

**BUDAPESTI CORVINUS EGYETEM
KERTÉSZETTUDOMÁNYI KAR
BUDAPEST**

**Kísérletek a mágneses tér növényi növekedésre
gyakorolt hatásának igazolhatóságára**

Auber Andor

Készült a Növényélettan és Növényi Biokémia Tanszéken

Tanszéki konzulens: Dr. Pócs Veronika

Budapest, 2011. november. 22

1. TARTALOMJEGYZÉK

1.	TARTALOMJEGYZÉK	2
2.	BEVEZETÉS	3
3.	IRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
3.1	A mágnesesség alapjelenségei	4
3.2	A mágnesesség alaptípusai	4
3.2.1	Diamágnesség	5
3.2.2	Paramágnesség	5
3.2.3	Ferromágnesség	5
3.3	A Föld mágneses tere	6
3.4	A mágneses térérzékelés lehetséges módjai	7
3.4.1	Ferromágnesesség	7
3.4.2	Gyökpár-mechanizmus	8
3.4.3	Ion-ciklotron rezonancia	9
3.5	A mágneses mező élőlényekben kiváltott hatásai	11
3.5.1	Állatok esetében	11
3.5.2	Növények esetében	12
4.	CÉLKITŰZÉS	15
5.	ANYAG ÉS MÓDSZER	16
5.1	Felhasznált növények	16
5.1.1	Lóbab (<i>Vicia faba</i> L.)	16
5.1.2	Lúdfű (<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.)	16
5.2	Felhasznált mágnesek	16
5.3	Növénynevelés	17
5.3.1	A lóbab csíranövények nevelése	17
5.3.2	A lúdfű steril magvetése	18
5.3.3	Oldatok és reagensek	18
5.4	Kísérleti elrendezések	20
5.4.1	Patkómágneses elrendezés	20
5.4.2	Hengermágneses elrendezések	21
5.5	Mérések és kiértékelések	23
6.	EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK	24
6.1	Patkómágnes	24
6.1.1	Kísérleti elrendezés értékelése	24
6.1.2	Eredmények	25
6.2	Hengermágnes	28
6.2.1	Lóbab hajtás vizsgálatok kiértékelése	28
6.2.2	Lóbab gyökernövekedés vizsgálata	32
6.2.3	Lúdfű álló mágnes hengerben	33
6.3.	Kitekintés	38
7.	ÖSSZEFOGLALÁS	40
8.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	41
9.	IRODALOM JEGYZÉK	42

2. BEVEZETÉS

A mágnesesség alapjelensége régóta foglalkoztatja az emberiséget, azonban a mágneses tér élőlényekre gyakorolt hatásának vizsgálata, csak az utóbbi 100-150 évben vált aktív kutatási területté. Rengeteg kísérleti eredmény született mind az állatokra, mind a növényekre gyakorolt hatások vonatkozásában, mégis ki kell jelentenünk, hogy a növények esetében mindmáig nem rendelkezünk olyan megbízható kísérleti eredményekkel, amelyek alapján egyértelműen bizonyítottnak tekinthetnénk a mágneses tér *in vivo* befolyásoló hatását.

A kísérletek egy része a mágneses térérzékelés különböző hatásmechanizmusait kutatja. Biofizikai és kémiai elméletek egyaránt születtek a jelenség magyarázatára, azonban ezidáig egyik elméletet sem sikerült teljeskörűen bizonyítani.

A szakirodalomban fellelhető kísérletek másik része főként az élőlényekben, a mágneses tér hatására, indukált változásokat írja le. Kísérleteink is ebbe a kategóriába tartoznak, hiszen munkánk során erős permanens mágneses tér növények növekedésére gyakorolt hatását tanulmányoztuk. Mielőtt rátérnék a vállalt célok ismertetésére, szeretném a szakirodalomban fellelhető ismereteket összefoglalni.

