

A bór szerepe az élővilágban

1. Bevezető

A bór ritka elem. Ezen kívül szélesen elterjedt a bioszférában, de nagyon csekély koncentrációban. A földkéregben, a litoszférában körülbelül 10 mg/kg a koncentrációja, a talajban 2–200 mg/kg, átlagban körülbelül 30 mg/kg a száraz anyagban, a felszíni édesvizekben átlagban 15 µg/L, az óceánok vizében 4,5 mg/L, a növényekben 2–100 mg/kg a száraz anyagban, az ember szerveiben és izmaiban pedig 0,5–1,5 mg/kg a száraz anyagban. Noha az élő szervezetekben a bór koncentrációja némely más elem, különösen a makroelemek jelenlétéhez viszonyítva jelentős mértékben kisebb, a kis atomtömege miatt (10,82) ebből az elemből a száraz anyag egységére viszonylag nagyszámú atom jut.

A bór fizikai és vegyi tulajdonságai nagymértékben meghatározzák az élő szervezetek életfolyamataiban játszott szerepét, valamint hatásának mechanizmusát. A bór a periódusos rendszer III. b oszlopában található. A bór félfémnek tekinthető, mert minden tulajdonságát tekintve átmenetet képez a fémek és a nemfémek között. Az említett csoport többi eleme (Al, Ga, In és Ti) tipikus fémtulajdonságokat mutat. A bórnak igen kicsi az atomtömege és az összes esszenciális mikroelem közül a legkisebb a ionátmérője (0,04 nm). A természetben kizárólag oxigénnel vegyülve fordul elő, poliborát formájában, például bóraxban, kernitben vagy colemanitban. A H_3BO_3^- vizes oldatban nagyon gyenge sav. A H_3BO_3^- oldatban levő anion mellett létezik ennek a ionnak az erősebben hidratizált alakja is, a $\text{B}(\text{OH})_4^-$ borát anion, ami azt jelenti, hogy a bór atomja az oxigén négy atomjával a tetraéder négy csúcsa felé tud sp^3 hibrid kötést alkotni és ily módon diol észtert (Bolanos et al., 2004).

A bór nem tartozik az alkotó elemek közé, mivel nem vesz részt az élő szervezetek jelentős biomolekuláinak felépítésében. A bór nem képes lekötni a koenzimet sem proteinnel, sem szubsztráttal, vagy a vegyérték megváltoztatásával hatást gyakorolni az enzimes folyamatokra. Ezen kívül számos eredmény utal arra, hogy hatással van nagyszámú

* *Dr. Kastori Rudolf akadémikus, a Magyar Tudományos Akadémia külső tagja, a Szerb Mérnöki Akadémia rendes tagja, nyugalmazott egyetemi tanár, Újvidéki Egyetem, Mezőgazdasági Kar, Újvidék*

enzim tevékenységére, amelyek közül egyesek az élő szervezetekben igen fontos metabolikus folyamatokat szabályoznak. A növények a bört a talajból vagy talajoldatból veszik fel, az ember és az állatok szervezetébe élelemmel és vízzel kerül.

Számos kutatás foglalkozik a bőr biológiai szerepével. Régóta bizonyítást nyert, hogy a növények számára esszenciális makro- és mikroelemek ugyanakkor elengedhetetlenül szükségesek az ember és az állatok fiziológiai folyamatai és anyagcseréje számára is, a bőr kivételével. Később állapították meg, hogy a bőr hatással van az állatok és az ember életfolyamataira. Ebben a cikkben rámutatunk az élő szervezetek, növények, állatok és az ember fiziológiai és biokémiai folyamataiban betöltött szerepére.

2. A bőr szerepe a növények életfolyamataiban

A bőr az esszenciális mikroelemek közé tartozik, nemcsak az eukarióták, hanem az egyes prokarióták, baktériumok számára is. A bőrnek a növényekre gyakorolt hatását először a tizenkilencedik században figyelték meg. Azt, hogy a bőr esszenciális fontosságú a növények számára, később állapította meg Warrington (1923). A bőrhiány jelentős változásokat idéz elő a növények anyagcseréjében. A bőrhiány, még ha rövid ideig is tart, szemmel látható következményekkel jár nagyszámú enzim tevékenységében, a növény létéhez fontos számos vegyület bioszintézisében, valamint a növény fejlődésében, növekedésében és biológiai produkciójában. A növények, és különösen egyes kétszikűek igen gyors pusztulása bőrhiány esetében arra a feltételezésre utal, hogy a bőr, közvetve vagy közvetlenül, hatással van a növények anyagcseréjében központi helyet betöltő folyamatokra.

