

Bevezetés

A növénytáplálás szakirodalmából jól ismert, hogy a növényeknél egyes tápelemek módosíthatják, elősegíthetik vagy gátolhatják más tápelemek felvételét és hasznosulását (Bergmann és Neubert, 1976). Tipikus példa erre a kálium, kalcium és magnézium egymásra gyakorolt hatása (Loch, 2000) melyet általában és többnyire csak kvalitatív módon ítélnék meg.

A jelenség tanulmányozása, a mérhető paraméterek ok-okozati összefüggéseinek kvantitatív feltárása csak akkor lehetséges korrekt módon, ha a több tényező hatását és kölcsönhatását egy kísérletben vizsgáljuk.

A kezeléshatások pontosabb megismerésére célszerű, ha egy-egy tényezőt minél több dózisszinten alkalmazunk, ami – a hagyományos kísérlettervezési és kivitelezési módok mellett – a kezeléskombinációk szinte kezelhetetlenül nagy számát eredményezi. A vizsgált faktorok (k) és az egyes faktorokból alkalmazott kezelésszintek számától (n) hatványozottan függ a beállítandó kezeléskombinációk értéke: k^n . Ez azt jelenti, hogy ha a három kezelési tényező (kálium, kalcium és magnézium) mindegyikét öt-öt szinten állítjuk be, akkor a kezeléskombinációk száma $3^5 = 125$ lesz. Tovább nehezíti a helyzetet, hogy az egyes kezeléskombinációkat több ismétlésben kell beállítani, mert ez a statisztikai elemzések elvégzéséhez nélkülözhetetlen. Az általánosan szokásos 4 ismétlés alkalmazásánál a vizsgált elemek száma 500, ami nyilván megoldhatatlan vagy alig megoldható feladatot jelent a kísérletező számára.

Anyag és módszer

Megoldásként Box és Wilson (1951) kísérlettervezési módszere kínálkozik, akik eredetileg a vegyipari folyamatok vizsgálatára dolgozták ki az eljárást. Ennek az a lényege, hogy a tényezők – szigorúan meghatározott rend szerinti – együttes változtatásával lehetőség nyílik a kezeléskombinációk számának jelentős csökkentésére.

A módszer lényegét egy kétkezelésű kísérlet tervezése példáján lehet a legegyszerűbben bemutatni. Jelöljük a két kezelési tényezőt A-val és B-vel, indexként tüntessük fel 1-től 5-ig az egyes szintjeiket. Ekkor a kezeléskombinációk ($A_1B_1, A_1B_2, \dots, A_5B_4, A_5B_5$) száma $5^2 = 25$ lesz, amit egy kétdimenziós szimmetrikus mátrixban tudunk ábrázolni (1. ábra).

A_1B_1	A_1B_2	A_1B_3	A_1B_4	A_1B_5
A_2B_1	A_2B_2	A_2B_3	A_2B_4	A_2B_5
A_3B_1	A_3B_2	A_3B_3	A_3B_4	A_3B_5
A_4B_1	A_4B_2	A_4B_3	A_4B_4	A_4B_5
A_5B_1	A_5B_2	A_5B_3	A_5B_4	A_5B_5

1. ábra: Két tényezős kísérlet kezeléskombinációi teljes faktorterv szerint (minden elem), illetve Box és Wilson kísérlettervező módszerével (szürke háttérű elemek)

A Box-Wilson kísérlettervező módszer szerint ezek közül csak az ábrán szürke háttérrel jelölt 9 kezeléskombinációt kell a kísérletbe bevonni. Ha egy kísérleten belül három tényezőt kombinálunk (amit háromdimenziós mátrixban lehet jól elképzelni), akkor a 125 lehetséges kezeléskombinációból (hasonló elvek alapján) csupán 15 beállítását kell kiválasztani. Még látványosabb a redukció a négytényezős kísérleteknél, ahol 625 helyett mindössze 25 kombinációra van szükség.