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1 A mágnesesség alapjelenségei

A mágnesesség jelensége már az ókorban is ismert volt, azonban akkor a jelenséget egészen más megközelítésből magyarázták. Már akkor köztudott volt, például az, hogy bizonyos vasérceknek (pl.: magnetit) megvan az a különleges tulajdonságuk, hogy a vasat magukhoz vonzzák. Ezeket a mágnesvasakat permanens vagy állandó mágneseknek nevezzük. Az ilyen mágneseknek két pólusa van a vasrúd ellentétes végein, ha azonban ezt a mágnest félbevágjuk vagy feldaraboljuk, akkor minden apró darabjának ugyanúgy két pólusa lesz. Az állandó mágnesek mellett ismerünk ideiglenes mágneseket is, ilyen például az acél, amely egy mágneses vasérc segítségével mágneses állapotba hozható, és ezt a tulajdonságát több-kevesebb ideig meg is tartja. Ilyen még a lágyvas is, amely mágnesvas jelenlétében szintén felmágneseződik, azonban ez a hatás csak addig tart, amíg a mágneses vasérc jelen van, amint eltávolítjuk a rendszerből, a lágyvas elveszti ezt a tulajdonságát.

A következő alapjelenséget Kínában fedezték fel, több mint 2000 éve. A Kr.e. 3. század táján. Egy apró mágnestűt szabadon, a közepénél felfüggesztve az a földrajzi É-D-i irányba áll be (ennek alapján nevezzük a földrajzi északi irányba álló véget északi pólusnak). A földrajzi déli irányba álló részét déli pólusnak nevezzük. Ezt kihasználva készítették el az első iránytűket, amivel nemcsak pl. a tengeri hajózásban, de közép-ázsiai szárazföldi hadjáratokban is könnyebben tudtak tájékozódni, sőt, a déli irány ismerete komoly szakrális jelentőséggel is bírt. A jelenségre okára azonban csak évszázadokkal később született magyarázat (Gilbert, 1600), ekkor született ugyanis az az elmélet, hogy a Földnek saját mágneses tere van. Ha két mágnesvas azonos pólusait egymás felé közelítjük, akkor taszító hatást érzékelünk, míg ellentétes pólusai egymás közelében vonzó hatást mutatnak. Mindmáig nem sikerült elérni, hogy egy mágneses testben túlsúlyba kerüljön az egyik pólus, illetve, hogy kísérleti úton bármiféle bizonyíték szülessen a mágneses monopólus létezésére.

A mágnesesség jelenségét mindazonáltal nem csak egyszerű testeken vizsgálhatjuk, ugyanis mozgó töltés közelében (például áramjárta vezető) mágneses tér indukálódik előbbire merőleges tengely mentén, amely térben a mágneses dipólusra forgatónyomaték hat. Ez a hatás fordítva is igaz, tehát mágneses térben mozgó vezetőben feszültség indukálódik. A jelenséget az Ampère-törvény (1827) írja le.

3.2 A mágnesesség alaptípusai

Minden anyag rendelkezik mágneses tulajdonsággal, ám nem egyforma módon. Ezen különböző típusok ismertetése előtt szeretnék leírni néhány, a megértéshez szükséges alapvető információt.

Niels Bohr 1913-ban megalkotott atommodellje óta elfogadott, hogy egy atomban a pozitív töltésű atommag körül pontosan meghatározott pályákon keringenek a negatív töltésű elektronok. Később megállapították, hogy az elektronok a pályájukon való keringésen kívül saját tengelyük körül is forognak, ezt a jelenséget nevezik spinnek. Ezekből a forgó mozgásokból származik az atom mágneses momentuma, ami arra utal, hogy az atom mágneses dipólust képez, vagyis mágneses tulajdonsággal rendelkezik. A különböző anyagok külső mágneses térben az atom mágneses momentumának nagysága és iránya által meghatározott módon viselkednek.

3.2.1 Diamágnesség

A diamágneses anyagokra jellemző, hogy kompenzált mágneses momentumuk van. Ez azt jelenti, hogy a bennük létrejövő pálya- és spinmomentum kiegyenlíti egymást (csak lezárt elektronpályájuk van), ezért alapállapotban nincs kifelé irányuló mágneses momentumuk, nem rendelkeznek mágneses dipól- nyomatékkal. Ha egy diamágneses anyagot homogén mágneses térbe helyezünk, akkor annak a tér irányával ellentétes irányú mágneses momentuma keletkezik, tehát taszítás jön létre. Ilyen anyagok például: réz, ezüst, arany, higany, bizmut, ólom, víz.