Annak ellenére, hogy máig intenzív kutatások foglalkoznak azal, milyen fiziológiai és biokémiai szerepet tölt be a bőr a növények életfolyamataiban, amire a számos publikáció is bizonyíték, még mindig nem tudunk eleget a primáris hatásáról. Számos szerző hangsúlyozza a bőr jelentőségét a nukleinsavak, szénhidrátok, proteinek, auxinok, fenolvegyületek stb. anyagcseréjében. Ezzel kapcsolatban kiemelik a fontosságát a sejtek fejlődésében és osztódásában, a szövet differenciálódásában, a sejtmembránok permeabilitásában, a sejtfalak kialakulásában, a generatív szervek növekedésében és fejlődésében stb. (Blevins i Lukaszewski, 1998, Bolanos et al., 2004, Camaco-Cristóbal, et al., 2008, Wimmer et al., 2015). Ha tehát teljesebb képet szeretnénk kapni a bőr

jelentőségéről a növények fiziológiai és biokémiai folyamataiban, rá kell mutatnunk a felsorolt folyamatok némelyikében betöltött szerepére.

Régóta felfigyeltek a bórnak a jelentőségére a sejtfa képződésében és struktúrájában, amiről időközben nagyszámú tanulmány is megjelent. A bór a sejtfa struktúrájának alkotóeleme. A sejtben levő bór több mint 90%-a a sejtfaiban található. A bórhiány első jelei közé tartoznak a sejtfaiban és a citoplazmatikus hártván jelentkező változások, mivel a bórhiány igen rövid idő alatt csökkenti azoknak az enzimeknek a tevékenységét, amelyek részt vesznek a sejtfa modifikálásában (Camacho-Cristóbal, et al., 2008). A sejtfa képződésben jelentős szerepe van a Golgi-apparátusnak. A bórhiány megváltoztatja az említett sejtorganelum tevékenységét és ezáltal a sejtfaiban strukturális, morfológiai és kémiai változásokat idéz elő. A bór hatással van a fenolgyeületek anyagcserejére, s ezáltal a lignin szintézisére, valamint a sejtfa lignifikálására is.

A szakirodalomban számos adat utal arra, hogy a bór nélkülözhetetlen a sejtmembránok, és különösen a plazmalemma struktúrájának fenntartásában és funkcionálásában (Godlbach és Wimmer, 2007), továbbá a membráncsatornák és enzimek optimális konformációjának kialakításában a membránon belül.

A bór igen jelentős a reproductív növényi szervek fejlődésének és funkcionálásának szempontjából is. Kialakulásukhoz magasabb bór-szint szükséges, mint a vegetatív szervek növekedéséhez. A bórnak igen kedvező hatása van a pollen kialakulására és érésére, a pollentömlő növekedésére és felépítésére, továbbá a megtermékenyítésre (Wimmer et al., 2015).

Már a múlt században (Kastori és Grujić, 1974) megállapítást nyert, hogy a bór hatással van a nukleinsavak koncentrációjára, anyagcserejére és fizikai-kémiai tulajdonságaira (DNS, RNS). A bór és a nukleinsavak anyagcsereje közötti bizonyos interakcióra utalnak azok a munkák is, amelyek bebizonyították, hogy a bórhiány jelentős mértékben orvosolható, ha a tápközeghez purinbázist vagy pirimidinbázist adunk.

Ha a növény nem kap elegendő bört, csökken a klorofill koncentrációja (Kastori et al., 1995), megbomlik a kloroplastisz képződése és ezáltal egyebek között csökken a fotoszintézis intenzitása (Plesničar. et al., 1997), ami kedvezőtlenül hat a szervesanyag produkcóra és ily módon a növény hozamára is.

