

Tartamkísérletek tervezése és analízise – Győrffy Béla (1928–2002) emlékére ajánlom –

BERZSENYI ZOLTÁN
Agrártudományi Központ
Mezőgazdasági Intézet, LKH, Martonvásár

Összefoglalás

A tartamkísérletek nélkülözhetetlenek a különböző növénytermesztési eljárások és technológiák tartamhatásának tanulmányozásában. Győrffy Béla által Martonvásáron beállított tartamkísérletek több mint 60 évesek és a nemzeti vagyion részének tekintendők. A tartamkísérletek (LTE) parcelláin a méréseket általában minden évben elvégezzük a termés és más növénytulajdonságok esetében. Míg az ANOVA használata az ismételt mérési adatokra speciális esetekre korlátozódik, a többváltozós módszereken alapuló más statisztikai eljárások sokkal realisabbak. Megfelelőbb alternatíva a kevert (mixed) modell analízis, felhasználva az REML módszert. Vetésforgó tartamkísérletben tanulmányoztuk a búza és kukorica vetésforgók vs. monokultúra többváltozós elkülönítését, felhasználva a diszkriminanciaanalízist. Különböző trágyázási kezelések és az év hatását a kukorica termésére kukorica monokultúra és kukorica-búza dikultúra kísérletekben tanulmányoztuk.

Kulcsszavak: kukorica, búza, vetésforgó, trágyázás, stabilitásanalízis, meta-analízis

Design and analysis of long-term experiments – in memoriam Béla Győrffy (1928–2002) –

Z. BERZSENYI

Agricultural Research Centre

Agricultural Institute, ELKH, Martonvásár

Summary

Long-term experiments are indispensable for the analysis of the long-term effects of various crop production methods and technologies. The long-term experiments have been set up in Martonvásár by Győrffy Béla more than 60 years ago and can be considered as part of the national heritage. Measurements made on plots of long-term experiments (LTE) are generally taken each year in the case of crop yield and other plant measurements. While the ANOVA procedure may be applied to repeated measurement data, under restrictive assumptions, other statistical procedures based on multivariate methods are more realistic. A more satisfactory alternative is to perform a mixed model analysis using REML (residual maximum likelihood) methodology. In the long-term crop rotation experiment, we analysed the multifactorial distinction between the wheat and maize crop sequences vs. continuous cropping using discriminant analysis. The effect of various fertiliser treatments and the year on the yield of maize was studied in long-term maize monoculture and maize-wheat diculture experiments.

Keywords: maize, wheat, crop rotation, fertilisation, stability analysis, meta-analysis

Bevezetés

A tartamkísérletek úgy definiálhatók, mint nagyméretű, több mint 20 éves szántóföldi kísérletek, amelyekben tanulmányozzuk a növénytermesztési tényezőket, a tápelem-ciklusokat és a mezőgazdaság környezeti hatásait. Forrásként szolgálnak a mezőgazdasági fenntarthatóság biológiai, biogeokémiai és környezeti dimenzióinak értékelésére; a jövőbeni globális változások előrejelzésére; és a modell alkalmazás és teljesítmény ellenőrzésére (*Rasmussen et al.* 1998). Tartamkísérletek a világ számos országában vannak

és a jelenleg rendelkezésre álló legnagyobb időbeni és térbeni adatbázist képezik az ökoszisztéma változás meghatározására.

A tartamkísérletek közös jellemzője, hogy ugyanazokat a kezeléseket ugyanazonokon a parcellákon állítjuk be minden évben, a kezelések időbeni, ún. tartamhatásának tanulmányozása céljából. A tartamkísérletek időtartama függ a kutatás céljától és változik néhány évtizedtől egészen akár 180 évig (Rothamsted). A legrégebbi hazai tartamkísérletek (pl. Martonvásáron, Keszthelyen stb.) több mint 60 évesek, az újabbak (Debrecen) napjainkban 40 évesek.

Egyéves kísérletektől a tartamkísérletekig

Egyéves kísérletek

Rendszerint korlátozza az egyéves kísérleteket, hogy csak egyetlen tenyészidőszakra terjednek ki. Ismételhetők a kísérletek több évben – rendszerint eltérő randomizációval (több helyen beállított kísérletekhez hasonlóan). Olyan kezelésekre korlátozódik, melyeknek közvetlen hatásuk van, és/vagy azokra, melyek egy tenyészidőszakon belül alkalmazhatók. Több agronómiai tényező esetében (vetésforgók, tápanyag feltöltés, inputok kumulatív hatásai stb.) legalább többéves kísérletekre van szükség.

Többéves kísérletek

Lényegében ugyanaz, mint a több helyen beállított kísérlet, azonban a különbségek elsődlegesen a klímával függnek össze inkább, mint más környezeti faktoral. Ideálisan megtartja a blokkstruktúrát, valamint ugyanazt a kezelésstruktúrát, azonban új randomizációval minden évben/helyen. Ha ugyanazon a helyen állítjuk be, akkor több óvatosság szükséges, a különböző kezelések várható hatásától függően. Ha a kezeléseknak csak egyetlen évben van hatása, akkor önálló randomizáció végezhető minden évben (hogy elkerüljük a kezdeti randomizációval összefüggő bármely befolyást). Ha reziduális hatások (utóhatások) lehetősége áll fenn, akkor a kezelések sorozatát több éven keresztül együtt kell tervezni (sor-oszlop elrendezés alapján), hogy az előző kezeléseknak a hatásait becsülni tudjuk. Ha kumulatív hatások érdekelnek bennünket, akkor a kezeléseknak fix helyen kell maradni, azonban óvakodjunk attól, hogy ismételt mérésenként analizáljuk az egyes éveket.

Tartamkísérletek (LTE)

Elsődleges értéke ott van, ahol a kezeléseknek van bizonyos időbeni eleme. A kezelések eltérő időben történő alkalmazása (McRae és Ryan 1996) eltérő típusú információt nyújt – első évben: csak közvetlen és reziduális hatások; minden évben: kumulatív hatások; fix intervallumok: közvetlen, reziduális és kumulatív hatások; rotáció: közvetlen, reziduális és kombinált hatások. Ezenkívül a kezelések változhatnak a tartamkísérletek különböző időszakai között, potenciálisan közvetlen, reziduális és kombinált hatásokat nyújtva.

A tartamkísérletek tervezésének alapelvei

Ideálisan az összes standard alapelvet követni kell. Az *ismétlés* és a randomizáció egyaránt szükséges, hogy a kísérleti hiba becslését kapjuk. Mivel a kezelések kumulatív hatása nő az idő folyamán, az ismétlések számának nem kell olyan nagyra lenni, mint a rövid idejű kísérletekben. Ismételt mérések (pl. növény termése) az idő folyamán ritkán tekinthetők valódi ismétlésnek. Nincs randomizációja a faktor szinteknek ezekben a mérési időkben és ezáltal nem jelentik a kezelések ismétlését. Mivel a parcella maradékok nem függetlenek időben, a sorozatkorrelációk rendszeresek. *Randomizáció* – óvatosság szükséges a kezelések meghatározásakor (vetésforgó-sorrendek, növény-specifikus inputok) és ezáltal a randomizációs struktúra meghatározásakor. Lehetséges a randomizáció változtatása az időszakok között (kezelések változtatásától függően). A parcellákból *blokkok képzése* csökkenti a kísérleti hibát azáltal, hogy eltávolítja a gradiens hatásokat a tábla variációjának tulajdoníthatóan. Jó stratégia, hogy robusztus blokk struktúrát választunk, amely lehetővé teszi a környezeti gradiens figyelembevételét bármely vagy mindkét irányban. Komputer programok állnak rendelkezésre, melyek kiegyensúlyozott elrendezést generálnak mindkét irányban. *Reprezentatív struktúra* – fontos és valószínűleg egyre fontosabb annak biztosításában, hogy egy tartamkísérlet aktuális maradjon, lehetővé téve a módosítást, mielőtt a kezdeti célok teljesültek. *Alkalmazkodóképesség* (adaptációs képesség) – tervezzük úgy a kísérletet, hogy a későbbiekben legyen lehetőség a kezelés struktúra módosítására. *Az eredeti kísérleti elrendezés rugalmassága* – az időbeni változtatások megkülönböztetik az LTE-t a többi szabadföldi kísérlettől. Az LTE változtatásának módjairól Leigh et al. (1994)