3.2.2 Paramágnesség

A paramágneses anyagok esetében a kétféle (spin- és pálya-)momentum nem semlegesíti egymást (van nem lezárt elektronpályájuk), tehát az anyag minden atomjának saját mágneses momentuma lesz, vagyis mágneses dipólusként viselkedik. Mivel viszont az egyes atomok különálló mágneses momentumai rendezetlenül, eltérő irányba mutatnak, ezért az anyag kifelé nem mutat mágneses tulajdonságokat. Külső, mágneses tér hatására azonban az egyes atomi mágneses momentumok iránya a külső mágneses tér irányába rendeződik, ez pedig csökkenti a mágneses ellenállást és vonzás jön létre. Paramágneses anyagok például: oxigén, nátrium, kálium, alumínium, szilícium, ón, mangán.

3.2.3 Ferromágnesség

A paramágneses anyagokhoz hasonlóan, itt is eltér a spintől eredő mágneses momentum nagysága a pályakeringésből eredő momentumétól, így minden atomnak saját mágneses dipólusa keletkezik. A ferromágnesség abban ugyanakkor különbözik a korábban említett tulajdonságtól, hogy ebben az esetben nagyszámú szomszédos atom mágneses momentumának iránya megegyezik. Az ilyen, egyformán mágnesesződő tartományokat doméneknek nevezzük. A tartományok irányultságát spontán mágnesezettségnek nevezik. Erős külső mágneses tér a doméneket egységesen orientálja,

ezáltal erős, maradandó mágnes mező jön létre. Az ilyen anyagok (vas, kobalt, nikkel) többkevesebb ideig a mágneses térből való kiemelés után is megtartják mágneses tulajdonságaikat.

Az élő szervezetekben különböző vegyületekben, ionok formájában vagy makromolekulákhoz kapcsolódva találhatók meg a ferromágneses anyagok, ezért logikus azt feltételezni, hogy a mágneses tér – több szinten is, ill. számos folyamat révén – hatással lehet az élő szervezetek működésére. Erről azonban az irodalomban nincs elegendő, vagy megfelelően pontos adat, arról pedig szintén csekély információval rendelkezünk, hogy az egyes rendszertani csoportokban milyen receptor(ok) felelős(ek) az érzékelésért, illetve hogy az esetlegesen bekövetkező fiziológiai változások maradandók-e (s ha igen, melyek maradandók) a vizsgált szervezetekben.

3.3 A Föld mágneses tere

A földi mágneses tér (más néven magnetoszféra) létezésére bizonyítéknak tekinthető a 3.1 fejezetben már leírt kísérlet, magyarázata pedig a Föld ún. dinamó-mechanizmusa lehet. Ez azt jelenti, hogy a Föld külső magjában lévő, nagy tömegű olvadt vas és nikkel cirkuláris-áramlásának során keletkező örvényáramok mágneses teret gerjesztenek. E mágneses tér irányultsága a mágneses dél irányából a mágneses észak felé mutat. Ha olyan iránytűvel végzünk kísérletet, mely csak vízszintes irányban képes kitérni, akkor könnyen bemutathatjuk a mágneses deklináció jelenségét. Ez azt jelenti, hogy a Föld egyes pontjain ez a mágnestű nem a csillagászati É-D-i irányba áll be, hanem a forgástengelytől megközelítőleg $11,3^\circ$ -kal elhajolva, a mágneses Észak felé mutat. Az azonos deklinációjú (elhajlási) pontokat összekötve megkaphatjuk az izogónokat, vagyis mágneses délköröket. Ezen izogónok a mágneses sarkpontokban találkoznak, amelyek viszont nem egyeznek meg a földrajzi sarkokkal. Fontos megjegyezni ugyanakkor, hogy a mágneses pólusok helyzete nem állandó, folyamatos, lassú mozgásban vannak, sőt akár egymástól függetlenül is elmozdulhatnak, sőt geológiai bizonyítékok alapján a földtörténet során többszöri pólusváltás is bekövetkezett. Amennyiben egy másik kísérletet végzünk, ezúttal olyan mágnestűvel, mely csak vízszintes tengely körüli mozgásra képes, akkor a mágneses paralellköröket vagyis izoklinákat határozhatjuk meg. A Föld mágneses mezőjének is van erőssége és intenzitása (Magyarország területén $\sim 40\text{--}50\text{ }\mu\text{T}$), azonban a földrajzi hely függvényében erősen változik: a sarkoknál a legerősebb, a mágneses mező egyenlítőjénél pedig a leggyengébb. Ugyanakkor kisebb (pl. a felszín alatti érctelepekre utaló) vagy kiterjedtebb (pl. Dél-Atlanti Anomália) lokális rendellenességek is ismertek. A Napból érkező töltött részecskék plazmaárama és mágneses mezeje (ld. napszél) időlegesen szintén torzulást idézhetnek elő a mágneses mezőben.