A bór hatással van a szénhidrátok anyagcserejére (Kastori et al., 1995) és szállítására a növényekben. Bórhiány okozza a cukor szállítá-

sának inhibícióját. Ennek következménye, hogy az a levelekben halmozódik fel, ami pedig a fotoszintézis gátlásához vezet. Erre mutatnak rá Han et al. (2008) kutatásainak eredményei is.

A bór a nitrogénvegyületek anyagcseréjére nézve is fontos. Ha bórhiány lép fel, csökken az aminosavak beépítése a proteinekbe, a nitrát-reduktáz enzim tevékenységének csökkenése következtében pedig a nitrogén primáris asszimilálódása is (Kastori és Petrović, 1988).

3. A bór hatása az állatok és az ember életfolyamataira

A múlt század derekán publikált tanulmányok nem erősítették meg a bór szükségességét az állatoknál (Nielsen, 1996), majd később Hunt és Nielsen (1981) megállapította, hogy a bórhiány kedvezőtlenül hat a csibék fejlődésére. A bórnak az állatok életfolyamataiban betöltött szerepének tanulmányozásában fontos áttörést jelentettek a múlt század vége felé végzett kísérletek eredményei. Lanoue et al. (1998) megállapították, hogy az elégtelen bórellátás a rágcsálóknál kedvezőtlen hatással van a magzat és a foetus fejlődésére, és csökkenti az implantáció helyét az elegendő bórral ellátott egyedekhez viszonyítva. Rowe és Eckhart (1999) említi, hogy a bór elengedhetetlenül szükséges a zebrahal (*Danio rerio*) magzatának fejlődéséhez. A hímek nem elegendő bórt tartalmazó spermája sikeresen megtermékenyítette ugyan a nőstények petéjét, amelyben szintén nem volt elegendő bór, de a magzatok 92%-a tíz napon belül elpusztult, míg az elegendő bórral ellátott egyedeknél csupán 2% pusztult el. A megtermékenyített magzatok 46%-a nem érte meg a blasztula fázisát. A bórtartalom (nmol blasztulánként) a bórral ellátott egyedek blasztulaiban 59,0 volt, a nem elegendő bórral ellátott egyedeknél pedig 3,1. A bórhiánykor fellépő patológiai elváltozások túlnyomórészt a membránon jelentkeztek. Fort et al. (2002) megállapították, hogy a dél-afrikai karmosbéka (*Xenopus laevis*) egyedei, amelyeknek a szervezetében nincs elegendő bór, lényegesen nagyobb számú nekrotikus tojást termelnek a bórral ellátott egyedeknél. Az esszenciális elemek néha hasonló szerepet játszanak az élő szervezetek életfolyamataiban, ily módon az állatok és a növények megtermékenyítésében és embryogenesisében is. Számos kutatás kimutatta, hogy a bórnak jelentős szerepe van a pollen kialakulásában és érésében, a pollentömlő növekedésében, a növények megtermékenyítésében és a méhmagzat fejlődésében (Wimmer et al., 2015).

A szakirodalomban található adatok és azok elemzése alapján (Nielsen, 1994, 1996, 2000, Hunt, 1996, 2012) megállapítható, hogy az utóbbi időben különböző szempontokból vizsgálták a bór hatását az állatok és az ember életfolyamataira, és azt állapították meg, hogy – úgy tűnik –, a bórnak igen szubtilis biokémiai és fiziológiai szerepe van. A továbbiakban ismertetjük az említett szerzők kutatásainak eredményeit, melyeket a bórnak az ember és az állatok egyes fiziológiai és biokémiai folyamataira gyakorolt hatásával kapcsolatban értek el.

Számos adat utal arra, hogy a bór fontos a csontok normális növekedésére és funkcionálására nézve. Ez a szerepe a csontok kialakulása és fejlődése szempontjából jelentős egyéb tényezők szuboptimális szintjének esetében jut kifejezésre. A jó D-vitamin-ellátottság csökkenti a bór hatását a csontképződésre. Az a vélemény alakult ki, hogy a bór elkerülhetetlenül szükséges a D-vitamin optimális hatásához, ha nincs belőle elegendő. Ezzel kapcsolatban megállapítást nyert, hogy a D-vitamin és a bór elégtelen jelenlétének feltételeiben a baromfi növekedése kisebb volt az elegendő bórral ellátott egyedekhez viszonyítva.