és *Poulton* (1996) számolt be a rothamstedi kísérletek példáján. Legfontosabbak: 1. minimális változtatások a kezelésekben vagy a növényápolásban, hogy biztosítsuk a kísérlet hosszú élettartamát; 2. a fő célok megtartása, azonban az innovációk beépítése a mezőgazdasági gyakorlatba (fajták váltása, tápanyagszintek módosítása, betakarítási módszerek és növényvédelmi eljárások megváltoztatása); 3. a cél megváltoztatása és a kísérlet folytatása eltérő formában.

Az ilyen változtatások a kísérleti tervek részét kellene, hogy képezzék úgy, hogy a későbbi kezelések ne akadályozzák meg az eredeti kezelés összehasonlításokat. Lehetséges stratégiák: (i) ha az LTE-t a parcella felosztásával módosítjuk, akkor a kezdeti parcellák mérete lehetőleg nagy legyen; (ii) tartsunk extra kontroll (standard kezelés) parcellákat, melyek átalakíthatók másodlagos kezelésekké, úgymint herbicid kezelés vagy kártevő szabályozás; (iii) építsünk be egy extra faktort a meglévő faktoriális kísérletbe; (iv) alkalmazzuk a másodlagos kezelést az egész kísérletben, képezve egy split-plot elrendezést.

Győrffy Béla (1986) a martonvásári tartamkísérletek alapítója a fentiekkel kapcsolatban a következőket írta: „*Tartamkísérletekkel foglalkozni egyidejűleg hálás és háládatlan feladat. Hálás, mert adatainkat az idő függvényében tudjuk elemezni. Veres Péter szavaival élve: „Úgy tudunk a mával foglalkozni, amint jön a tegnaptól és megyen a holnapba...”. Háládatlan, mert mindig szembe kell nézni 3-4 évtized előtti önmagunkkal. Utólag csak nézeteinket, de érdemben kísérleteinket nem változtathatjuk.*”

Célok és célkitűzések. Mint minden kísérletnél, fontos világosan azonosítani a célokat, amikor új tartamkísérlet tervezését kezdeményezzük. Magában kellene foglalni az analízis tervezett módszereit. Az analízisnek többféle módszere lehet, megválaszolva különböző kérdéseket és felhasználva különböző adatokat. Mint minden kísérletnél, a céloknak elő kell segíteni a kezelések (kezeléskombinációk) azonosítását, melyeket beállítunk. Ez elvezethet egy faktoriális kísérletsorozathoz és ezáltal lehetővé teszi az eredmények analízisét, követve ezt a struktúrát. A kezelések alternatív módon úgy tekinthetők, mint amelyek több különböző rendszert azonosítanak. Egy alternatív analízis számba veheti, hogyan függnek össze az outputok az inputok kombinációjával, melyeket meghatároznak a kezelés faktor szintek

kombinációi. Ezáltal jobb megértését adják azoknak a rendszereknek, mintha csupán a különböző kezeléskombinációk közötti különbségre fókuszálnánk (főhatásokban és interakciókban kifejezve).

Tartamkísérletek különböző típusai. A tartamkísérletek három különböző típusát azonosították, melyek különböző analízis megközelítéseket indokolnak. (i) Tartamkísérletek időben konstans kezelésekkel: a hangsúly az ismételt kezelések közvetlen, kumulatív hatásain és utóhatásán van. Óvatosságra van szükség ezeknek az adatoknak az analízisekor. Fennáll a lehetősége annak, hogy az előző évek reakciói hatással vannak a reakcióra minden évben - a reakciók lehet, hogy nem függetlenek. A megközelítés függ az autokorreláció bizonyosságától. (ii) Tartamkísérletek időben változó kezelésekkel: a fókuszálás a rotációkon van, összehasonlítva mind az egyes növényeket ezeken belül és mind a rotációk kombinált hatását. (iii) Tartamkísérletek, melyek a rendszerváltozásra irányulnak: ahol az érdeklődés a különböző (termesztési) rendszerek teljesítménye iránt van, tervezhetjük a kezeléseket úgy, mint rendszereket. Egy alternatív megoldás a különböző rendszerekre, hogy az input faktorok kombinációjából képezzük. Mindkét esetben azonban modellezhetjük a reakciókat úgy is, mint input változók függvényei.

Beállítani a kezeléseket egyidejűleg minden parcellán megfelelő a legtöbb LTE esetében. Néha azonban a lépcsőzetes kezdés előnyben részesíthető. Vetésforgó kísérletekben egy lépcsőzetes kezdet szükséges lehet, hogy reprezentatív növényt kapjunk minden évben. A lépcsőzetes kezdet az időjárási körülmények tágabb mintázatát adja, így az eredmények általánosabbak lesznek a blokkokon és az időjárási körülményeken keresztüli ismétlésnek tulajdoníthatóan.

Tartamkísérletek analízise

Az adatok (pl. termés) egy tartamkísérletből minden kezelt parcellán végzett ismételt mérések formájában vannak. Mivel a talajtermékenység és a parcellára jellemző más faktorok a különböző években korrelálnak, ugyanazon a parcellán mért termésekről logikusan nem feltételezhető, hogy független hibákkal rendelkeznek. A reziduumok (maradékok) közötti korrelációkat egyik évről a másikra, *sorozat korrelációnak* ('serial correlation') hívjuk. A sorozat korreláció fontosságának becslése a tartamkísérletek analízisének

elválaszthatatlan része. Még a tartamkísérletekkel összefüggő egyedülálló probléma (a fix és random hatások keveredése) nélkül is, az időben ismételt mérési adatok egy speciális kihívást jelentenek a statisztikai analízisben.

Ugyanazon a parcellán végzett ismételt mérések analízisére számos lehetséges megközelítés történt. *Webster és Payne* (2002) áttekintést ad az ismételt mérési adatok érvényes statisztikai analíziséről. *Loughin* (2006) és *Loughin et al.* (2007) bemutatja a tartamkísérletek javított statisztikai analízisét, felhasználva a standard elrendezést, továbbá a tartamkísérletek javított tervezését és analízisét. A legáltalánosabb módszerek közé tartoznak: (I) összegező statisztikai mutatók, (II) Varianciaanalízis (ANOVA) és a kevert (mixed) modellek (REML), (III) stabilitásanalízis, (IV) többváltozós módszerek és (V) meta-analízis.

