ABA);** Dziurka *i in.* (2016)
- ❑ **Komponenty plonu:** liczba dni do kłoszenia/kwitnienia; wysokość pędu głównego; krzewistość produkcyjna; liczba/masa ziaren w kłosie i roślinie; masa 1000 ziaren
- ❑ **Wskaźnik wrażliwości na stres suszy glebowej**
 - $SSI = (1 - Y_s / Y_p) / (1 - \bar{Y}_s / \bar{Y}_p)$ (SSI, ang. Stress Susceptibility Index, wskaźnik wrażliwości na stres, Fischer i Maurer 1978)
 - $DSI = (1 - Y_s / Y_p) / D$ (ang. Drought Susceptibility Index; wskaźnik wrażliwości na suszę; Fischer i Maurer 1978)
 - $TOL = Y_p - Y_s$ (ang. Tolerance; tolerancja; Hossain *i in.* 1990)
 - $STI = Y_p \times Y_s / (\bar{Y}_p)^2$ (ang. Stress Tolerance Index; wskaźnik tolerancji stresu; Fernandez 1992)
 - $YI = Y_s / \bar{Y}_s$ (ang. Yield Index; wskaźnik plonowania; Gavuzzi 1997)
 - $\%R = (Y_p - Y_s / Y_p) \times 100$ (ang. %Reduction; spadek plonu; Choukan *i in.* 2006)

WYNIKI 1: Analizy biochemiczne i obliczenie wskaźników SSI

Tabela 1. Średnie, maksimum i minimum wartości badanych parametrów biochemicznych w liściach 30 rodów/odmian pszenicy ozimej poddanej stresowi suszy glebowej.

Parametr	Kontrola	Susza	Kontrola	Susza	Kontrola	Susza
	(70% ppw)	(25% ppw)	(70% ppw)	(25% ppw)	(70% ppw)	(25% ppw)
	Średnia		Maksimum		Minimum	
LRWC [%]	90,5	84,2	96,1	94,1	84,1	70,6
Chlorofil a [mg/g s.m.]	13,6	10,5	15,3	12,2	11,8	8,6
Chlorofil b [mg/g s.m.]	4,6	3,4	5,4	4,0	4,1	2,8
Chlorofil a+b [mg/g s.m.]	18,3	13,9	20,7	16,2	16,1	11,4
Karotenoidy [mg/g s.m.]	2,8	2,2	3,1	2,6	2,2	1,9
Wolne związki fenolowe [mg/g s.m.]	35,7	38,2	41,4	53,4	32,7	32,0
Zw. fenolowe związane ze śc. komórkową [mg/g s.m.]	26,4	31,2	38,4	56,0	19,2	20,2
Cukry rozpuszczalne [mg/g s.m.]	9,3	20,3	12,1	23,3	7,1	17,3
Peroksydacja lipidów [nmol/g św.m.]	2,8	3,8	3,9	6,6	0,8	2,0
Zawartość przeciwutleniaczy [%]	72,3	75,4	80,4	82,7	63,8	62,6
SOD [Δ ABS/g białka]	3,5	3,4	5,9	6,5	1,3	1,4
CAT [Δ ABS/g białka]	529,5	618,5	795,5	905,5	142,9	210,1
POD [Δ ABS/g białka]	2000,3	2328,5	3167,4	3841,4	1411,9	1087,4
SA [ng/g s.m.]	2853,0	2603,7	3672,7	3113,0	2347,4	2293,7
JA [ng/g s.m.]	3185,9	2774,1	5620,4	4380,3	2218,0	1618,8
ABA [ng/g s.m.]	326,3	440,6	414,2	682,1	263,5	322,2

Badane rody/odmiany pszenicy ozimej charakteryzowały się znaczną zmiennością wybranych parametrów biochemicznych w zależności od traktowania. Susza spowodowała spadek LRWC, barwników fotosyntetycznych, kwasów salicylowego (SA) i jasmonowego (JA), a wzrost związków fenolowych, cukrów, przeciwutleniaczy, enzymów antyoksydacyjnych: CAT i POD oraz kwasu abscysynowego (ABA).