Vélemények szerint a bórnak van meghatározott szerepe az ásványi anyagok anyagcseréjében is. Észrevették, hogy a bór hozzájárul a kalcium, a magnézium és a foszfor felszívódásához. A bórhiány kedvezőtlen hatással van az anyagcseréjükre is, s ezáltal a csontok összetételére és szilárdságára is, ami csonttrituráláshoz vezethet, csökken a csontok tömege és fokozódik a törékenyséjük. Hiánya kihat az oszteoarthritisz, ízületi gyulladás kialakulására is. Az embernél a bór legnagyobb koncentrációja, a szervezetben levő bór mintegy 90%-a, a csontokban és a fogzománcban található. Az idézett eredmények alapján elmondható, hogy a bórnak jelentős szerepe van az egészséges csontok és ízületek fenntartásában.

A bór hatással van az inzulin koncentrációjára is. Az elégtelen bór-ellátottságú baromfi esetében a hasnyálmirigy több inzulint termelt, mint az elegendő bórral ellátott egyedeknél. A nem elegendő bórral ellátott patkányoknál növekedett az inzulin koncentrációja a plazmában. Vélemények szerint a bór csökkenti a glükóz szintjének fenntartásához szükséges inzulin mennyiségét.

A bór hatással van a nitrogén anyagcseréjére is az embernél és az állatoknál. Megerősítést nyert, hogy elégtelen bórellátottság esetén szignifikánsan megnövekszik a vér urea nitrogén, a szérum kreatin és a vizelet urea. Vélemények szerint a felsorolt leletek a vesék funkciójának elváltozására utalnak, illetve arra, hogy elégtelen bórellátottság esetén

változik a nitrogén metabolitok termelése és abszorbeálása. A bór hatással van az aminosavak és proteinek anyagcseréjére, s így módon az aminosavaknak a proteinekbe való beépülésére is, ami előidézheti a nitrogén metabolitok koncentrációjának változását a vérben és a vizeletben.

Megállapítást nyert az is, hogy a bór hatással van a reaktív oxigénformák anyagcseréjére az embernél és az állatoknál. Elégtelen bórellátottság esetén csökken a szuperoxid-diszmutáz koncentrációja az eritrocitákban. Vélemények szerint a reaktív oxigénformák tevékenységében beálló változások közvetve vagy közvetlenül változásokat idéznek elő a szervezet anyagcseréjében.

A bórral való táplálás szignifikánsan hat a vér összetételére is. Adatok szerint az elégtelen bórellátottság csökkentette a hemoglobin koncentrációját a patkányoknál és a baromfinál. A felsoroltakon kívül megállapítást nyert az is, hogy a bór hatással van a glükóz és a trombociták szintjére.

Az elégtelen bórellátottság viszonylag rövid idő alatt hatással lehet az agy működésére, a kognitív képességekre, illetve a mentális öregedésre.

Ami az egyes elemek szükségességét illeti, az élővilágban sok az egybeesés, de nem mindig ugyanaz az egyes elemek és élő szervezetek esetében. Ezzel kapcsolatban feltehetjük a kérdést, hogy a bórellátottságra való reagálás egyforma-e az embernél és különböző állatfajtáknál, különösen az alacsonyabb rendűeknél. Ahhoz, hogy egy elemet elengedhetetlenül szükségesnek, esszenciálisnak, biogénnek tartsunk valamely szervezet számára, a következő funkcionális tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- elmaradásának esetében a szervezet képtelen befejezni az életciklusát;
- harmonikus növekedést és fejlődést tesz lehetővé;
- a hiánya okozta tüneteket csak az alkalmazásával lehet kiküszöbölni;
- jelentős szerepe van a fiziológiai és biokémiai folyamatokban.

A szakirodalom adatai szerint a bór kétségtelenül hatással van az ember és az állatok számos életfolyamatára, de hogy esszenciális-e a számukra, a felsorolt kritériumokat szem előtt tartva nem lehet teljes bizonyossággal állítani.