Összegező statisztikai mutatók

Az ismételt mérésekből származó adatokat analizálhatjuk először úgy, hogy minden egyes parcellára valamilyen összegező statisztikai mutatót számítunk ki. Például, tételezzük fel, hogy a reakció változó a növény termése. Ekkor az átlagos (vagy az összes) termést a vizsgált időszakban használjuk fel arra, hogy összehasonlítsuk a különböző kezelésben részesült parcellák általános produktivitását. A termés időbeni változása felhasználható annak meghatározására, hogy a kezelések hasonló trendeket követnek-e. Az ilyen mutatók úgy kezelhetők, mint reakció-változók és analizálhatók a hagyományos módszerekkel, mint amilyen a varianciaanalízis, regresszióanalízis, vagy az általánosított lineáris modellek ('generalized linear models' - GLM). Terjedelmes szakirodalom áll rendelkezésre a hazai tartamkísérletek adatai alapján a búza, kukorica és más növények agrotechnikai reakcióinak vizsgálatáról (pl. *Debreczeni és Németh* 2009, *Széles et al.* 2019, *Izsáki* 2021, *Nagy* 2021, *Pepó* 2022). Az összefoglaló mutatók hibájának becslése csupán a kísérletben alkalmazott randomizáción alapszik; nem szükségesek feltételek vagy ismeretek az ismételt mérések kovariancia struktúrájáról. Jegyezzük meg, hogy ha több összegező mutatót választunk, valószínűtlen, hogy egymástól függetlenek legyenek.

Kumulatív terméselemzés

Hazai viszonylatban nagyon népszerű és általánosan elfogadott *Sváb* (1981) által a tartamkísérletekre kidolgozott kumulatív terméselemzési módszer. A

kumulatív módszer lényege az, hogy (a) évenként képezzük a kezelések és báziskezelések közötti terméskülönbséget, (b) majd ezeket a különbségeket ugyancsak évenként kumuláljuk. A nem kumulált különbségek a kezelések egyenkénti és évenkénti hatását fejezik ki a báziskezeléshez képest. A kumulált terméskülönbségek azt mutatják meg, hogy a t-edik évben mennyi valamely kezelés összes terméskülönbsége a báziskezeléshez viszonyítva.

Rowell és Walters (1976) javasolta a polinomiális egyenletek illesztését minden egyes parcella időbeni mérési adataihoz, és ezt követően az egyenletek becsült koefficienseinek reakcióváltozóként történő felhasználását. Valószínűtlen ennek megfelelése a koefficiensek közötti korreláció miatt. Mindazonáltal összefoglaló statisztikai mutatók használata elkerüli a kísérleti egységen (parcellán) belüli korrelációk modellezésének problémáját. Valóban, a polinomokra egy alternatíva a *random koefficiens modell illesztése*, amely becsüli mind a koefficienseket, mind pedig a köztük levő korrelációt. Mindkét megközelítés azonban feltételezi, hogy az időbeni reakció megfelelően modellezhető polinomokkal.

Évenkénti és kombinált varianciaanalízis

Az ANOVA használata az LTE analízisére néhány speciális esetre korlátozódik. Felhasználható a kumulatív kezeléshatások összehasonlítására meghatározott fix időpontokban, vagy két fix időpontban (mint a periódus kezdete és vége) vagy egy időszak átlagos hatásának vizsgálatában. Stabil körülmények között az ANOVA felhasználható, hogy összehasonlítsuk a kísérletsorozatokat közvetlen és utóhatásait, melyeket különböző periódusokban alkalmaztak. Ha az ANOVA-t ismételt mérésekre használjuk ugyanazon a parcellán több éven keresztül, az évekként, mint alparcella faktorral, az analízis nagy valószínűséggel érvénytelen. Az ANOVA alapját a független hatások modellje, a 'compound symmetry' speciális korrelációs modell képezi. Az ismételt mérésekre általában a sorozat korrelációk jellemzőek (vagyis nem függetlenek).

Már *Cochran (1939)* felismerte, hogy a tartamkísérlet adatok olyanok, mint az osztott parcellás elrendezésből származó adatok. Ugyanakkor ténylegesen nem javasolta az ismételt mérések analízisét úgy, mintha osztott parcellás elrendezésből származnának, mivel az értelemszerűen feltételezi, hogy a korreláció minden idő-pár között egyenlő. Az időben megismételt kísérletek értékelési módszerének formai átvételét *Sváb (1981)* is hibásnak tartotta. Ennek ellenére, az ismételt

mérési adatok osztott parcellás analízise, amelyben az idő (év) az alparcella faktor (és természetesen nem randomizált), virágkorát élte a 20. század utolsó évtizedeiben (Steel és Torrie 1980, Petersen 1994). Ez a megközelítés jogosan kritizálható, főleg azon az alapon, hogy a randomizációs teóriával nem igazolható (pl. Yates, 1954). Népszerűsége abból ered, hogy az analízis viszonylag egyszerű. A split-plot modell nagyon egyszerű korrelációs struktúrát tartalmaz az ismételt mérésekre, ezért használata a tartamkísérletek adatsorozatainak analízisére kevésbé javasolható.

A tartamkísérletek elemzése kevert (mixed) modellekkel

Az ismételt mérések analízisének figyelembe kell venni a korrelációt a mérések között ugyanazon a kísérleti parcellán. Több különböző típusú modell van, amelyek a korrelációs struktúrát leírják (pl. az autoregresszív, 'compound symmetry', 'antependence' stb.). Ezek a korrelációs struktúrák specifikálhatók a *mixed modellben*, amely a fix hatásokat és a random hatásokat egyaránt modellezi (Payne 2000). Az utóbbi időben megnőtt a népszerűsége az ismételt mérésekkel kapcsolatos korrelációs struktúra modellezésének a mixed modellek keretében. Három fő előnye: (i) a korrelációs modellek jelenléte, (ii) számos hibátényező beépítésének lehetősége és (iii) az inkomplett blokk elrendezések adatainak analízise. Számos módszer van a variancia komponensek becslésére. A 'Residual' vagy 'Restricted Maximum Likelihood' (REML) a standard módszer a legtöbb mixed modell programban (Piepho et al. 2003).

A mixed modellek kiterjeszthetők, hogy figyelembe vegyék a nem normális eloszlású adatokat. A kiterjesztés általánosított lineáris mixed modelként ('generalized linear mixed model') ismert és rendkívül fontos problémás adatoknál, amilyenek a megszámlált adatok (pl. gyomok és rovarok) és a százalékban kifejezett méréseknél (pl. betegség előfordulása, gyomborítottság, kelési arány stb.) (Piepho et al. 2003). A statisztikusok a tartamkísérletek többéves adatsorozatainak analízisére elsősorban a mixed(kevert) modellt javasolják és tartják elfogadhatónak.

Stabilitásanalízis

A termesztés fenntarthatósága csak meghatározott időperiódus relációjában mérhető, és a rendszer fenntarthatóságára ható fontos trendek nyilvánvalóvá

válnak az első 20–40 évben (*Barnett et al.* 1995). A termesztés fenntarthatóságának fontos mutatója a stabilitás. A termésstabilitás időbeni mérése magában foglal legalább három komponenst: (1) átlagos termésszint, (2) a termés variabilitása és (3) a termés összefüggése a helyi környezettel (*Mead et al.* 1986). Az átlag (fix, azaz szisztematikus hatás) és a variancia (random elem) a két fő komponens, amely leírja egy termesztési rendszer reakció mintázatát. *Berzsenyi* (2022) a kísérleti kezelések stabilitását egyváltozós (variancia és regresszió mutatók) és többváltozós (AMMI modell) módszerével vizsgálta. *Piepho* (1998) a stabilitás mutatókat a fix és random komponenseket egyaránt tartalmazó modell keretében tárgyalja.

A stabilitásanalízist korábban ritkán alkalmazták a növénynevelés területén kívül. *Hildebrand* (1984) és *Raun et al.* (1993) felhasználták a stabilitásanalízist tartamkísérletben a trágyázási kezelések értékelésére. *Berzsenyi* és *Győrffy* (1995, 1996, 1997) a stabilitásanalízis variancia- és regressziós módszerével tanulmányozta a különböző termesztési tényezők, valamint a vetésforgó és a trágyázás hatását a kukorica, illetve a búza termésstabilitására tartamkísérletekben. *Nagy et al.* (2003) a stabilitásanalízis regressziós módszerével vizsgálta a műtrágyázás és a talajművelés hatását a kukorica termésstabilitására.