A mért pontok alapján a függő változó (Y; termés vagy egyéb mérhető paraméter) és az egyes tényezők (A, B) direkt hatása és kölcsönhatása (A*B) az alábbi öt együtthatós másodfokú egyenlettel adható meg:

$$Y = b_0 + b_1 * A + b_{11} * A^2 + b_2 * B + b_{22} * B^2 + b_{12} * A * B$$

A háromtényezős kísérleteknél az összefüggés bonyolultabb, kilenc együtthatós kvadratikus polinommal írható le:

$$Y = b_0 + b_1 * A + b_{11} * A^2 + b_2 * B + b_{22} * B^2 + b_3 * C + b_{33} * C^2 + b_{12} * A * B + b_{13} * A * C + b_{23} * B * C$$

Négy tényező együttes vizsgálatánál már 14-re növekszik az egyenlet együtthatóinak a száma.

Több tényezős kísérleteknél a tényezők közvetlen lineáris és kvadratikus hatása mellett minden tényezőpárosra (három tényezőnél A*B, A*C és C*B kombinációkra) megadható az úgynevezett „lineáris kölcsönhatás”. A kölcsönhatások ismerete azért előnyös, mert ezek segítségével lehet eldönteni, hogy egy adott tényezőhatás a többi tényező minden szintjén azonos módon érvényesül-e.

Bár a Box-Wilson szerinti eljárással a kísérlettervezés és kiértékelés összetett feladat, a mátrix inverzió elhagyhatósága miatt egy ilyen terv szerint elvégzett kísérlet értékelése mégis egyszerűbb, mint a hagyományos módszerekkel.

A kísérletek tervezéséhez és az eredmények kiértékeléséhez Biczók Gyula és Tolner László számítógépes programját használtuk fel (Biczók–Tolner–Simán, 1994), amelyet Kafarov (1976) leírása nyomán készítettek el. Ennek a programnak előnye, hogy a hatásokat leíró egyenlet együtthatóinak számítása mellett a statisztikai elemzéseket is elvégzi többféle módszerrel, amelyekből következtetni lehet részben a tényezők lineáris és kvadratikus hatásának és páronkénti lineáris kölcsönhatásának megbízhatóságára, részben az egyenletillesztés pontosságára.

Box és Wilson kísérlettervezési módszerét **mezőgazdasági kutatási célokra adaptáltuk**, használhatóságát számos kísérletben kipróbáltuk. Példaként két savanyú, magnéziumszegény homoktalajon beállított K-Ca-Mg kísérlet eredményeit mutatjuk be.

1. táblázat

A vizsgált talajok jellemzői

Termőhely	pH-KCl	Kötöttség, K _A	Humusz [%]	Mg-CaCl ₂ [mg/kg]
Álmosd	4,5	26	0,4	25
Tornyospálca	4,2	28	0,7	40

Jelzőnövényként szálkásperjét (*Lolium multiflorum L.*) használtunk. A kísérletet tenyész-edényekben állítottuk be, edényenként 2,5 kg légszáraz talajjal. A nitrogén, illetve foszfor ellátás valamennyi kezelésben egységes volt (250 mg N, 250 mg P/edény). A termett fűvet háromhetenként vágtuk, az egyes vágások után további 100 mg N-t adtunk az alapkezelés kiegészítésére. A növényeket naponta öntöttük, a vízellátottságot a talaj maximális vízkapacitásának 75 %-ára egészítettük ki tömegmérés alapján. A kálium-, kalcium- és magnéziumkezeléseket a választott modellnek megfelelő másodrendű, ortogonális, teljes faktorterv szerint állítottuk be (2. táblázat).

2. táblázat

K – Ca – Mg kezelések			
Kezelés száma	K	Ca	Mg
[mg/edény]			
1	427	1024	85
2	73	1024	85
3	427	176	85
4	73	176	85
5	427	1024	15
6	73	1024	15
7	427	176	15
8	73	176	15
9	500	600	50
10	0	600	50
11	250	1200	50
12	250	0	50
13	250	600	100
14	250	600	0
15	250	600	50

A 2. táblázatból kitűnik, hogy minden változó öt szinten szerepel:

K = 0 – 73 – 250 – 427 – 500 mg/kg,

Ca = 0 – 176 – 600 – 1024 – 1200 mg/kg,

Mg = 0– 15 – 50 – 85 – 100 mg/kg.

Eredmények I.

Az ortogonális kezelés-mátrix, továbbá az egyes tényezők együttes változtatása lehetővé tette, hogy viszonylag kis számú kezeléskombinációval megbízhatóan írjuk le a kezeléshatásokat a regressziós együtthatók független becslése mellett.