Ebből láthatjuk, hogy a geomágneses tér egy olyan mindenütt jelenlévő navigációs információ-forrás, melyet kétféle módon lehet hasznosítani:

- a mágneses vektorok a mágneses térerő irányáról informálnak
- a tér intenzitása, illetve az inklináció (lehajlás) mértéke az élőlény „térképen” elfoglalt helyéről tájékoztathat (WILTSCHKO és WILTSCHKO, 2005)

3.4 A mágneses térérzékelés lehetséges módjai

Ahhoz, hogy megértsük a mágneses tér okozta, megtévesztően sokrétű hatások együttesét, szükségünk van kémiai és fizikai modellekre, amelyek alapul szolgálnak a jelenség megértéséhez. Ilyen modellek már 20 éve léteznek, ám ezidáig kevés figyelmet kaptak. Bár a gyenge mágneses tér legtöbbször túl alacsony energiájú ahhoz, hogy a kémiai kötések felzakítsa, más fizikai mechanizmusok is alkalmasak a feltételezett biológiai reakció kiváltására (WEAVER és mtsai, 1999). A mágneses térre adott reakció eddig bizonyított, lehetséges módjai a következők:

- befolyás a ferromágneses részecskékre,
- változás a kémiai reakciók arányában (gyökpár-mechanizmus),
- a szállításban és kötések arányában bekövetkező változás (az ion-ciklotron rezonancia miatt).

3.4.1 Ferromágnesesség

Egyes ferri- ill. ferromágneses kristályok, mint a magnetit ($\text{Fe}^{\text{II}}(\text{Fe}^{\text{III}})_2\text{O}_4$) és a greigit ($\text{Fe}^{\text{II}}(\text{Fe}^{\text{III}})_2\text{S}_4$) magnetoreceptorként játszanak szerepet a baktériumok magnetotaxisában (BLAKEMORE, 1982). A mágneses részecskék (magnetoszómák) láncokba rendeződnek a baktérium mozgástengelye mentén, ezáltal permanens mágneses dipól-nyomatékokat generálnak, amely a sejteket a földi mágneses tér erővonalaival párhuzamosan orientálja. Efféle magnetoszómákat egysejtű eukariótákból, a Brazília ÉK-i részén elhelyezkedő mangrove mocsarakban élő magnetotaktikus ostorosmoszatokból (*Euglenozoa*) is izoláltak. Mindegyik sejt tartalmaz néhány ezer magnetit kristályt, amelyek magnetoszómákat alkotnak, a magnetotaktikus baktériumokban leírtakhoz hasonlóan (TORRES DE ARAUJO és mtsai, 1986). Lehetséges, hogy ezek a magnetotaktikus protisták valaha magnetoszómát tartalmazó baktériumok elfogyasztásával jutottak ehhez a képességükhöz (NEVES és mtsai, 2003). Mivel pedig az a biogén magnetit, ami magasabbrendű élőlényekben – beleértve egyes eukarióta algákat és állatokat is – előfordul, feltűnően hasonlít a baktériumokban találtakhoz, az endoszimbióta elméletre alapozva kézenfekvő lenne feltételezni, hogy a korai magnetotaktikus baktériumok közreműködtek a magnetoszenzitív eukarióta sejtek létrejöttében