A stabilitásanalízis többváltozós módszereihez tartozó AMMI (additív fő hatás és multiplikatív interakció) modell integrálja a varianciaanalízist és a főkomponensanalízist (*Crossa* 1990). Az AMMI analízis első részében a varianciaanalízis az összes variációt három ortogonális forrásra bontja fel: genotípus (G), környezet (E) és genotípus × környezet interakció (G × E). Az AMMI analízis második részében a főkomponensanalízis (PCA) a G × E interakciót több ortogonális főkomponens-változóra (PCA tengelyre) bontja fel.

Vetésforgó kísérletek analízise REML modell alapján

A 'Residual or Restricted Maximum Likelihood' (REML) módszer a lineáris kevert modellek analízisére lehetővé teszi az évenként eltérő maradék (reziduális) varianciák becslését a kombinált analízis során. Az REML használatát a rotációs kísérlet analízisére *Payne* (2016) mutatta be. A rotációs kísérletek analízisének hasonló módszereket használunk, mint a többi szántóföldi kísérletnél, figyelembe kell azonban venni néhány sajátosságot: 1. Az eredményeket több évben rögzítjük és ezek különböző nagyságú variációt

mutatnak. 2. Ugyanazon a parcellán a méréseket több éven keresztül végezzük és az eredmények nem egyforma korrelációs struktúrát mutathatnak. A korrelációk a megfigyelések között csökkennek a nagyobb időbeni távolsággal. 3. Egy növény hatása függhet attól, hol helyezkedik el a rotációs cikluson belül. 4. Lehet, hogy nincs más ismétlés, mint az évek. 5. A kezeléshatások kumulálódnak vagy csökkennek a kísérlet időszakában. Az alapkezelések (műtrágyák, növénytermesztési eljárások, peszticidek stb.) vagy akár a rotációk összetétele változhat a kísérlet során, hogy lépést tartsunk az elfogadott termesztési gyakorlattal. Az első lépés az analízisben, létrehozni megfelelő random modellt. Miután a megfelelő random modellt meghatároztuk, a kezelés modell becsülhető, hogy lássuk, van-e szükségtelen fix tag. A standard módja ennek, hogy megvizsgáljuk a Wald statisztikákat. A végső fix modell tartalmazza a szignifikáns fő hatásokat és interakciókat, valamint az előre jelzett átlagokat és a SED (különbségek standard hibája) értékeket.

Többváltozós módszerek

Míg a legtöbb tartamkísérletben egy elsődleges reakcióváltozó (pl. termés) van, fokozódik az érdeklődés, hogyan hatnak a (termesztési) rendszerek a többféle outputra. Analizálhatjuk minden egyes outputot külön-külön, éveken át vagy kezeléseken keresztül (felhasználva modell megközelítéseket). Azonban valóban érdekesek a kompromisszumok (kiegyenlítődések) és a szinergizmusok, melyeket különböző kezelések (rendszerek) generálnak. Lehetséges azonosítani „jobb” rendszereket, melyek „optimalizálják” az outputokat. A modell összefüggések számba tudnak venni különböző rendszereket (regresszió csoportokkal). A többváltozós módszerek (főkomponens analízis) lehetővé teszik több változó közötti kapcsolatok egyidejű becslését, rendszerek többváltozós elkülönítését (diszkriminancia analízis) a kezelések tág tartományán keresztül. Azonosítják az outputok hasonló sorozatával rendelkező kezeléseket. Azonosítják azokat az output változókat, amelyek összefüggnek (szinergizmus) vagy ellentétes reakcióval rendelkeznek (kompromisszum) az adatsorozatban.

Meta-analízis

A tartamkísérletek adatainak meta-analízise felhasználható közös tervezésű és kezeléssorozatú; hasonló tervezésű és hasonló kezeléssorozatú; hasonló célú,

azonban nem közös tervezésű tartamkísérletek elemzésére (*Maclaren et al.* 2022). Szükség van közös mérőszámokra, vagy az adatok transzformációjára közös skálára. Szükség van továbbá közös kezelésekre vagy a kezelések transzformációjára egy közös index sorozatba. Többváltozós megközelítés (pl. PCA) segíthet a kezeléssorozatok összehasonlításában (változó vektorok konfigurációjának vizsgálata). *Mead* (2023) három lépésből álló meta-analízist javasol: 1. Definiáljunk közös kezelés indexeket, 2. Becsült átlagok és varianciák minden kezelésre minden tartamkísérletben, felhasználva a lineáris mixed modellt, 3. (log) terméсарányok meta-analízise. Minden tartamkísérletre és tesztnövényre több páros kontrasztot számítunk ki (pl. referencia és összehasonlítandó kezelés).

Több közös kísérlet kombinált meta-analízise történhet az REML eljárással. A cél az, hogy a kezeléshatások becslését kapjuk az összes rendelkezésre álló információ felhasználásával. A meta-analízisnek ez a formája adja a leghatékonyabb becslést, feltéve, hogy az eredeti részletes adatok rendelkezésre állnak. Ahhoz, hogy a kombinált analízis érzékeny legyen, a kísérleteknek hasonló kezelés struktúrával kell rendelkezni és néhány kezelésnek azonosnak kell lenni a kísérletekben.

Anyag és módszer

A tartamkísérleteket Győrffy Béla a kutatóintézet kísérleti területén, Martonvásáron állította be. A kísérleti terület talaja a szántott rétegben enyhén savanyú, felvehető foszforral gyengén és káliummal jól ellátott humuszos vályog, típusa erdőmaradványos csernozjom.

A vetésforgó kísérlet kezelései

A vetésforgó kísérletet 1961-ben állították be kéttényezős, osztott parcellás elrendezésben, négy ismétlésben. A főparcellákat a növényi sorrendek, az alparcellákat a trágyakezelések képezik. A főparcella hét növényi sorrendet foglal magában: 1. Kukorica monokultúra, 2. Búza monokultúra, 3. 3 év lucerna - 5 év kukorica, (KL), 4. 3 év lucerna - 5 év búza (BL), 5. 2 év búza - 2 év kukorica (KB), 6. 3 év lucerna - 3 év kukorica - 2 év búza (KBL), 7. Kukorica - tavaszi árpa - borsó - búza (NF). A kukorica, illetve a búza részaránya a vetésforgótól függően 25%, 37,5%, 50%, 62,5% és 100%.

A kísérlet alparcellái öt eltérő trágyázási rendszert képviselnek. A: Kontroll, trágyázás nélkül, B: 60 t/ha istállótrágya 4 évenként + NPK kiegészítés, C: 5 t/ha szalma, illetve 7 t/ha kukoricaszár évente + NPK kiegészítés, D: a növény által felvett NPK műtrágya, E: Felvett NPK, 15 t/ha kukorica és 10,5 t/ha búzaterméshez.

A trágyázási tartamkísérletek kezelése

A trágyázási kísérleteket kukorica - búza dikultúrában 1958-ban, kukorica monokultúrában 1959-ben, közvetlenül egymás mellett állította be Győrffy Béla. A kukorica - búza dikultúra kísérletben a növényi sorrend 2 év kukorica, 2 év búza. Mindkét kísérletet latin négyzet elrendezésben állították be, a monokultúra kísérletet hét kezeléssel, a dikultúra kísérletet hat kezeléssel.