4. A bór toxikussága

A bór nagyobb koncentrációban toxikus hatással van az élő szervezetekre. Vélemények szerint ennek az effektusnak a mechanizmusa a bórsav és a riboszóma komplexumának kialakulásán alapul, amely az anyagcserében fontos nukleotidok molekuláinak jelentős összetevője, illetve borát-nukleotid komplexum létrejöttén (Kima et al., 2004).

A növények nagyobb fokú toleranciát mutatnak a bórfelesleggel szemben, mint az ember és az állatok. A növényfajták különböznek a bórfelesleggel szembeni tolerancia tekintetében. Toxikus hatása akkor nyilvánul meg, ha a koncentrációja a száraz anyagban nagyobb, mint 100–200 mg/kg. A bórfelesleg jelei nekrosis formájában nyilvánulnak meg, először az öregebb levelek peremrészein és csúcsán jelennek meg, majd kiterjednek az egész levélre és fokozatosan a többi levélre is. Végül az egész növény elhal.

A takarmány magas, toxikus bórtartalma az állatoknál súlyos klinikai tünetekkel járó betegséget, bórenteritist okoz. A juhoknál a betegség akkor jelentkezhethet, ha a takarmányban a bór koncentrációja 30 mg/kg a száraz anyagban, és nagyon gyakori a bór nagyobb koncentrációjakor, 50–100 mg/kg a száraz anyagban. A szarvasmarha következmények nélkül elvisel 150 mg/kg bórt a takarmányban, ha annak a koncentrációja az ivóvízben alacsony, 0,8 mg/L. Az állatok itatására használt vízben a bór megengedett koncentrációjának felső határa 5 mg/L. A szarvasmarha esetében a bórmérgezés tünetei étvágytalanságban és súlycsökkenésben nyilvánulnak meg, valamint ödéma és végtaggyulladás lép fel.

Az emberi szervezetbe a bór túlnyomórészt étellemmel, kisebb mértékben pedig vízzel is kerül be. A növényi eredetű ételben gyakran nagyobb a bór koncentrációja, mint az állati eredetűben, amelyben a bór koncentrációja átlagban körülbelül 1 mg/kg. Humán kísérleti alanyon végzett kutatások eredményei kimutatták a bórbevitel napi 0,25mg-ról 3 mg-ra való emelésének pozitív hatását. Egyes szerzők szerint a bórbevitelnek nagyobbak kellene lennie, napi 0,5–1 mg. Mivel az emberi szervezetre a bór nagyobb koncentrációja (1–2 g) mérgezően hat, a bór toxikussága miatt a bórsavat tilos konzerválószerként használni. Az ivóvízben koncentrációjának felső határa nem volna szabad, hogy meghaladja az 1,0 mg/L-t. Az ásványvizekben sokkal nagyobb is lehet a bór koncentrációja, 1–46 mg/L.

5. Összegezés

Régen bebizonyították, hogy a bór elengedhetetlenül szükséges a növények számára. A bór közvetlenül vagy közvetve hatással van a növények számos fiziológiai és biokémiai folyamatára (a sejtfal kialakulása, a sejtmembránok struktúrájának és funkciójának fenntartása, a reproduktív szervek fejlődése és funkcionálása, a nukleinsavak, nitrogénvegyületek és szénhidrátok anyagcseréje, befolyásolja a fotoszintézist és a vízháztartást). A bór felsorolt folyamatokra való hatásának mechanizmusát még nem sikerült teljes mértékben kivizsgálni, illetve megmagyarázni.

Számos kutatás kimutatta, hogy a bór hatással van az ember és az állatok fiziológiai és biokémiai folyamataira (a csontok növekedése és funkcionálása, az ásványi anyagok, nitrogén és reaktív oxigénformák anyagcseréje, az inzulin koncentrációja, a vér összetétele, az agy működése, kognitív képességek, mentális öregedés). Az viszont, hogy klasszikus értelemben véve elengedhetetlenül szükséges-e, nincs definitíve bebizonyítva. Elfogadott vélemény szerint az eddigi kutatási eredmények arra utalnak, hogy az ember és a magasabb rendű állatok a bört a normális fiziológiai funkciók támogatására használják.

A bór nagyobb koncentrációja toxikus hatású. A növények ellenállóbbak a bór nagy koncentrációjával szemben, mint az állatok és az ember. Az egyes növényfajták és az állatok különböző fokú toleranciát mutatnak a bór mérgező koncentrációival szemben.

