

Abstract

This doctoral study examines multi-trait stability and genotype-by-environment ($G \times E$) interactions in temperate cereals, focusing on spring wheat, winter wheat, and winter rye under varying crop management systems. By applying advanced multivariate tools, including the Multi-Trait Stability Index (MTSI), Classification and Regression Tree (CART), and Canonical Correspondence Analysis (CCA), this work identifies stable cultivars and the key traits influencing yield and quality stability in temperate conditions.

In spring wheat, seven cultivars were assessed across four locations and two seasons under moderate and high-input systems. MTSI and CART revealed that stability profiles differed across management intensities. Bombona and Izera were identified as the most stable cultivars under moderate and high input, respectively. Stability rankings were driven by spike fertility traits such as grain yield, thousand-grain weight, and loaf volume. Genotypic effects were particularly significant for traits like gluten index and falling number, indicating the importance of cultivar choice in preserving end-use quality. The findings underscore that multi-trait stability is specific to management regime and highlight the utility of combining MTSI with CART for evaluating complex genotype $\times$ environment $\times$ management interactions.

Winter wheat performance was assessed using 55 cultivars evaluated across 60 environments over five years. Five traits, grain yield, thousand-grain weight, protein content, sedimentation value, and falling number, were analyzed for stability using Shukla's variance, MTSI, and CCA. While Shukla's variance identified cultivars like SY Yukon as stable, MTSI highlighted Medalistka and KWS Spencer for their superior multi-trait performance. CCA linked yield stability with resistance to powdery mildew, brown rust, and chaff septoria, while quality trait stability was associated with winter hardiness and lodging resistance. Soil nutrient availability, clay content, and water capacity also emerged as environmental moderators, reinforcing the role of genotype and site-specific factors in shaping stability.

In winter rye, 16 cultivars (11 populations and 5 hybrids) were evaluated across three locations over two seasons under moderate (MIM) and high-input (HIM) management. Hybrids yielded ~24% more but had significantly lower grain protein content and trait stability compared to population cultivars. Path analysis indicated spikes per square meter as the main yield determinant. MTSI and Shukla's variance confirmed population cultivars as more stable, especially under MIM. CART analysis revealed septoria resistance and aluminum tolerance as top stability predictors under MIM and HIM, respectively.

Collectively, this research confirms the robustness of MTSI and complementary multivariate methods in characterizing $G \times E$ responses. These findings support the development of climate-resilient breeding strategies and trait-based cultivar selection tailored to temperate environments.

Keywords: Genotype $\times$ environment interaction; multi-trait stability index (MTSI); Shukla stability variance; classification and regression tree (CART); canonical correspondence analysis (CCA); farinograph analysis; grain yield; grain protein content; dough and bread-making quality; cultivar adaptation; climate change; crop management intensity; hybrid vs. population cultivars; food security; cereal stability; rye; wheat.

Abbreviations: Crumb hardness (CH), dough development (DD), dough softening (DSF), dough stability (DS), flour yield (FY), gluten index (GI), grain ash content (AC), grain protein content (PC), grain yield (GY), falling number (FN), high-input management (HIM), loaf volume (LV), moderate-input management (MIM), test weight (TW), thousand-grain weight (TGW), quality number (QN), water absorption (WA), wet gluten content (WG), Zeleny sedimentation value (SV); CART, classification and regression trees; MTSI, multi-trait stability index.

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska koncentruje się na analizie stabilności wielocechowej i interakcji genotyp–środowisko ($G \times E$) u zbóż uprawianych w klimacie umiarkowanym, ze szczególnym uwzględnieniem pszenicy jarej, pszenicy ozimej i żyta ozimego w zróżnicowanych poziomach agrotechniki. W badaniach zastosowano zaawansowane narzędzia statystyki wielowymiarowej, takie jak Indeks Stabilności Wielocechowej (MTSI), Drzewa Klasyfikacyjne i Regresyjne (CART) oraz Kanoniczną Analizę Korespondencji (CCA), aby wskazać stabilne odmiany i zidentyfikować cechy kluczowe dla utrzymania stabilności plonu i wysokiej jakości.

Dla pszenicy jarej przebadano siedem odmian w czterech lokalizacjach i dwóch sezonach wegetacyjnych na przeciętnym i wysokim poziomie intensywności agrotechniki. Wyniki wykazały, że odmiany Bombona i Izera były najbardziej stabilne zarówno w przeciętnym i wysokiego poziomu agrotechniki. Cechy płodności kłosa, takie jak plon ziarna, masa tysiąca ziaren i objętość bochenka, były głównymi determinantami wielocechowej stabilności. Zaobserwowano istotny wpływ genotypu na cechy jakościowe, takie jak indeks glutenu i liczba opadania. Analiza CART podkreśliła znaczenie cech strukturalnych kłosa w stabilności wielocechowej.

Dla pszenicy ozimej przeanalizowano 55 odmian w 60 środowiskach w ciągu pięciu lat, oceniając pięć kluczowych cech jakości i plonu. Wariancja Shukli wskazała na stabilność odmian takie jak SY Yukon i Bataja, natomiast MTSI wyłonił Medalistkę i KWS Spencera jako liderów stabilności wielocechowej. Analiza CCA powiązała stabilność plonowania z odpornością na mączniaka prawdziwego i rdzę brunatną, a stabilność jakości ziarna – z mrozoodpornością i odpornością na wyleganie. Cechy środowiskowe, takie jak pojemność wodna gleby i zawartość gliny, miały istotny wpływ na poziom stabilności.

W przypadku żyta ozimego przebadano 16 odmian w trzech lokalizacjach i dwóch sezonach, na przeciętnym i wysokim poziomie intensywności agrotechniki. Odmiany mieszańcowe wykazywały wyższy plon (średnio +24%), lecz niższą zawartość białka i mniejszą stabilność. Analiza CART wskazała odporność na septoriozę i tolerancję na glin jako kluczowe czynniki determinujące stabilności.

Podsumowując, zastosowane metody MTSI, CART i CCA skutecznie wspomagają ocenę stabilności odmian i stanowią cenne narzędzie w projektowaniu strategii hodowlanych dla zbóż odpornych na zmienność klimatyczną.

Słowa kluczowe: Interakcja genotyp $\times$ środowisko; wskaźnik stabilności wielo cechowej (MTSI); wariancja stabilności Shukli; drzewo klasyfikacyjne i regresyjne (CART); kanoniczna analiza korespondencji (CCA); analiza farinograficzna; plon ziarna; zawartość białka w ziarnie; jakość ciasta i pieczywa; adaptacja odmian; zmiany klimatyczne; intensywność zarządzania uprawą; odmiany mieszańcowe vs. populacyjne; bezpieczeństwo żywnościowe; stabilność zbóż; żyto; pszenica.

Skróty i akronimy: Twardość miękiszu (CH), rozwój ciasta (DD), zmiękczenie ciasta (DSF), stabilność ciasta (DS), wydajność mąki (FY), indeks glutenu (GI), zawartość popiołu w ziarnie (AC), zawartość białka w ziarnie (PC), plon ziarna (GY), liczba opadania (FN), intensywne zarządzanie uprawą (HIM), objętość bochenka (LV), umiarkowane zarządzanie uprawą (MIM), masa 1000 ziaren (TGW), liczba jakościowa (QN), wchłanianie wody (WA), zawartość glutenu mokrego (WG), wartość sedymentacyjna Zeleny'ego (SV); CART – drzewa klasyfikacyjne i regresyjne; MTSI – wskaźnik stabilności wielo cechowej