(KIRCHVINK és HAGADORN, 2000). Az állatok világában mindenhol megtalálható magnetit részecskéket ugyanakkor, érdekes módon a magasabbrendű növényekben (az edényes flóra képviselőiben) jellemzően nem találunk (LOWENSTAM, 1981), bár egy újabb felfedezésben sikerült magnetitet izolálni egyszikűek leveléből (GAJDARZISKA-JOSIFOVSKA és mtsai, 2001, 2002). Korábbi vizsgálatok során pedig a szokásos ferrihidrit típus mellett magnetit ill. hematit kristályosodási gócot is kimutattak a növényi sejtek vasraktáraként szolgáló, ún. fitoferritin fehérjekomplexekben (MCCLEAN és KEAN, 1993). Néhány ostorosmoszat, táplálkozása során szervesetlen vaskolloidok felvételére is képes, a magnetitet is beleértve (NODWELL és PRICE, 2001). Ezen magnetit részecskék fiziológiai szerepe jelenleg még nem ismeretes. A táplálkozás részeként felvehető magnetit számottevő jelentősége a mágneses észlelőképesség kialakításában mindenesetre érzékeltethető azzal a ténnyel, miszerint bizonyos (Brazíliában fellelt) protozoák a mágneses térrel szemben érzéketlenek voltak mindaddig, amíg be nem kebeleztek magnetotaktikus baktériumokat (NEVES és mtsai, 2003, BAZYLINSKI és mtsai, 2000).

Az említett ferromágneses kristályok érdekes módon akár milliószor erősebb kölcsönhatásba lépnek a mágneses térrel, mint a para- vagy diamágneses anyagok. Ha pedig egy ferromágneses nanokristály ioncsatornában rögzített – ez persze csak egy még nem bizonyított feltevés, az akkora mágneses nyomatékot is generálhat gyenge geomágneses térben, ami elegendő lehet az ionmozgás megváltoztatásához a membránon keresztül. Ez a megfontolás mutatja, hogy a magnetitek jelenléte, ha csak feltételelesen is, de magában hordja az iontranszport közvetlen befolyását (KIRCHVINK és mtsai, 1992).

Főleg a gyökpár-mechanizmus összefüggésében (lásd alább) helyénvaló, hogy a magnetitek módosító hatásával is számjunk, amennyiben jelen vannak.

3.4.2 Gyökpár-mechanizmus

Azon biokémiai folyamatok esetén, melyekben spin-függő gyökpárok vesznek részt, elvárható, hogy a reakciót a külső mágneses tér hatása befolyásolja. Ismeretes és kísérleti úton is bizonyított például, hogy a gyökpár-intermedierekkel működő B₁₂-függő etanolamin ammónia-liáz enzim kinetikai állandói megváltoznak külső mágneses mező hatására (HARKINS és GRISSOM, 1994). Hasonlóan, a bakteriális és növényi fotoszintézis során a reakciócentrum(ok)ban található gerjesztett, szinglet állapotú klorofill pigmentmolekulák is képesek reakciópartnerükkel létrehozni szinglet állapotú gyökpárt, melynek triplet állapotba való átalakulására a külső mágneses tér szintén hatással lehet.

A szintén gyökpár-képző kriptokrómok, bár első képviselőjüket növényben írták le (AHMAD és CASHMORE, 1993), az egész élővilágban elterjedt, konzervatív flavoproteinek. A kék fény ill. UV-A

sugárzás receptoraiként befolyásolják az élőlények számos életfolyamatát, illetve fontos szerepet töltenek be a cirkadián ritmus beállításában is (CASHMORE és mtsai, 1999; YOUNG és KAY, 2001). Ezeket a fehérjéket *Arabidopsis*-ban két gén, a *Cry1* és a *Cry2* kódolja (LIN és mtsai 1995, 1996), s az említett folyamatok mellett pl. a csíranövények etioláltságának megszüntetésében és – más fotoreceptorokkal közreműködve – a virágzás indukciójában is jelentős szerepet vállalnak (CASHMORE és mtsai, 1999; GUO és mtsai, 1998; LIN, 2000). A kriptokrómok nagy szekvenciális hasonlóságot mutatnak az UV-sugárzás DNS-károsító hatásának kivédésében közreműködő, kék fényre aktiválódó fotoliázokkal. A hasonlóság arra is kiterjed, hogy ezek is egy többlépcsős, 3 triptofán közreműködésével zajló elektrontranszportlánccal megoldott fotoaktiváláson esnek át, ami a flavin kofaktoruk (FAD) fotoredukcióját jelenti (FADH) (GIOVANI és mtsai, 2003).