A kukorica monokultúra kísérlet kezelése az alábbiak (2-7. kezelés négy évenként): 1. Kontroll, trágyázás nélkül; 2. 35 t/ha istállótrágya; 3. 17,5 t/ha istállótrágya + NPK műtrágya kiegészítés ($N_{1/2}P_{1/2}K_{1/2}$); 4. 35 t/ha istállótrágya hatóanyagának megfelelő mennyiségben NPK műtrágya ($N_1P_1K_1$); 5. 70 t/ha istállótrágya; 6. 35 t/ha istállótrágya + NPK műtrágya kiegészítés ($N_1P_1K_1$); 7. 70 t/ha istállótrágya hatóanyagának megfelelő mennyiségben NPK műtrágya ($N_2P_2K_2$).

A kukorica - búza dikultúra kísérlet kezelése az alábbiak (2-5. kezelés négy évenként): 1. Kontroll, trágyázás nélkül; 2. 35 t/ha istállótrágya; 3. 17,5 t/ha istállótrágya + NPK műtrágya kiegészítés ($N_{1/2}P_{1/2}K_{1/2}$); 4. 35 t/ha istállótrágya hatóanyagának megfelelő mennyiségben NPK műtrágya ($N_1P_1K_1$); 5. 35 t/ha istállótrágya N-tartalmának megfelelő N-műtrágya (N_1) 1981-ig, 1982-től $N_2P_2K_2$; 6. 35 t/ha istállótrágyában levő N-nek kétszeres mennyisége, a P_2O_5 és K_2O tartalmának fele ($N_2P_{1/2}K_{1/2}$) 1981-ig, 1982-től $N_{160}P_{320}K_{320}$ évente.

Kumulatív terméselemzés

A kumulatív terméselemzés módszerében évenként képeztük az egyes kezelések és a báziskezelés közötti terméskülönbségeket, majd ezeket a különbségeket ugyancsak évenként kumuláltuk. Báziskezelésnek a 2. kezelést (35 t/ha istállótrágya négyévenként) választottuk. A kumulált terméskülönbségek statisztikai analizéséhez az REML (lineáris kevert mixed modell) 'random coefficient regression' módszerét választottuk (Payne *et al.* 2016). A módszer egyidejűleg modellezi az egyes kezelésekre adott reakciók időbeni változását lineáris vagy

másodfokú, illetve magasabb fokú polinom függvény illesztésével. Az analízis megadja az SED és a becsült LSD értékeket a vizsgált időszakra, illetve minden előre jelzett évre.

Stabilitásanalízis

A többváltozós AMMI modell varianciaanalízisében a kezelések képezték a genotípusokat, az évek a környezetet és a blokkok az ismétléseket. Az AMMI analízis második részében a kísérleti kezelések stabilitását az I. főkomponens értékek és a termésátlagok (Y és X tengely) koordináta rendszerében ábrázoljuk.

Diszkriminanciaanalízis

A diszkriminanciaanalízis a csoportok elválasztását maximalizáló többváltozós módszer, több kvantitatív változó együttes figyelembevételével. A többcsoportos modellben egy időben több vetésforgó és a monokultúra termését hasonlítottuk össze. Ebben a vizsgálatban, vetésforgótól függően 5-15 kísérleti év adatai szolgáltak alapul. A búza és kukorica forgókat mindkét modellben elkülönítetten vizsgáltuk. Minden vetésforgót és monokultúrát az eltérő tápanyag-visszapótlási rendszereket képviselő öt trágyázási kezelésre (A-E) adott termésreakcióval, mint kvantitatív változóval jellemeztük. A csoportcentroidok közötti különbséget Wilks-lambda mutatóval és F-próbával vizsgáltuk (Berzsenyi és Lap 2002).

Meta-analízis

A kukorica monokultúra és a kukorica-búza vetésforgó kísérletek adatsorozatából 22 évben volt mindkét kísérletben kukorica. A kezelések közül az 1-4. kezelés volt közös a két kísérletben. A két kísérlet kombinált analízisére a meta-analízist az REML módszerrel választottuk. A monokultúra és a vetésforgó 22 évi adatsorát külön-külön is analizáltuk.

Eredmények és következtetések

Búza vetésforgók vs. monokultúra csoportátlagok egyenlőségének vizsgálata diszkriminanciaanalízissel (három- és négycsoportos modell)

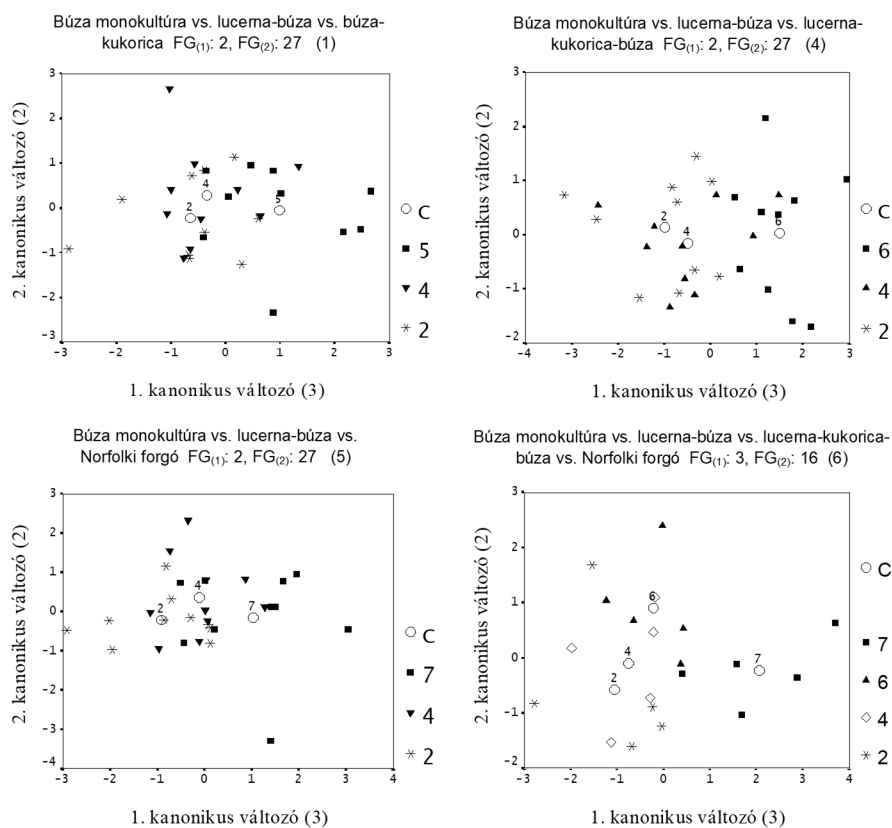
A következőkben a búzakísérlet többcsoportos DA modellel kapott eredményeit mutatjuk be, kétcsoportos modellel kapott eredményekről és a kukoricakísérlet eredményeiről korábbi dolgozatunkban (Berzsenyi és Lap 2002) részletes adatok találhatóak.

A búza monokultúra vs. lucerna-búza vs. búza-kukorica dikultúrák többváltozós összehasonlító vizsgálatára 10 év kísérleti adatai álltak rendelkezésre. A csoportátlagok egyenlőségének vizsgálata (Wilks-lambda, F-érték) nem mutatott ki szignifikáns különbséget egyik változóra sem. A Wilks-lambda χ^2 próbája nem mutatott ki szignifikáns különbséget a csoport-centroidok között (1. ábra).

A búza monokultúra vs. lucerna-búza vs. lucerna-kukorica-búza forgók többváltozós összehasonlításához 10 év kísérleti adatai szolgáltak alapul. A csoportátlagok egyenlőségének vizsgálata szignifikáns különbséget mutatott ki minden változóra. A Wilks-lambda χ^2 próbája azt mutatja, hogy a csoportátlagok P=5%-os szinten különböznek (Wilks-lambda: 0,435). A csoportpárokat összehasonlítva, a lucerna-kukorica-búza trikultúra szignifikánsan különbözött a monokultúrától (F=18,04^{***}) és a lucerna-búza dikultúrától (F=14,03^{***}). A búza monokultúra és a lucerna-búza dikultúra azonban nem különbözött egymástól szignifikánsan (F<1) (1. ábra).