WYNIKI 1: Analizy biochemiczne i obliczenie wskaźników SSI

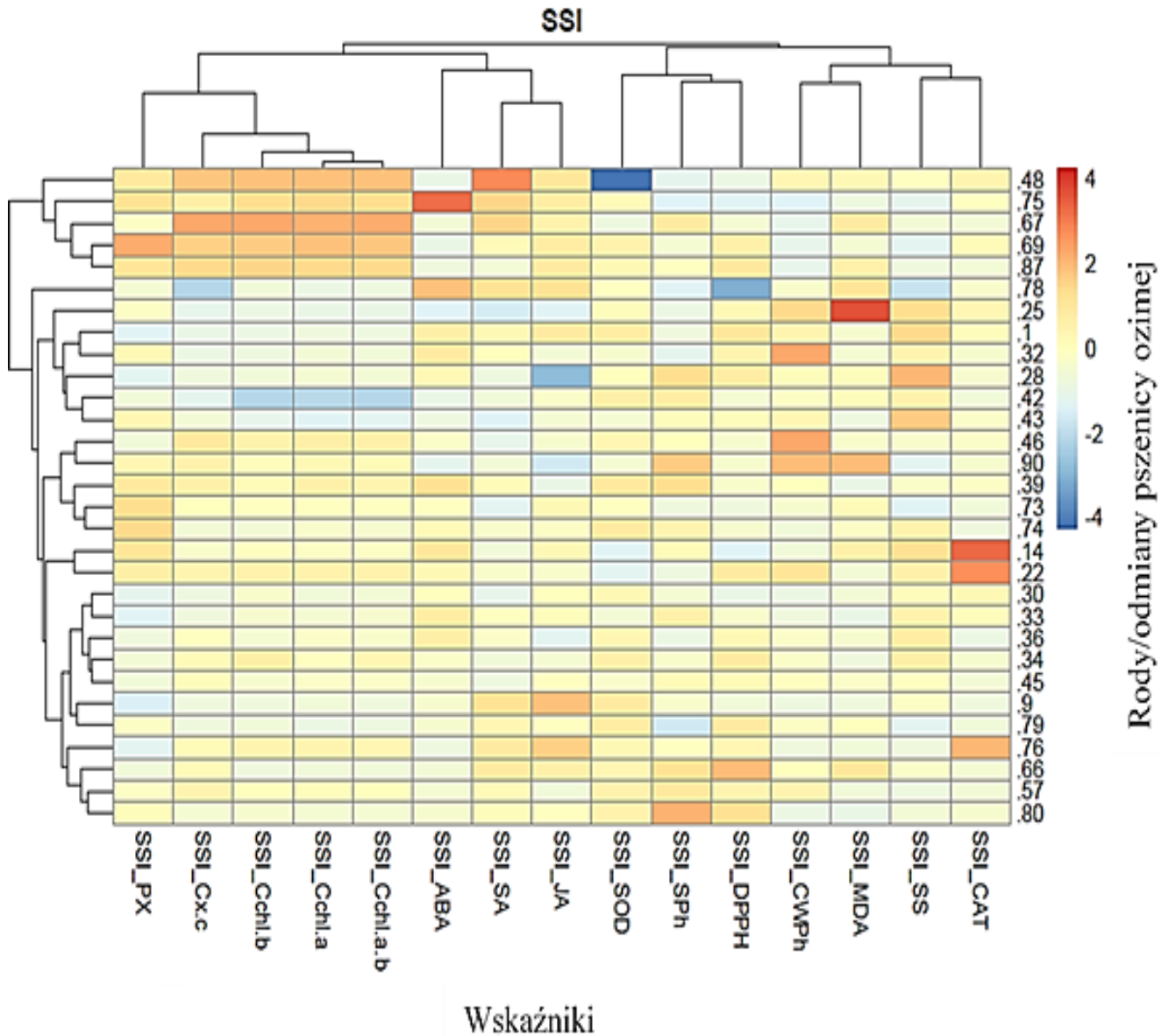


Figura 2. Mapa cieplna oraz analiza skupień różnicująca 30 wybranych rodów/odmian pszenicy ozimej pod względem wartości stężenia chlorofilu *a* ($C_{chl.a}$), stężenia chlorofilu *b* ($C_{chl.b}$), stężenia całkowitego chlorofilu ($C_{chl.a+b}$), stężenia sumy karotenoidów (C_{x+c}), zawartości wolnych związków fenolowych (SPh), zawartości związków fenolowych wbudowanych w ściany komórkowe (CWPh), zawartości dialdehydu malnowego (MDA), zawartości cukrów rozpuszczalnych (SS), stopnia zmiatania (zaniku absorbancji) rodnika DPPH• (DPPH), aktywności enzymów antyoksydacyjnych: dysmutazy anionorodnika ponadtlenkowego (SOD), katalazy (CAT) i peroksydaz (PX), zawartości kwasów: salicylowego (SA), jasmonowego (JA) i abscysynowego (ABA). Każda kolumna reprezentuje inną zmienną, a każdy rząd inny ród/odmianę pszenicy. Skala kolorów wyjaśnia poszczególne wartości, wartości w danym rzędzie poddano skalowaniu. Intensywność koloru świadczy o różnicach w wysokości wartości w obrębie danego parametru pomiędzy rodami.

Uwzględniając wartości wskaźnika SSI dla wszystkich analizowanych związków zestawiono badane rody/odmiany pszenicy ozimej w postaci mapy cieplnej i analizy skupień. Mapa cieplna została przygotowana w oparciu o zeskalowane wartości dla każdego z analizowanych wskaźników osobno (skalowanie kolumnami).