Felhasznált irodalom:

1. Blevins, D. G., Lukaszewski, K. M. (1998): Boron in plant structure and function. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49: 481-500.
2. Bolanos, L., Lukaszewski, K., Bonilla, I., Blevins, D. (2004): Why boron ?. *Plant Physiology and Biochemistry* 42: 907 – 912.
3. Camaco-Cristóbal, J. J., Rexach J., Gonzales-Fontes, A. (2008): Boron in plants, deficiency and toxicity. *J. Integr. Plant Biol.* 50: 1247-1255.
4. Fort, D. J., Stover, E. I., Rogers, R. I., Copley, H. F., Morgan, I. A., Foster, E. R. (2000): Chronic, boron or copper deficiency induces teratogenesis in *Xenopus*. *Biol. Trace Elem. Res.* 77: 173-187.
5. Goldbach, H. E., Wimmer, M. A. (2007): Boron in plant and animals. Is there role beyond cell-wall structure. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170: 39-48.
6. Han, S., Chen, L. S., Jiang, H. X., Smith, B. R., Yang, L, T., Xie, C. Y. (2008): Boron deficiency decreases growth and photosynthesis, and increas-

- es starch and hexoses in leaves of citrus seedlings. *J. Plant Physiol.* 165: 1331-1341.
7. Hunt, C. D. (1996): Dietary boron deficiency and supplementation. In: Watson, R. R. (ed.) *Trace Elements in Laboratory Rodents*. CRC Press Boca Raton Fl.
 8. Hunt, C. D., Nielsen, P. H. (1981): Interaction between boron and cholecalciferol in the chick. In: Gawthorne, J., White, C. (eds.) *Trace Element Metabolism in Man and Animals*. Australian Academy of Science, Canberra.
 9. Hunt, C. D. (2012): Dietary boron: Progress in establishing essential roles in human physiology. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 26: 157-160.
 10. Kastori, R., Grujić, S. (1974): Uticaj bora na metabolizam nukleinskih kiselina kod biljaka. *Letopis Poljoprivrednog fakulteta, Novi Sad* 17/18: 105-118.
 11. Kastori, R., Petrović, N. (1988): Effect of boron on nitrat reductase activity in young sunflower plants. *Journal of Plant Nutrition* 12: 621-623.
 12. Kastori, R., Plesničar, M., Panković, D., Sakač, Z. (1995): Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and soluble carbohydrate in sunflower leaves as affected by boron deficiency. *Journal of Plant Nutrition* 18: 1751-1758.
 13. Kim, D. H., Faull, K. F., Norris, A. J., Eckhert, C. D. (2004): Borat-nucleotid complex formation depends on charge and phosphorylation state. *Journal of Mass Spectrometry* 39: 743-751.
 14. Lanoue, I., Taubeneck, M. W., Muniz, J., Hanna, L. A., Strong, P. I., Mar-ray, F. J. (1998): Assessing the effect of low boron diets on embryonic and fetal development in rodents using in vitro model systems. *Biol. Trace Elem. Res.* 66: 271-287.
 15. Nielsen, F. H. (1994): Biochemical and physiologic consequences of boron deprivation in humans. *Environmental Health Perspectives* 102: 59-63.
 16. Nielsen, F. H. (1996): Evidence for the nutritional essentiality of boron. *The Journal of Trace Elements in Experimental Medicine* 9: 215-229.
 17. Nielsen, F. H. (2000): The emergence of boron as nutritionally important throughout the life cycle. *Nutrition* 16: 512-514.
 18. Plesničar, M., Kastori, R., Sakač, Z., Panković, D., Petrović, N. (1997): Boron limiting factor in photosynthesis and growth of sunflower plants in relation to phosphate supply. *Agrochimica* XLI: 144-152.
 19. Rowe, R., L., Eckhert, C. D. (1999): Boron is required for zebrafish embryogenesis. *The Journal of Experimental Biology*. 202: 1649-1654.
 20. Wimmer, M. A., Goldberg, S., Gupta, U. C. (2015): Boron. In: Barker, A. V., Pilbean, D. J (eds.) *Handbook of Plant Nutrition*, second edition, CRS Press Boca Raton, London, New York.