A búza monokultúra vs. lucerna- búza vs. norfolki forgó többváltozós összehasonlítása 10 év kísérleti adatai alapján történt. A csoportátlagok egyenlőségének vizsgálata szignifikáns különbséget mutatott ki az „E” változó kivételével a többi négy változóra. A Wilks-lambda χ^2 próbája nem mutatott ki szignifikáns különbséget a csoportátlagok között. A csoportpárokat összehasonlítva, a norfolki forgó P=1%-os szinten szignifikánsan különbözik a búza monokultúrától (F=11,08^{**}). A búza monokultúra nem különbözik szignifikánsan a lucerna-búza forgótól (1. ábra).

1. ábra. *Búza vetésforgók vs. monokultúra többváltozós elkülönítése diszkriminanciaanalízissel*



Jelölések: C: csoport centroidok; 2: búza monokultúra, 4: lucerna-búza, 5: búza-kukorica, 6: lucerna-kukorica-búza, 7: norfolki forgó (7)

Figure 1. Multivariable separation of wheat crop rotations vs. monoculture using discriminant analysis. (1) Wheat monoculture vs. alfalfa-wheat vs. wheat-maize, (2) 2nd canonical variable, (3) 1st canonical variable, (4) Wheat monoculture vs. alfalfa-wheat vs. alfalfa-maize-wheat, (5) Wheat monoculture vs. alfalfa-wheat vs. Norfolk rotation, (6) Wheat monoculture vs. alfalfa-wheat vs. alfalfa-maize-wheat vs. Norfolk Rotation, (7) Designations: C: group centroids, 2: wheat monoculture, 4: alfalfa-wheat, 5: wheat-maize, 6: alfalfa-maize-wheat, 7: Norfolk rotation.

A búza monokultúra vs. lucerna-búza vs. lucerna-kukorica-búza vs. norfolki forgó többváltozós összehasonlítására 5 év kísérleti adatai álltak

rendelkezésre. A csoportátlagok egyenlőségének vizsgálata (Wilks-lambda, F-érték) szignifikáns különbséget mutatott ki minden változóra. A csoportpárokat összehasonlítva, a norfolki forgó P=0,1%-os szinten szignifikánsan különbözik a monokultúrától és a lucerna-búza forgótól (F=19,89 és F= 16,48), és P=1%-os szinten különbözik a trikulturától (F= 8,71). A Wilks-lambda (értéke 0,396) χ^2 próbája P=0,2%-os szinten szignifikáns különbséget mutatott ki a csoport-centroidok között (1. ábra).

A diszkriminanciaanalízis feltárta a különböző trágyázási rendszerek, mint prediktív változók jelentőségét a vetésforgók és a monokultúra elkülönítésében. A búza vetésforgók és a búza monokultúra összehasonlításakor a diszkriminanciaanalízis szignifikáns különbséget mutatott ki vagy minden változóra (trikultúra, norfolki forgó) vagy az „A” kezelést is magában foglaló két változóra (lucerna-búza dikultúra) vagy az „A” kezelés kivételével minden változóra (búza-kukorica dikultúra). Ebből arra lehet következtetni, hogy a búza vetésforgókban az ún. rotációs hatás nem elsősorban a trágyázás hatásának tulajdonítható, hanem azért más faktorok, folyamatok és mechanizmusok is felelősek. Különösen érvényes ez a megállapítás a búza-kukorica dikultúra és a búza monokultúra összehasonlítására. A csoport-centroidok közötti távolság arányos volt a vetésforgók rotációs hatásával, legnagyobb volt a monokultúra és a trikulturá, illetve a norfolki forgó között.

A diszkriminanciaanalízis fenti eredményei összhangban vannak és részben magyarázatot adnak arra a korábbi vizsgálati eredményünkre, mely szerint a búza vetésforgókban a vetésforgó hatást alapvetően nem módosította a trágyázás, míg kukorica vetésforgókban a trágyázás mintegy felére csökkentette a rotációs hatást (Berzsenyi és Gyórfy 1997, Berzsenyi et al. 2000).

A trágyázás hatásának vizsgálata kukorica monokultúrában

A trágyázás hatását a kukorica termésére monokultúra tartamkísérletben vizsgáltuk az 1959–2009 közötti adatok elemzése alapján. A kísérlet eredményeiről már korábban közölünk adatokat Berzsenyi et al. (2011). Ebben a dolgozatban a kumulatív termés elemzés és stsbilitásanalízis eredményit mutatjuk be.

A trágyázás hatásának vizsgálata kumulatív terméselemzéssel

Az istálló- és műtrágya tartamhatását kukorica monokultúrában a báziskezeléshez (35 t/ha istállótrágya négyévenként) viszonyított kumulált terméskülönbségek alapján a 2. ábra szemlélteti.

2. ábra. Az istállótrágya és a műtrágya kumulatív hatása a kukorica termésére monokultúra tartamkísérletben (1959–2009)

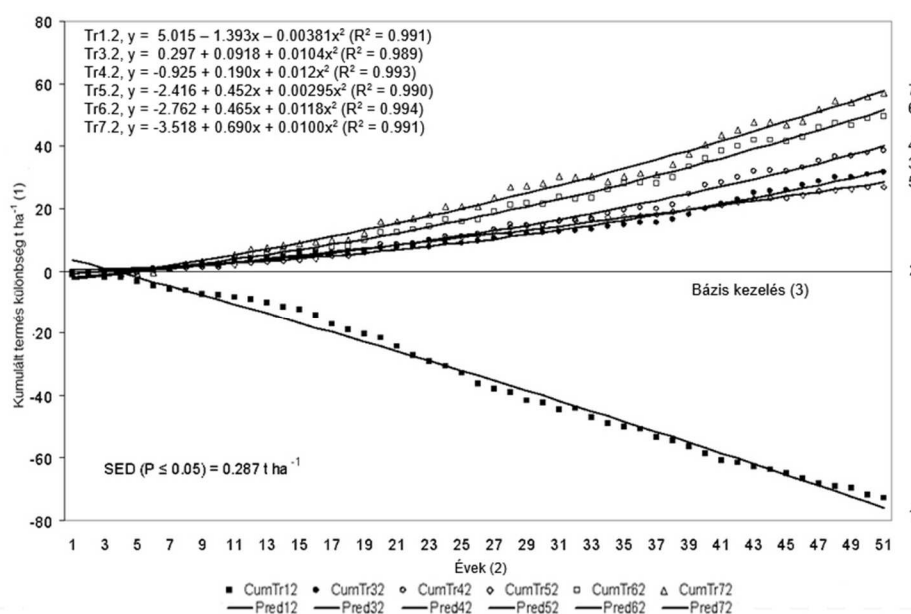


Figure 2. Cumulated effect of farmyard manure and mineral fertiliser on the yield of maize in long-term monoculture experiment (1959–2009). (1) Cumulated yield difference t ha^{-1} , (2) Year, (3) Basic treatment. Treatments: 1. Control, without fertilisation, 2. 35 t ha^{-1} FYM every four years, 3. 17.5 t ha^{-1} FYM every four years + NPK mineral fertiliser ($\text{N}_{1/2}\text{P}_{1/2}\text{K}_{1/2}$), 4. NPK mineral fertiliser equivalent to the active ingredients of 35 t ha^{-1} FYM ($\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$), 5. 70 t ha^{-1} FYM every four years, 6. 35 t ha^{-1} FYM every four years + NPK mineral fertiliser ($\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$), 7. NPK mineral fertiliser equivalent to the active ingredients of 70 t ha^{-1} FYM ($\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$).