Na mapie cieplnej szczególnie odróżniają się rody/odmiany **48, 67, 69, 75 i 87**, o najwyższych wartościach SSI, wskazując na znaczący spadek barwników fotosyntetycznych podczas suszy, a w związku z tym mniejszą tolerancję suszy w porównaniu z pozostałym rodami/odmianami.

WYNIKI 2: Określenie indeksów DSI, TOL, STI, YI, %R na podstawie elementów składowych plonu

Tabela 2. Średnie, maksimum i minimum wartości wybranych elementów składowych plonu 30 rodów/odmian pszenicy ozimej poddanej stresowi suszy glebowej.

Parametr	Kontrola	Susza	Kontrola	Susza	Kontrola	Susza
	(70% ppw)	(25% ppw)	(70% ppw)	(25% ppw)	(70% ppw)	(25% ppw)
	Średnia		Maksimum		Minimum	
Liczba dni do kłoszenia	56	55	66	61	45	44
Liczba dni do kwitnienia	60	59	69	67	49	49
Wysokość pędu głównego [cm]	66,4	45,7	83,7	60,8	57,2	32,4
Krzewistość produkcyjna	4,5	3,9	5,8	6,0	3,5	1,3
Liczba ziaren na roślinę	162	130	216	229	84	31
Masa ziaren na roślinę [g]	6,4	3,8	8,1	5,8	2,3	0,7
Liczba ziaren na kłos	38	33	58	55	24	12
Masa ziaren na kłos [g]	1,5	1,0	2,0	1,5	0,7	0,4
MTZ [g]	40,0	29,6	50,2	39,3	27,2	20,1

Wykazano zróżnicowanie badanych rodów/odmian pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) pod względem wartości analizowanych elementów składowych plonu. Susza znacząco obniżyła przede wszystkim liczbę i masę ziaren.