A szakirodalomban a mágneses térérzékelésre jelenleg ez, vagyis a kriptokrómok által közvetített percepció a leginkább elfogadott elmélet, ami szerint, az észlelést – molekuláris szinten – ezek a fehérjék flavin-triptofán kofaktorokkal végbemenő reakciójukkal kiviteleznék. Ez a folyamat az élővilágban általánosan végbemehet (hisz az állati és növényi kriptokrómok mellett a legújabb csoportjukként leírt, ún. CRY-DASH fehérjéket még baktériumokból és gombákból is izolálták – LIN és mtsai, 2005), ráadásul nemcsak statikus, de változó mágneses tér is befolyásolhatja, sőt, az extrém alacsony frekvenciájú (ELF), 50 μ T-nál alacsonyabb intenzitású mágneses tér is bizonyított hatással van rá (HARRIS és mtsai, 2009).

3.4.3 Ion-ciklotron rezonancia

Az ion ciklotron rezonancia (ICR) Liboff által, 1984-ben bevezetett modellje a statikus (B_{DC}) és az időben alternáló (B_{AC}) mágneses tér olyan lehetséges, frekvencia-specifikus kombinálódásait írja le, amelyek közvetlenül befolyásolnak egyes ion-szabályozta folyamatokat, azáltal, hogy megnövelik az ionok mozgékonyságát receptoraik vagy az ioncsatornák közelében.

Az alternáló mező frekvenciája (f) és a statikus mágneses mező fluxussűrűsége közötti összefüggést a következő ICR-egyenlet mutatja:

$$f = B_{DC} \cdot q / 2 \cdot \pi \cdot m$$

ahol (q) az ion töltését, (m) pedig az ion tömegét jelöli, tehát minden ionnak megvan a rá jellemző rezonancia frekvenciája (GALLAND és PAZUR, 2005). Az elmélet eredendően kalcium-függő folyamatok jellemzésére született, a kalcium ionok ciklotron frekvenciája 30,6 Hz-cel egyenlő.

Az ion-ciklotron rezonancia gerjesztőforrása az igen alacsony frekvenciájú, változó elektromágneses tér, amely - egy-egy meghatározott anyagra jellemző szabadlengési (saját, vagy ún. rezonancia-)frekvencián vagy ahhoz igen közeli értéken pulzálva - képes az adott rendszer (pl. ion) nagy amplitúdójú, kényszerű rezgését előidézni. A kilengések extrém mértékű felerősödése

annak köszönhető, hogy összegződnek az egy-egy kitérés alatt a gerjesztés révén bevitt energiaadagok.

Mindez számos folyamatot megzavarhat biokémiai és élettani szinten, amelyben az érintett molekulák (pl. Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) közreműködnek. Így általánosságban ismeretes, hogy ez a kezelés megváltoztathatja a sejtmembrán ionáramlását, de - többek közt a Ca^{2+} ionokra gyakorolt hatása révén – egészen specifikusan, pl. egyes, tanulási ill. memóriazavarokkal társítható idegrendszeri folyamatokra gyakorolt befolyását is feltételezik (PERISSE és mtsai, 2009, BLACKMAN, 2009). Úgy tűnik, képes lehet arra is, hogy akár megszüntesse az állatok geomágneses pólusoknak megfelelő preferenciális orientálódását, amint azt pl. méhek vagy egyes vízi élőlények tájékozódásának extrém alacsony (<300 Hz) frekvenciájú (ELF) ill. rádióhullámok (RF) okozta zavarai kapcsán több alkalommal is valószínűsítették, legutóbb pedig – a változó mágneses teret gerjesztő, nagyfeszültségű elektromos távvezetékek közelében – Burda és munkatársai már emlősöknél (kérődzőknél) is bizonyították (2009).

A Föld nehézségi ereje mindazonáltal a növényekre is ingerként hat, melyre azok helyzetváltoztató mozgással reagálnak. Ezt a jelenséget gravitropizmusnak hívják. A növényi hajtás negatív, míg a gyökér pozitív gravitropizmust mutat. Ismert tény, hogy ezekért a folyamatokért az auxin aszimmetrikus eloszlása felelős; a gravitropikusan stimulált növényi részek alsó felében az auxin koncentráció magasabb.