Biczók és Tolner számítógépes programjával a termés vagy bármely más mért paraméter és a vizsgált tényezők összefüggésének egyetlen egyenlettel leírható. A kiegészítő programok pedig a többtényezős hatásfüggvény hiperfelületének ábrázolását és tanulmányozását teszik lehetővé.

Az egyik program segítségével előállíthatjuk a felületek két független változós, szintvonalas metszeteit, úgy, hogy a független változó azonos nagyságú értékeit két tetszőlegesen kiválasztott tényező által meghatározott síkra merőlegesen vetítjük ("izovonalak" előállítása).

A másik lehetőség a görbeseregek ábrázolása, melyek a függő változó alakulását szemléltetik az egyik tényező különbözően rögzített szintjein, egy másik tényező függvényében, miközben a harmadik tényező nem változik. Végül lehetséges az eredmények térbeli ábrázolása is.

A 2. (Álmosd) és 3. (Tornyospálca) ábrán a kezeléshatásokat görbeseregekkel síkban és a részfelületek térbeli megjelenítésével szemléltetjük. Az első oszlopban a magnézium kezelése hatása látható síkban, a káliumellátás függvényében, kalcium-karbonát kiegészítés nélkül (Ca=0), illetve a legnagyobb mérsadaggal (Ca=1200). Alatta a kalciumkezelések hatása látható különböző káliumszinteken, Mg=0 és Mg=100 rögzített értéken.

A második oszlopban ugyanezeket a kezeléshatásokat láthatjuk térben ábrázolva.

Az ábrákból levonható következtetések:

A *Mg-trágyázás* termésfokozó hatása a Ca=0 kezeléskombinációban volt a legnagyobb (2. és 3. ábra). A növekvő K-adagok segítik a Mg érvényesülését, az extrém Ca adagok gátolják. Az álmosdi talajon a Ca-adagolás nem befolyásolta a Mg termésmenvelő hatását, a tornyospálcai talajon azonban a kalcium-karbonát adagját növelve a Mg-trágyázás termésmenvelő hatása csökkent.

A *meszezés* hatását a kálium-ellátás az álmosdi talajon kisebb mértékben, a tornyospálcai talajon pedig nagyobb mértékben növelte, ami a talajok eltérő K-ellátottságával függ össze.

A *K-trágyázás* mindkét talajon növelte a termést. A kálium érvényesülését a Ca adagolás lényegesen nem befolyásolta, ellenben a Mg nagy adagja a legnagyobb kalcium-karbonát adaggal kombinálva a tornyospálcai talajon csökkentette a termést.