WYNIKI 2: Określenie indeksów DSI, TOL, STI, YI, %R na podstawie elementów składowych plonu

Ród/odmiana	DSI	TOL	STI	YI	%R
1	1,02	3,05	0,78	0,68	41,47
9	1,14	2,87	0,51	0,52	46,29
14	0,20	0,38	0,48	0,67	8,13
22	1,66	3,64	0,24	0,28	67,29
25	0,77	2,24	0,88	0,78	31,16
28	1,06	2,80	0,60	0,58	42,97
30	1,01	2,36	0,48	0,53	41,08
32	0,99	2,99	0,81	0,69	40,32
33	0,55	1,24	0,60	0,68	22,20
34	1,44	3,63	0,39	0,40	58,50
36	0,63	1,95	1,08	0,90	25,44
39	1,01	3,14	0,85	0,71	41,05
42	0,21	0,54	0,88	0,90	8,67
43	0,47	1,07	0,64	0,72	18,98
45	0,89	2,20	0,59	0,61	36,01
46	1,36	4,48	0,73	0,57	55,02
48	2,00	5,63	0,22	0,20	81,38
57	0,68	2,01	0,94	0,83	27,57
66	0,50	1,34	0,88	0,84	20,13
67	1,94	5,53	0,26	0,23	78,90
69	2,20	5,88	0,12	0,11	89,14
73	0,47	1,24	0,84	0,83	19,11
74	0,02	0,04	0,83	0,91	0,75
75	1,97	4,92	0,19	0,19	80,04
76	1,02	2,49	0,52	0,55	41,29
78	1,10	1,01	0,07	0,20	44,84
79	0,70	2,25	1,09	0,88	28,58
80	1,52	4,08	0,41	0,40	61,70
87	0,40	0,94	0,70	0,76	16,26
90	0,70	1,67	0,62	0,66	28,24

Najniższa wartość wskaźnika ■ ■ Najwyższa wartość wskaźnika

Tabela 3. Wskaźniki: wrażliwości na suszę (DSI, ang. *Drought Susceptibility Index*), tolerancja (TOL, ang. *Tolerance*), wskaźnik tolerancji stresu (STI, ang. *Stress Tolerance Index*), wskaźnik plonowania (YI, ang. *Yield Index*) oraz spadek plonu (%R, ang. *%Reduction*) obliczone dla każdego rodu/odmiany pszenicy (*Triticum aestivum* L.) na podstawie masy ziaren/roślinę.