A gyökerek gravitropizmusában az aszimmetrikus auxinmegoszlás az alsó oldal megnyúlását akadályozza. A reakció kezdeti lépésében fontos szerepe van a kalciumnak és a kalmodulinnak. Ismert tapasztalat ugyanakkor, hogy a gyökérsüvegétől megfosztott gyökér a nehézségi erővel szemben érzéketlenné válik. Az előbbi tények közti összefüggést röviden, a következők világítják meg. A nehézségi erő által stimulált gyökérsejtekben az amiloplasztiszok a sejtek alsó oldalán helyezkednek el. A vízszintesen elhelyezkedő, gravitropikusan stimulált gyökérsüveg sejtjeiben az amiloplasztiszok elmozdulnak, így az alsó oldalon elhelyezkedő endoplazmatikus retikulumokból kalcium kiáramlást indukálnak. A lokálisan megnövekvő kalcium koncentráció aktiválja a sejtplazmában lévő kalmodulint, ami pedig a sejtmembránban elhelyezkedő kalcium- és auxinpumpát indítja be. Ebből következően az alsó oldalon a gyökérsüveg apoplazmájában emelkedő kalcium- és kalmodulin koncentráció miatt a gyökérsüvegbe szállított auxin visszavándorol a gyökérnyak irányába. Az alsó oldali sejtekben így megnő az auxin koncentráció, ami ezen sejtek megnyúlását gátolja, s végül emiatt képes a gyökércsúcs a Föld középpontja felé fordulni (PETHŐ, 1993).

Azt, hogy gyenge, változó mágneses mező hatással lehet a gyökér gravitropizmusra, már Belova és munkatársai (2000, 2001) vizsgálták kalcium, magnézium és kálium ICR frekvenciás kísérletekkel

len, köles ill. lóhere növényeken (GALLAND és PAZUR, 2005). Kordyum és munkatársai (2005) a későbbiekben azt is megerősítették, hogy a gyökér gravitropizmusa akkor serkenthető, amennyiben a változó mágneses mező frekvenciáját a kalcium ion-ciklotron rezonanciájának (ICR) megfelelően választjuk meg.

Munkacsoportjuk 3 napos zsázsa (*Lepidium sativum*) növényeken végzett kísérleteiket. Az egyenes növekedésű gyökereket vízszintesen helyezték egy nedves, sötét kamrába, majd függőleges helyzetű, 40 μ T erősségű kombinált mágneses térbe helyezték a növényeket. A zsázsa gyökerek pozitív gravitropikus növekedést mutattak mindaddig, amíg a mágneses tér frekvenciáját 32 Hz-re nem állították. Ekkor ugyanis negatív gravitropizmus volt érzékelhető, vagyis a gyökerek felfelé növekedtek. Ez a hatás csak 1-2 óráig tartott, utána ugyanis a gyökerek tovább nőttek – de vízszintes irányba. Mivel az alkalmazott 32 Hz-es frekvencia jelentősen megközelíti a kalciumion ciklotron frekvenciáját (30,6 Hz), ez a kísérlet is alátámasztja, hogy a kalcium ionoknak meghatározó szerepük van a gyökérnövekedésben. Későbbi fénymikroszkópos vizsgálatokkal a sejtekben lévő amiloplasztiszok helyzetét is megfigyelték – a kontroll növényeknél a sejtek alsóbb régióiban helyezkedtek el, míg a 60 percig kezelt egyedek sejtjeiben a hosszanti sejtfaalak mellé rendeződve voltak megtalálhatók.

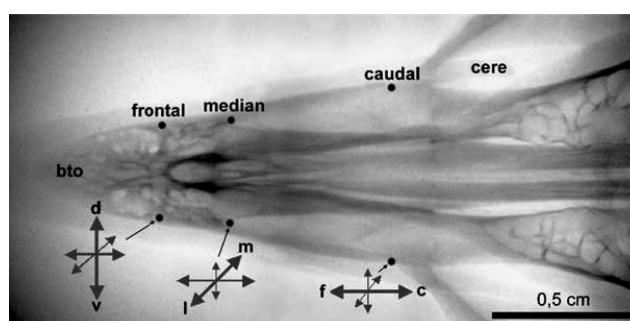
Az ICR növényekre gyakorolt hatásait a gravitropizmus (BELOVA és LEDNEV, 2000) mellett a csíranövények növekedése és a csírázás tekintetében is vizsgálták a '90-es évek közepétől (SMITH és mtsai, 1993). Mindezek alapján arra lehet következtetni, hogy többféle ion párhuzamos részvételének köszönhetően a mágneses szabályzás több biokémiai folyamatban is kétpólusú. Így például, az első két említett esetben a Ca^{2+} ciklotron rezonancia értéken serkentést, míg pl. a K^{+} -nál gátlást figyeltek meg, a csírázásnál viszont épp fordított hatást tapasztaltak (STAVROULAKIS, 2003).