Látható, hogy a trágyázás nélküli kontroll évről évre nagyobb termés-csökkenéshez vezet, görbéje fokozatosan lehajlik. Nem lenne értelme évenkénti átlagos termés-csökkenésről beszélni, mert eleinte kicsi, később mind nagyobb az éves termés-csökkenés. Az 51. évben az összes terméshiány

a báziskezeléshez viszonyítva 72,9 t/ha, a legjobb 7-es kezeléshez viszonyítva 129,8 t/ha.

A trágyázási kezelések között az első hét évben semmi különbség, az első tíz évben alig volt különbség. A kezeléshatások a 14. évtől kezdenek elkülönülni. Ez fényesen bizonyítja, hogy trágyázási kísérleteknek csak több évtizedes tartamkísérletekben van értelme.

Tulajdonképpen csak a 7. kezelés, azaz a 70 t/ha istállótrágyát helyettesítő NPK dózis eredménye ugrik ki már a 12. évtől és tartja, később fokozza előnyét a többi kezeléssel szemben. A 6. kezelés, azaz a bázis istállótrágya + NPK kiegészítés a 70 t/ha istállótrágyához viszonyítva a 18. évtől jut fokozatos előnyhöz. A 3-5. kezelés fokozatosan leszakad a 6-7. kezeléstől, hatásukban kezdetben nincs különbség, az utolsó 20 évben viszont a 4. kezelés hatása emelkedik ki. Az 51. évben a báziskezeléshez viszonyítva a kumulált terméskülönbség kezelésenként a következő volt (t/ha): 3. kezelés: 31,6; 4. kezelés: 38,6; 5. kezelés: 26,9; 6. kezelés: 49,5; 7. kezelés: 56,9.

A kumulatív terméskülönbségek statisztikai analízisekor az REML analízis erősen szignifikáns ($P < 0,001$) kezelés, idő (év), illetve kezelés \times idő kölcsönhatásokat mutatott ki. A kezelések időbeni változását másodfokú modell írta le (2. ábra). Az LSD ($P \leq 0,05$) értéke a kumulált terméskülönbségekre és a vizsgált időszakra 0,564 t/ha volt.

A kukorica termésstabilitása a különböző kezelésekből és évekből

AMMI analízis alapján a genotípus, a környezet és a $G \times E$ kölcsönhatás egyaránt erősen szignifikáns ($P < 0,01$) és százalékos részesedésük a kezelés-kombináció SS értékéből sorrendben 19,9%; 68,2% és 10,9%. A vizsgált periódus felbontása csapadékos és száraz évekre rámutatott arra, hogy csapadékos évekből a genotípus (kezelés), száraz évekből a környezet és az interakció hatása nőtt a kezelés kombináció SS-en belül. Megfigyelhető, hogy a környezet hatása volt domináns mindhárom adatsopornál.

A kísérleti kezeléseket hatását a kukoricatermés variabilitására a többváltozós stabilitásanalízis (AMMI) alapján a 3. ábra szemlélteti. Az X tengelyen a termésátlag, az Y tengelyen a kölcsönhatás főkomponens értékek vannak feltüntetve a hét trágyázási kezelésre (G1-G7) és az 51 környezetre (E1-E51) vonatkozóan. A PCA1 értékek az interakció SS 71%-át értelmezték. A 3. ábrán látható, hogy a G1 (kontroll), valamint a G6 (35 t/ha istállótrágya

+ N₁P₁K₁) és G7 (N₂P₂K₂) kezelés járult hozzá legnagyobb mértékben az interakcióhoz, míg a G3 (17,5 t/ha istállótrágya + N_{1/2}P_{1/2}K_{1/2}), a G5 (70 t/ha istállótrágya) és G4 (N₁P₁K₁) kezeléseknek legnagyobb a termésstabilitása. A 3. ábra jól mutatja a környezet (évek) csoportosulását is. A koordináta-rendszer bal alsó negyedében a száraz évek (241 mm csapadék) alacsony terméssel (3,19 t/ha), a bal felső negyedben ugyancsak száraz évek (246 mm csapadék), átlag alatti terméssel (4,33 t/ha) találhatók. A koordináta-rendszer jobb oldalán 0 és ±0,5 közötti PCA értéknél találhatók azok az évek, melyekben kedvező volt a csapadékkellátottság (354 mm) és magas, stabil volt a termés (7,39 t/ha).

3. ábra. A hét trágyázási kezelés (G1-G7) és az 51 környezet (E1-E51) AMMI diagramja

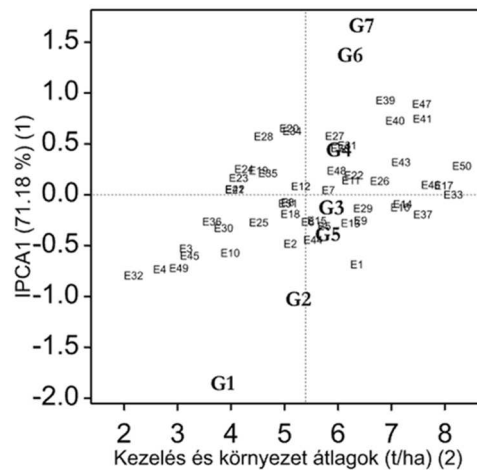


Figure 3. AMMI diagram of the 7 fertilisation treatments (G1-G7) and the 51 treatments (E1-E51). (1) 1st principal component scores, (2) Treatments and environment means (t ha⁻¹)

Kukorica monokultúra és kukorica-búza dikultúra összehasonlító vizsgálata meta-analízissel

Az 1959–2009 között 22 évben volt mindkét kísérletben ugyanabban az évben kukorica. A kezelések közül az 1–4. kezelés volt közös mindkét kísérletben. A 22 év adatait először külön-külön értékeltük REML és AMMI modellel. A Wald mutató F-próbája monokultúrában és dikultúrában egyaránt

$P < 0,001$ szinten szignifikáns különbséget mutatott ki a kezelések között. Dikultúrában minden kezelés szignifikánsan különbözött, monokultúrában a 3. és a 4. kezelés között nem volt szignifikáns különbség. Az AMMI analízis a kezelések megegyező konfigurációját mutatta ki a két kísérletben.

A két kísérlet kombinált értékelésére a meta-analízis a megfelelő módszer. A Wald mutató F-próbája $P < 0,001$ szinten szignifikáns kezelés és rotáció hatást mutatott ki, a kezelés \times rotáció kölcsönhatás azonban nem volt szignifikáns. A kezelések átlagában a kukorica termése monokultúrában 5,022 t/ha, dikultúrában 6,206 t/ha volt, SzD_{5%}: 0,153. A két kísérlet termésadatait a meta-analízis alapján 4. ábra szemlélteti.

4. ábra. A kukorica termése monokultúrában és dikultúrában az összehasonlítható 22 évben, meta-analízis alapján

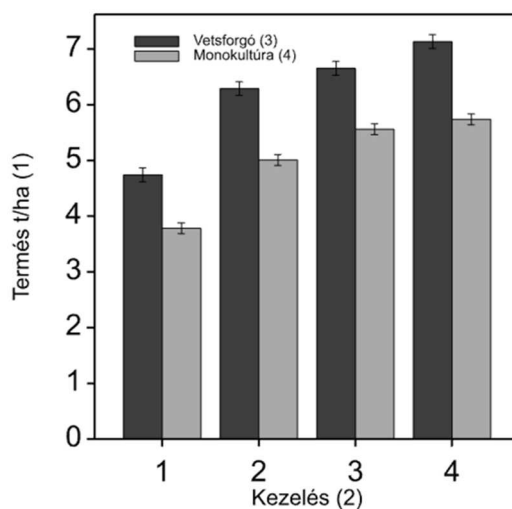


Figure 4. Yield of maize in monoculture and diculture in the comparable 22 years, using meta-analysis. (1) Yield ($t\ ha^{-1}$), (2) Treatments, (3) Crop rotation, (4) Monoculture. Error bars: SED.