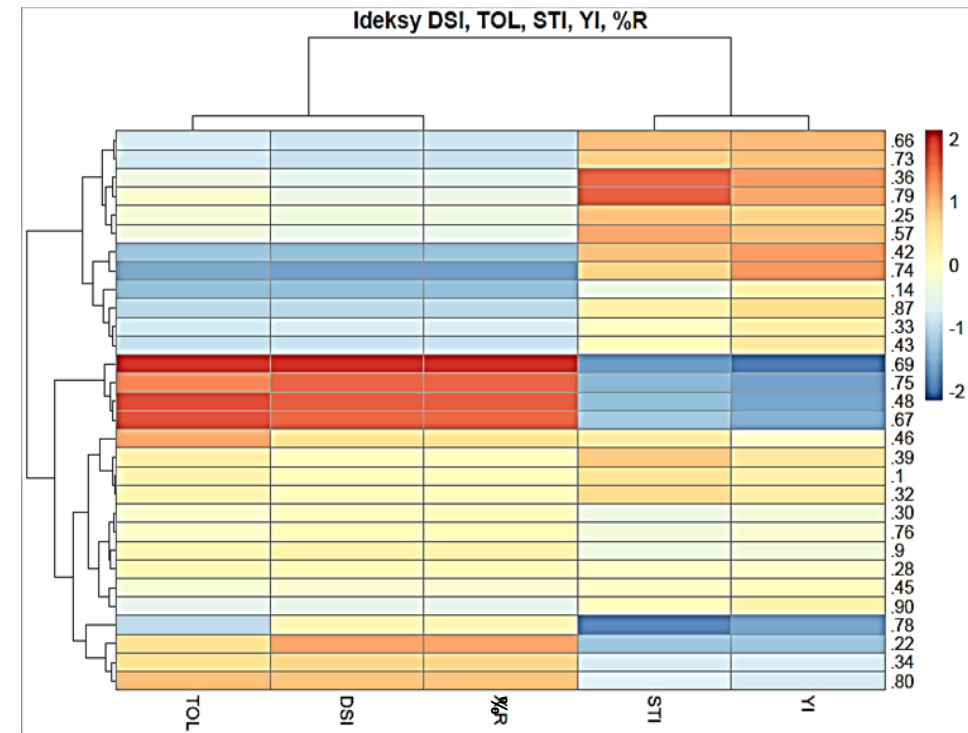


Figura 3. Mapa cieplna oraz analiza skupień różnicująca badane rody/odmiany pszenicy ozimej pod względem wrażliwości na suszę: TOL, DSI, %R, STI oraz YI. Każda kolumna reprezentuje inną zmienną, a każdy rząd inny ród/odmianę pszenicy. Intensywność koloru świadczy o różnicach w wysokości wartości w obrębie danego parametru pomiędzy rodami/odmianami.

Analiza wartości wskaźników wrażliwości na suszę i mapy cieplnej wykazała, że spośród badanych rodów/odmian szczególnie odróżniają się 48, 67, 69 i 75 o najwyższych wartościach TOL, DSI i %R, a najniższych STI i YI, wskazując na mniejszą tolerancję suszy w porównaniu z pozostałymi rodami/odmianami.

WYNIKI 3: Określenie tolerancji na suszę na podstawie korelacji między wskaźnikami SSI, a indeksami DSI, TOL, STI, YI, %R

Cecha	TOL	STI	YI	%R	DSI
C _{chl.a}	0,67	-0,49	-0,58	0,64	0,64
C _{chl.b}	0,66	-0,56	-0,63	0,66	0,66
C _{chl.a+b}	0,67	-0,52	-0,60	0,65	0,65
C _{x+c}	0,59	-0,27	-0,36	0,50	0,50
SPh	-0,15	0,13	0,20	-0,22	-0,22
CWPh	0,01	0,31	0,21	-0,07	-0,07
MDA	-0,21	0,09	0,12	-0,19	-0,19
SS	-0,19	0,23	0,29	-0,27	-0,27
DPPH•	0,11	0,39	0,30	-0,03	-0,03
SOD	-0,25	0,42	0,38	-0,28	-0,28
CAT	0,03	-0,36	-0,27	0,10	0,10
PX	0,14	-0,20	-0,18	0,13	0,13
SA	0,47	-0,42	-0,51	0,52	0,52
JA	0,14	-0,41	-0,36	0,23	0,23
ABA	0,00	-0,20	-0,20	0,10	0,10

Tabela 4. Wartości współczynników korelacji liniowej Pearsona pomiędzy wskaźnikami wrażliwości na suszę glebową SSI wyliczonymi na podstawie: stężenia chlorofilu *a* (C_{chl.a}), stężenia chlorofilu *b* (C_{chl.b}), stężenia całkowitego chlorofilu (C_{chl.a+b}), stężenia sumy karotenoidów (C_{x+c}), zawartości wolnych związków fenolowych (SPh), zawartości związków fenolowych wbudowanych w ściany komórkowe (CWPh), zawartości dialdehydu malnowego (MDA), zawartości cukrów rozpuszczalnych (SS), stopnia zmiatania (zaniku absorbancji) rodnika DPPH• (DPPH•), aktywności enzymów antyoksydacyjnych: dysmutazy anionorodnika ponadtlennego (SOD), katalazy (CAT) i peroksydaz (PX), zawartości kwasów: salicylowego (SA), jasmonowego (JA) i abscysynowego (ABA), a indeksami wyliczonymi na podstawie masy ziaren/roślinę: wskaźnik wrażliwości na suszę (DSI), tolerancja (TOL), wskaźnik tolerancji stresu (STI), wskaźnik plonowania (YI) oraz spadek plonu (%R). Oznaczone na czerwono współczynniki korelacji są istotne przy $\alpha \leq 0,05$.