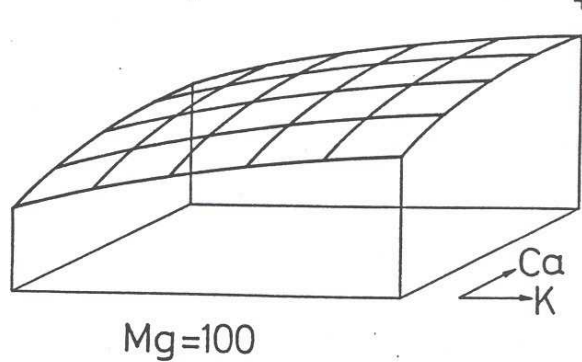
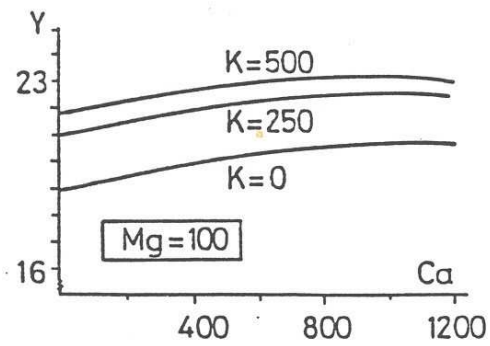
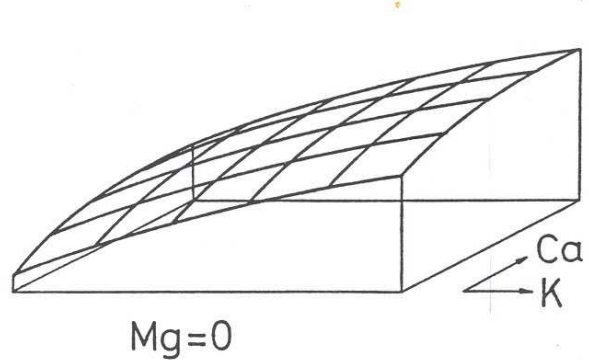
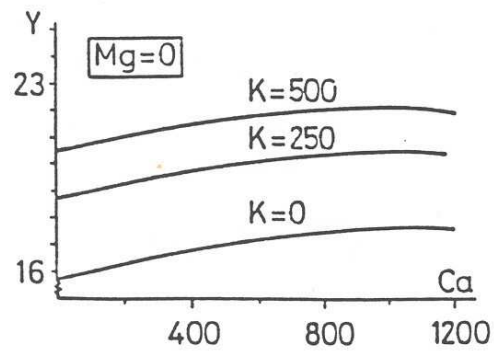
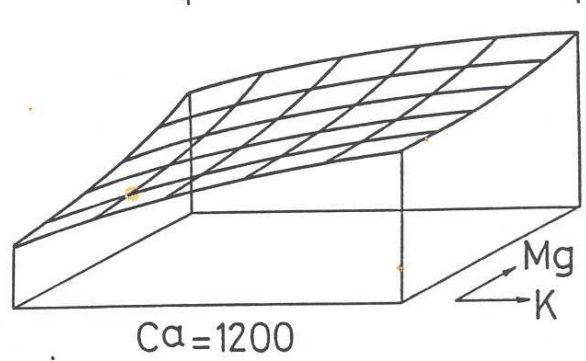
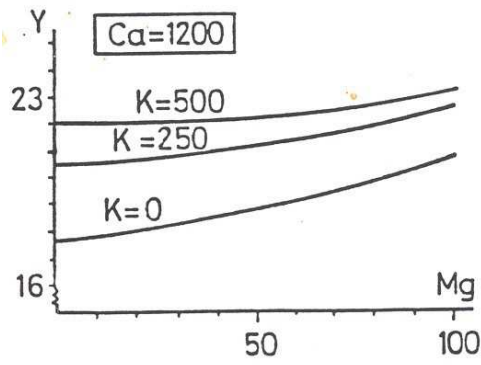
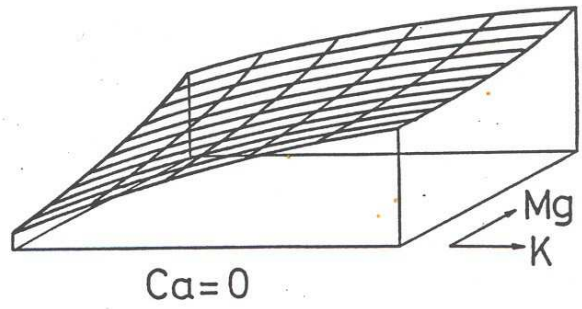
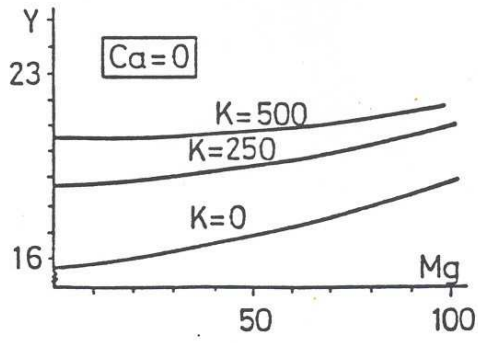
Az összes fűhozam alakulását az alábbi egyenletek írják le a vizsgált tényezők függvényében:

Álmosd

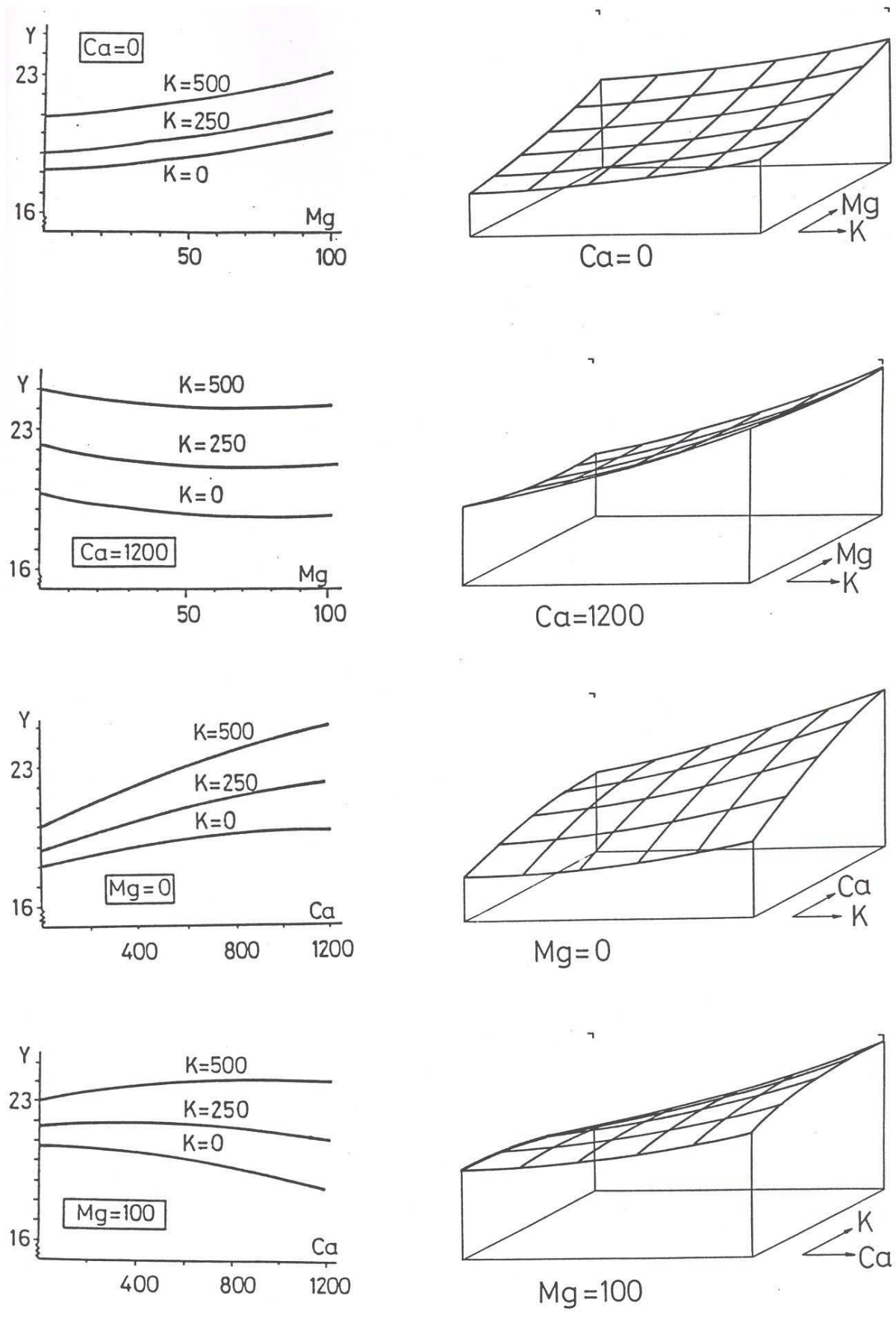
$$Y = 21,02 + 1,29 \cdot K + 0,59 \cdot Ca + 0,77 \cdot Mg + 0,06 \cdot Ca \cdot K - 0,24 \cdot Mg \cdot K - 0,02 \cdot Mg \cdot Ca + \\ - 0,31 \cdot K^2 - 0,30 \cdot Ca^2 + 0,14 \cdot Mg^2$$

Tornyospálca

$$Y = 20,99 + 1,33 \cdot K + 0,50 \cdot Ca + 0,48 \cdot Mg + 0,40 \cdot Ca \cdot K + 0,04 \cdot Mg \cdot K - 0,48 \cdot Mg \cdot Ca + \\ + 0,11 \cdot K^2 - 0,23 \cdot Ca^2 + 0,22 \cdot Mg^2$$



2. ábra: A K-Ca-Mg ellátás hatása a fűhozamra, síkban és térben ábrázolva (Álmosd)



3. ábra: A K-Ca-Mg ellátás hatása a fűhozamra, síkban és térben ábrázolva (Tornyospálca)

Eredmények II.

A regressziós együtthatók abszolút értéke és előjele alapján következtethetünk a hatások jellegére és mértékére. A két egyenlet összehasonlításából kitűnik, hogy mindegyik elem növelte a termést, de ennek mértéke eltérő és a kölcsönhatások is különbözőek a két talajon.