Köszönetnyilvánítás

További sikeres évtizedeket, hazai és nemzetközi elismerést kívánok a 40 éves debreceni tartamkísérletek folytatásában.

IRODALOM

- Barnett, V.-Payne, R.-Steiner, R. (eds.):* 1995. Agricultural sustainability. Economic, environmental and statistical considerations. Wiley. New York.
- Berzsenyi Z.:* 2022. Stabilitásanalízis a növénytermesztési tartamkísérletekben. Növénytermelés. 71. 1: 99-130.
- Berzsenyi, Z.-Árendás, T.-Bónis, P.-Micskei, G.-Sugár, E.:* 2011. Long-term effect of farmyard manure and mineral fertiliser on the yield and yield stability of maize (*Zea mays* L.) in dry and wet years. Acta Agronomica Hungarica. 59. 4: 303-315.
- Berzsenyi Z.-Győrffy B.:* 1995. Különböző növénytermesztési tényezők hatása a kukorica termésére és termésstabilitására. Növénytermelés. 44: 507-517.
- Berzsenyi Z.-Győrffy B.:* 1996. A vetésforgó és a trágyázás hatása a kukorica termésére és termésstabilitására tartamkísérletben. Növénytermelés. 45: 281-296.
- Berzsenyi Z.-Győrffy B.:* 1997. Az istállótrágya és a műtrágya hatása a kukorica (*Zea mays* L.) termésére és termésstabilitására monokultúra tartamkísérletben. Növénytermelés. 46: 509-527.
- Berzsenyi, Z.-Győrffy, B.-Dang, Q. L.:* 2000. Effect of crop rotation and fertilisation on maize and wheat yields and yield stability in a long-term experiment. European Journal of Agronomy. 13: 225-244.
- Berzsenyi Z.-Dang Q. L.:* 2002. Búza és kukorica vetésforgók elkülönítése diszkriminanciaanalízissel tartamkísérletben. Növénytermelés. 51. 1: 21-37.
- Cochran, W. G.:* 1939. Long-term agricultural experiments. J. R. Stat. Soc. [Ser. A] 6 (Suppl.): 104-148.
- Crossa, J.:* 1990. Statistical Analysis of Multilocation Trials. Advances in Agronomy. 44: 55-85.
- Debreczeni B.-né-Németh T. (szerk.):* 2009. Az Országos Műtrágyázási Tartamkísérletek (OMTK) kutatási eredményei (1967-2001). Akadémiai Kiadó. Budapest.
- Győrffy B.:* 1986. A kukorica termésére ható növénytermesztési tényezők. Doktori tézisek. MTA. Budapest.
- Hildebrand, P. E.:* 1984. Modified stability analysis of farmer managed on-farm trials. Agron. J. 76: 271-274.
- Izsáki Z.:* 2021. A szarvasi műtrágyázási tartamkísérletek eredményei II. 1990-2010. Szója, lóbab, őszi árpa, rostkender és csicsóka tápanyagellátása. Inform Kiadó & Nyomda. Budapest.
- Leigh, R. A.-Johnston, A. E. (eds.):* 1994. Long-term experiments in agricultural and ecological sciences. CAB International. Oxford. UK.
- Loughin, T. M.:* 2006. Improved Experimental Design and Analysis for Long-Term Experiments. Crop Sci. 46: 2492-2502.

- Loughin, T. M.–Roediger, M. P.–Milliken, G. A.–Schmidt, J. P.:* 2007. On the analysis of long-term experiments. *J. R. Statist. Soc. A.* 170. Part 1: 29–42.
- MacLaren, C.–Mead, A.–van Balen, D.–Claessens, L.:* 2022. Long-term evidence for ecological intensification as a pathway to sustainable agriculture. *Nature sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00911-x>
- McRae, K. B.–Ryan, D. A. J.:* 1996. Design and planning of long-term experiments. *Can. J. Plant Sci.* 76: 595–602.
- Mead, A.:* 2023. Statistical approaches for the design and analysis of LTEs. Előadás. Long-term experiments: Meeting future challenges. Conference. Rothamsted Research. Harpenden. UK. 20th–22nd June 2023.
- Mead, R.–Riley, J.–Dear, K.–Sing, S. P.:* 1986. Stability comparison of intercropping and monocropping systems. *Biometrics*. 42: 253–266.
- Nagy J.:* 2021. Kukorica. A nemzet aranya. Élelmiszer, takarmány, bioenergia. Szaktudás Kiadó Ház Zrt. Budapest.
- Nagy J.–Pakurár M.–Farkas I.–Lakatos L.:* 2003. A műtrágyázás hatása a kukorica (*Zea mays* L.) termésére eltérő talajművelési változatokban. *Növénytermelés*. 52: 139–146.
- Payne, R. W. (ed.):* 2000. The Guide to GenStat: Part 2, Statistics. VSN International. Oxford.
- Payne, R. W.:* 2016. The design and analysis of long-term rotation experiments. [In: Glaz, B.–Yeater, K. M. (eds.) *Applied statistics in agricultural, biological, and environmental Sciences.*] ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI. USA. 299–317.
- Pepó P.:* 2022. A 40 éves debreceni tartamkísérletek néhány fontosabb eredménye. *Növénytermelés*. 71. 3–4: 159–182.
- Petersen, R. G.:* 1994. *Agricultural Field Experiments. Design and Analysis.* Marcel Dekker. New York.
- Piepho, H. P.:* 1998. Methods for comparing the yield stability of cropping systems – review. *J. Agron. Crop Sci.* 180: 193–213.
- Piepho, H. P.–Büchse, A.–Emrich, K.:* 2003. A Hitchhiker's Guide to Mixed Models for Randomized Experiments. *J. Agronomy and Crop Science*. 189: 310–322.
- Poulton, P. R.:* 1996. The Rothamsted long-term experiments: Are they still relevant? *Can. J. Plant Sci.* 76: 559–571.
- Rasmussen, P. E.–Goulding, K. W. T.–Brown, J. R.–Grace, P. R.–Janzen, H. H.–Körschens, M.:* 1998. Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change. *Science*. 282: 893–896.
- Raun, W. R.–Barreto, H. J.–Westerman, R. L.:* 1993. Use of stability analysis for long-term soil fertility experiments. *Agron. J.* 85: 159–167.
- Rowell, J. G.–Walters, D. E.:* 1976. Analysing data with repeated observations on each experimental unit. *J. Agric. Sci. Camb.* 87: 423–432.
- Steel, R. G. D.–Torrie, J. H.:* 1980. *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach.* McGraw Hill. New York.

- Sváb J.*: 1981. Biometriai módszerek a kutatásban. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest.
- Széles, A.-Nagy, J.-Harsányi, E.*: 2019. Effect of differential fertilisation treatments on maize hybrid quality and performance under environmental stress conditions in Hungary. *Maydica*. 64. 2: 1-14.
- Webster, R.-Payne, R. W.*: 2002. Analysing repeated measurements in soil monitoring and experimentation. *European Journal of Soil Science*. 53: 1-13.
- Yates, F.*: 1954. The analysis of experiments containing different crop rotations. *Biometrics*. 10: 324-346.

A szerző levelezési címe - Adress of the author:

Dr. Berzsenyi Zoltán
Agrártudományi Kutatóközpont
Mezőgazdasági Intézet ELKH
Martonvásár
Brunszvik tér 2.
H-2462
profberzsenyi.zoltan@gmail.com