Analiza korelacji liniowej Pearsona pomiędzy wskaźnikami wrażliwości na suszę glebową SSI wyliczonymi dla parametrów biochemicznych (szczególnie dla barwników fotosyntetycznych, SA, JA, SOD i DPPH), a indeksami wyliczonymi na podstawie masy ziaren/roślinę, wykazała istotne korelacje liniowe pomiędzy tymi wskaźnikami wśród badanych rodów/odmian pszenicy.

WYNIKI 3: Określenie tolerancji na suszę na podstawie korelacji między wskaźnikami SSI, a indeksami DSI, TOL, STI, YI, %R

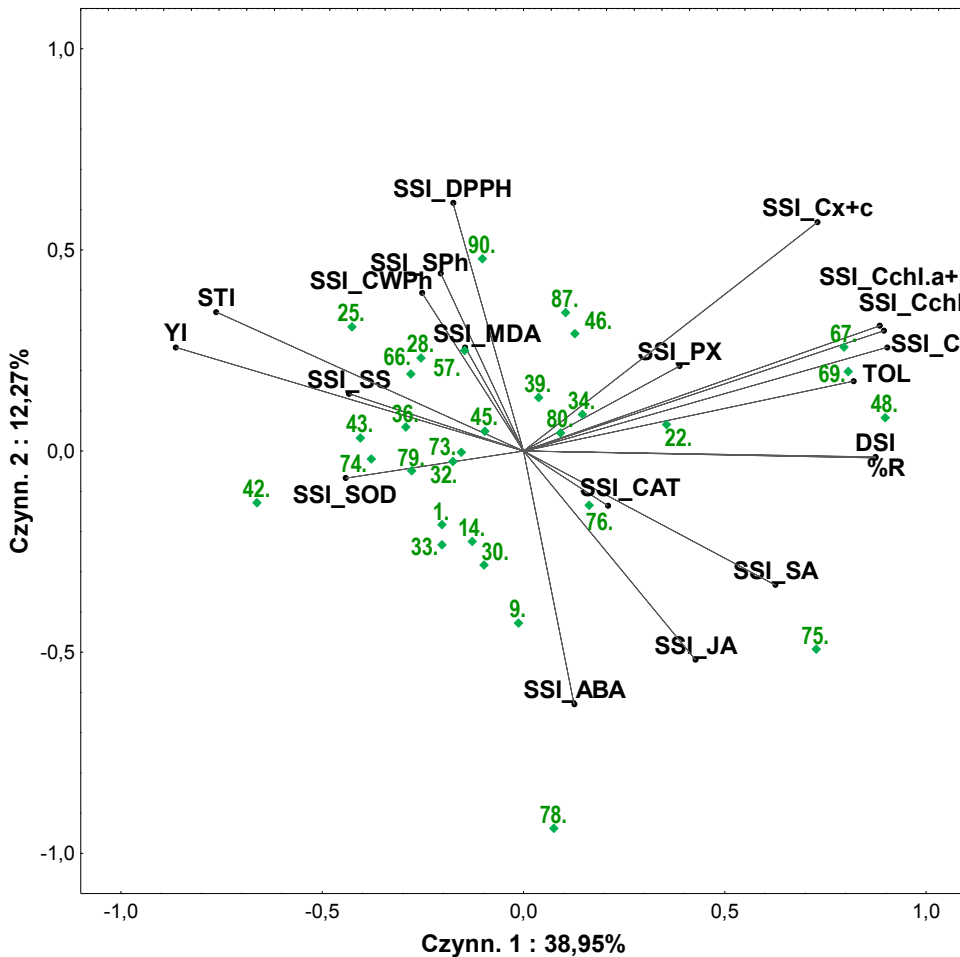
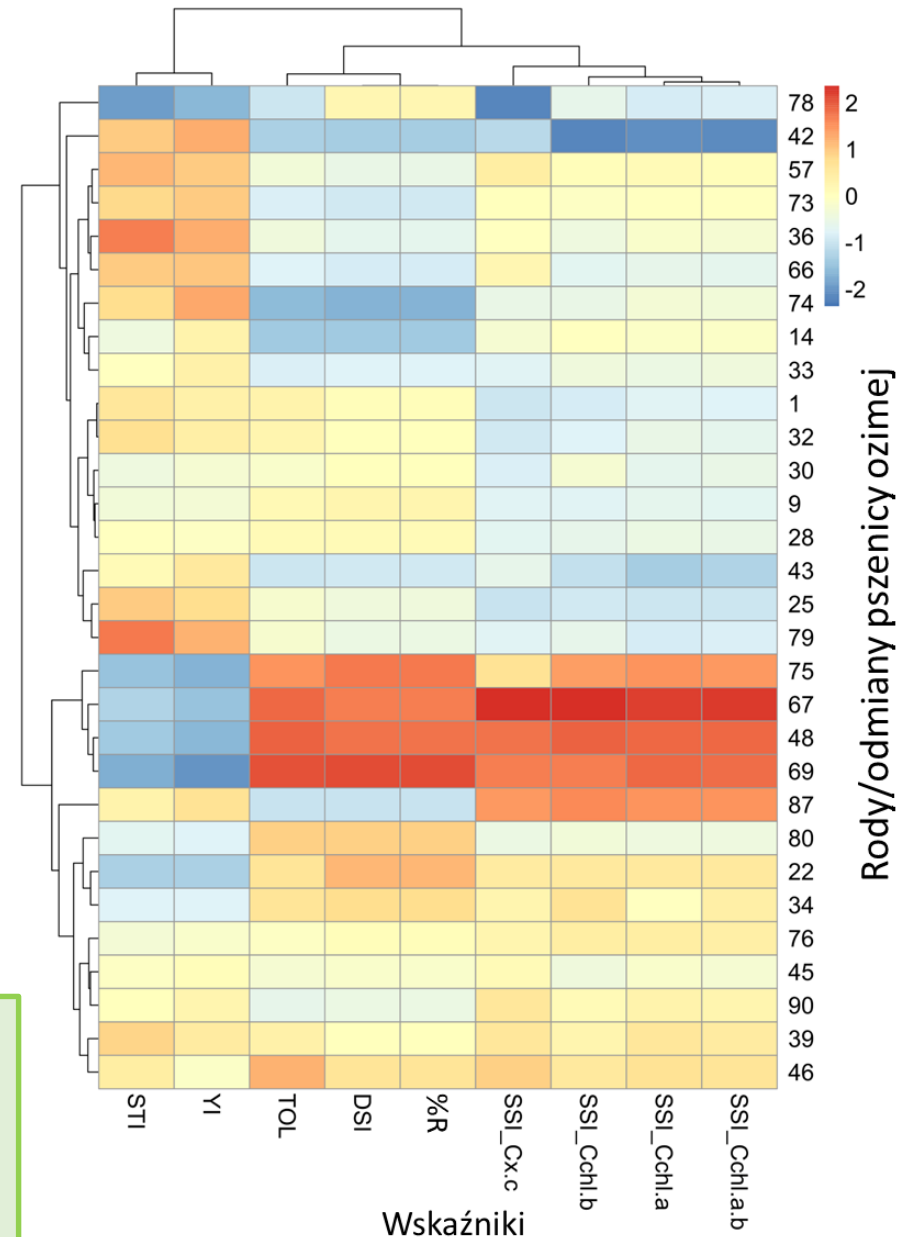


Figura 4. Analiza głównych składowych (PCA) dla zmiennych różnicujących badane rody/odmiany pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) pod względem wskaźników wrażliwości na suszę glebową SSI oraz indeksów: DSI, TOL, STI, YI, %R obliczonych dla każdego rodu/odmiany pszenicy na podstawie masy ziaren/roślinę.