Az említett könnyen belátható következtetések ellenére a lineáris és kvadratikus hatások, továbbá a kölcsönhatások együttes hatásának megítéléséhez nem nélkülözhető az ábrázolás, mely a hatásokat összesítve jeleníti meg.

A modell verifikálásához meghatároztuk az előbbi egyenletekkel számított és a ténylegesen mért szárazanyag-hozamok összefüggésének szorosságát, melyet a korrelációs együtthatókkal (r) jellemzünk:

Álmosd: $r = 0,965$

Tornyospálca: $r = 0,975$

$n = 15$

A korrelációs koefficiensek azt bizonyítják, hogy az egyenletek a fűhozam és a vizsgált tényezők kapcsolatát a bemutatott kísérletekben nagy hűséggel írják le.

Az eredményekből levonható általános következtetések:

- *A bemutatott kísérlettervezési és értékelési módszer segítségével a hagyományos módszereknél lényegesen kevesebb kezeléskombinációval tervezhetünk kísérleteket, a kezelések számának csökkenése jelentős költségmegtakarítást tesz lehetővé.*
- *A többtényezős másodfokú regresszió-analízis eredményeként kapott egyenlet hűen írja le a mért paraméter és a kezelések kapcsolatát. A lineáris, kvadratikus hatások és kölcsönhatások statisztikailag megbízhatóan becsülhetők. A felület egyes szegmensei ábrázolhatók, az ábrák szemléletessé teszik a tényezők együttes hatását.*

A tenyészedény-kísérletekből levonható növényápolási következtetések:

- *A Mg terméskozó hatása csak megfelelő K- és Ca-ellátás mellett érvényesül, míg a szélsőségesen nagy kalciumadagok ezt gátolják.*
- *A Mg-szegény talajon tapasztalható Ca-Mg ionantagonizmust a javuló K-ellátás mérsékli.*

Az ismertetett kísérlettervezési módszert a mezőgazdasági kutatások gyakorlatában nemzetközi szinten is az elsők között alkalmaztuk (Loch–Kiss–Biczók–Tolner–Vágó, 1987; Loch–Kiss–Vágó–Biczók–Tolner, 1987).

Tenyészedényekben szálkásperje (Loch–Győri–Vágó, 1993) angolperje (Vágó–Győri–Loch, 1996), őszi búza (Loch, 1990; Loch–Jászberényi–Vágó, 1992; Loch–Kiss–Vágó, 1996), lucerna, cékla és zeller (Vágó, 1994) jelzőnövénnyel állítottunk be kísérleteket. Ezekben különböző tápelemek (N, P, K, Mg, B) illetve toxikus elemek (Cr, Ni) hatását tanulmányoztuk egymással, illetve meszezéssel és vízellátással kombinálva. A tenyészedény-kísérletek kedvező tapasztalatai alapján a módszert szabadföldi kísérletekben is eredményesen alkalmaztuk.

Összefoglalás

A növénytáplálás szakirodalmából jól ismert, hogy a növényeknél egyes tápelemek módosíthatják, segíthetik vagy gátolhatják más tápelemek felvételét és hasznosulását. Tipikus példa erre a kálium, kalcium és magnézium egymásra gyakorolt hatása, melyet többnyire csak kvalitatív módon ítélnek meg.

A jelenség alaposabb tanulmányozására és a kezelések hatásának kvantitatív leírására három tényezős tényészedény-kísérleteket végeztünk. A kezeléshatások pontosabb megismerésére célszerű, ha egy-egy tényezőt minél több dózisszinten alkalmazunk, ami viszont a kezeléskombinációk szinte kezelhetetlenül nagy számát eredményezi. Ezen probléma megoldására Box és Wilson vegyipari célokra kidolgozott kísérlettervezési módszerét mezőgazdasági kutatási célokra adaptáltuk. Ennek megfelelően a kezeléseket kvadratikus ortogonális faktortervnek megfelelően választottuk ki, ami lehetővé teszi a kezelés-kombinációk számának jelentős redukcióját.