Figura 5. Mapa cieplna oraz analiza skupień różnicująca badane rody/odmiany pszenicy ozimej pod względem wskaźników wrażliwości na suszę glebową SSI wyliczonych na podstawie stężeń barwników oraz indeksów obliczonych dla każdego rodu/odmiany pszenicy na podstawie masy ziaren/roślinę, wskaźników wrażliwości na suszę DSI, TOL, STI, YI, %R. Każda kolumna reprezentuje inną zmienną, a każdy rząd inny ród/odmianę pszenicy. Intensywność koloru świadczy o różnicach w wysokości wartości w obrębie danego parametru pomiędzy rodami/odmianami.



Analiza PCA oraz mapy cieplnej wyróżniła rody/odmiany 48, 67, 69 i 75, o najniższych wartościach wskaźników STI, YI i najwyższych wartościach wskaźników DSI, TOL, %R, SSI_C_{chl.a}, SSI_C_{chl.b}, SSI_C_{chl.a+b}, SSI_C_{x+c}, co wskazuje na obniżone plonowanie i znaczącą degradację barwników fotosyntetycznych podczas suszy, a tym samym niską tolerancję na suszę tych rodów/odmian.

Wnioski i podsumowanie

- Uzyskane wyniki umożliwiły wytypowanie rodów/odmian pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) o skrajnych wartościach parametrów biochemicznych w warunkach suszy. Uwzględniając wartości wskaźnika SSI wszystkich analizowanych parametrów biochemicznych, stwierdzono że spadek endogennej zawartość barwników fotosyntetycznych i wzrost zawartości kwasu abscysynowego mogą służyć jako biochemiczne wskaźniki tolerancji roślin na suszę.
- Wykazano zróżnicowanie badanych rodów/odmian pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.) pod względem wartości analizowanych elementów składowych plonu. Wyliczone na podstawie masy ziaren na roślinę współczynniki wrażliwości na suszę (DSI, ang. *Drought Susceptibility Index*), tolerancji (TOL, ang. *Tolerance*), tolerancji stresu (STI, ang. *Stress Tolerance Index*), plonowania (YI, ang. *Yield Index*) oraz spadku plonu (%R, ang. *%Reduction*) umożliwiły wyodrębnienie czterech rodów/odmian: 48, 67, 69 i 75 o najwyższych wartościach TOL, DSI i %R, a najniższych STI i YI świadczących o mniejszej tolerancji na suszę oraz trzech o wysokich wartościach TOL, DSI i %R, a niskich STI i YI świadczących o większej tolerancji na suszę w porównaniu z pozostałymi rodami/odmianami.
- Analiza współczynników korelacji liniowej Pearsona pomiędzy wskaźnikami wrażliwości na suszę glebową SSI wyliczonymi dla parametrów biochemicznych, a indeksami DSI, TOL, STI, YI i %R wyliczonymi na podstawie masy ziaren na roślinę, wykazała że SSI dla barwników fotosyntetycznych i kwasu salicylowego, jest istotnie dodatnio skorelowany z TOL, %R i DSI, a ujemnie z STI i YI.
- Na podstawie analizy istotnych korelacji wyselekcjonowano dwie grupy rodów/odmian pszenicy o skrajnych wartościach wskaźników i indeksów, oraz grupę rodów/odmian o pośrednich wartościach. Pierwsza z grup: 14, 36, 42, 43, 57 i 74, odznaczała się niską wartością DSI, TOL oraz %R, a wysoką STI oraz YI, co sugeruje wyższą tolerancję na suszę w porównaniu do pozostałych rodów. Druga grupa: 48, 67, 69 i 75, wykazywała wysokie wartości DSI, TOL oraz %R i niską wartość indeksów STI i YI, co sugeruje niską tolerancję na suszę w porównaniu do pozostałych rodów/odmian. Natomiast rody/odmiany: 1, 9, 22, 25, 28, 30, 32, 33, 34, 39, 45, 46, 66, 73, 76, 78, 79, 80, 87 i 89, stanowią grupę o pośrednich wartościach indeksów DSI, TOL, STI, YI oraz %R oraz wskaźników SSI.