A kapott termésparamétereket (szárazanyag-produkció, elemtartalom és edényenkénti kivont tápanyag-mennyiség) az erre a célra megalkotott szoftver segítségével értékeltük: kiszámítottuk a legvalószínűbb hatás-hiperfelületet leíró, alábbi

$$Y = b_0 + b_1*[K] + b_2*[Ca] + b_3*[Mg] + b_{11}*[K]^2 + b_{22}*[Ca]^2 + b_{33}*[Mg]^2 + b_{12}*[K]*[Ca] + b_{13}*[K]*[Mg] + b_{23}*[Ca]*[Mg]$$

polinom paramétereit, valamint több különböző statisztikai próba segítségével a görbeillesztés megbízhatósági szintjét. Megállapítottuk továbbá az egyes kezelési tényezők lineáris és kvadratikus közvetlen hatásának, illetve a páronkénti kölcsönhatásoknak a megbízhatósági szintjeit is.

A kapott eredmények felhasználhatók a környezetkímélő és gazdaságos növénytáplálás megtervezésében és gyakorlati alkalmazásában.

Irodalomjegyzék

- BERGMANN, W. – NEUBERT, P. (1976): Pflanzendiagnose und Pflanzenanalyse. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- BICZÓK GY. – TOLNER L. – SIMÁN GY. (1994): Method for the determination of multivariate response functions. Bull. of the Univ. of Agric. Sci. 1993-1994 Gödöllő 5-16.
- BOX, G. E. P. – WILSON, K. B. (1951): On the experimental attainment of optimum condition. Journal of the Royal Statistical Society. Ser. **B**. 1.
- GYŐRI Z. - RUZSÁNYI L. - JÁSZBERÉNYI I. - VÁGÓ I. - LOCH J. (1996): The effect of N and P application on the Mn, Cu and Zn content of the winter wheat. VIII. Int. Symposium CIEC „Fertilizers and Environment” Salamanca 26-29. Sept. 1994. Rodriguez-Barrueco (ed.). Fertilizer and Environment, **66**. 499-502. Kluwer Academic Publisher.
- KAFAROV, V. V. (1976): Cybernetic methods in chemistry and chemical engineering. Mir Publisher, Moscow
- LOCH J. (2000): A hazai talajok magnézium-ellátottságának jellemzése és a magnézium trágyázás. Akadémiai doktori értekezés, Debrecen.
- LOCH J. – GYŐRI Z. – VÁGÓ I. (1993): Examining the Cr uptake of italian ryegrass from inorganic compounds and sewage-sludge in pot experiments. The Science of Total Environment, Suppl. **I**. 347-355. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam.
- LOCH J. - JÁSZBERÉNYI I. - VÁGÓ I. (1992): Az NPK trágyázás hatása az őszi búza magnéziumfelvételére. 4. Magyar Magnézium Szimpózium, Balatonszéplak, június 15-17. *The effect of NPK application on the magnesium uptake of winter wheat*. Magnesium Research, Vol.5. Abstr. 238.
- LOCH J. – KISS SZ. – BICZÓK GY. – TOLNER L. – VÁGÓ I. (1987): A N-, P-, K-, Ca-, Mg- és a vízellátás együttes hatása csernozjomon és homokon. I. Termés adatok. NEVIKI Konferencia, Keszthely. A mezőgazdaság kemizálása I. 53-59. *The joint effects of N-, P-, K-, Ca-, Mg-, and water supply on chernozem and sandy soils. Part One: Yield data*.
- LOCH J. – KISS SZ. – VÁGÓ I. (1996): Determining optimal nutrient doses in multifactorial experiments. IX. International Colloquium for the Optimization of Plant Nutrition. 8-15 September, Prague. 135-140.
- LOCH J. – KISS SZ. – VÁGÓ I. – BICZÓK GY. – TOLNER L. (1987): A N-, P-, K-, Ca-, Mg- és a vízellátás együttes hatása csernozjomon és savanyú homokon. II. Növények tápelem tartalma. NEVIKI Konferencia, Keszthely. A mezőgazdaság kemizálása I. 71-77. *The joint effects of N-, P-, K-, Ca-, Mg-, and water supply on chernozem and sandy soils. Part Two: Nutrient content of plants*.
- VÁGÓ I. (1994): A talajok bórtartalmának és a növények bórfelvételének vizsgálata. Kandidátusi értekezés, Debrecen.
- VÁGÓ I. – GYŐRI Z. – LOCH J. (1996): Comparison of chromium and nickel uptake of plant living in different soils. Fresenius Journal of Analytical Chemistry **354**. 714-717.