3.5 A mágneses mező élőlényekben kiváltott hatásai

3.5.1 Állatok esetében

Már a 3.4.1-es fejezetben megemlítettem a baktériumokban felfedezett mágneses nanokristályok működését, illetve a baktériumsejtek ily módon való tájolóódását. A szakirodalomban azonban számos olyan cikk jelent meg, mely szerint hasonló mágneses kristályok magasabbrendű élőlények mozgását, orientációját is befolyásolják. Ezen magasabbrendű élőlények érzékelő rendszerének ugyanakkor kellő mértékben érzékenynek kell lennie annak érdekében, hogy a geomágneses tér igen apró változásaira is képesek legyenek reagálni. Születtek olyan elméletek, melyek a mágneses kristályok működését az ioncsatornák működésével kapcsolták össze, például oly módon, hogy a

külső mágneses tér által megváltozott dőlésszögű kristályok nyitnák az ioncsatornákat (WALKER és mtsai, 2002), ez az elmélet azonban még nem nyert bizonyítást. Mivel a mágneses erővonalak –a fénnel ellentétben – képesek a szövetek mélyére hatolni, az élőlényeknek nincs szükségük külső érzékszervre, elvben akár a test bármely pontján képesek volnának annak érzékelésére. Először akkor kezdték vizsgálni ezt a kérdéskört, amikor azt figyelték meg, hogy a postagalambok (*Columba livia f. domestica*) a mágneses mező ideiglenes megváltozása miatt nem voltak képesek elérni céljukat (KEETON és mtsai, 1974). A madarakat később alaposabban megvizsgálva, felső csőrükben 6 helyen magnetitet találtak (3-1. ábra), amelyről azt feltételezik, hogy a tájékozódásban segítik őket.



3-1. ábra – A postagalambok felső csőrében 3-3 helyen találtak magnetitet tartalmazó idegsejteket, melyek elhelyezkedése és együttes működése lehetővé teszi a mágneses tér erősségének és irányának érzékelését. (forrás: FLEISSNER és mtsai, 2007)

Szakirodalmi adatok eloszlása alapján elsősorban a költöző madarak vándorlásához elengedhetetlen, magas szintű navigációt kutatják, más gerinces állatokról csupán szerény mennyiségű cikk jelenik meg és azok sem mindig helytállóak. Ennek oka könnyen lehet az, hogy a nagyobb termetű gerincesek vizsgálatához (pl.: ember, ló) szükséges egzakt kísérleti körülmények előállítása majdnem lehetetlen. Kivételt azonban mégis lehet említeni, mégpedig egy, a közelmúltban megjelent, nagy nemzetközi visszhangot nyert tanulmány képében, melyben műholdas felvételekről vizsgálták a legelő szarvasmarha és szarvas csordákat. A megfigyeléseket az öt kontinens számos különböző pontján elvégezték, és a különböző időjárási viszonyok ellenére is rendkívül hasonló eredményeket kaptak: az állatok legelés vagy pihenés közben megközelítőleg a mágneses É-D-i irányban álltak be és csak akkor nem az előbbi módon tájolódtak, amikor legelőváltás céljából ideiglenesen máshová vándoroltak (BEGALL és mtsai, 2008).

3.5.2 Növények esetében

A növények helyhez kötötten élik életüket, így nyilvánvalóan kevés értelme van vizsgálni a mágneses tér hatását helyváltoztató mozgásukra (tropizmusaikra gyakorolt hatás ugyanakkor feltételezhető), azonban molekuláris felépítésük az állatokéhoz igen hasonló, így elvárható, hogy a geomágneses tér valamilyen formában hatást gyakoroljon rájuk. A megfigyelések arra utalnak,

hogy a geomágneses tér természetes változásai befolyással lehetnek a növények egyes életfunkcióira. Bár már az 1800-as évek elején lehetséges összefüggést állítottak fel a napfolt tevékenység és a búza termékenysége között, több mai tudományos feltételezés is lehetségesnek tartja a nap-hold tevékenység ill. a Föld saját mágneses terének változásai és a vegetáció aktivitása közti kapcsolatot.

Javasolták pl., hogy a növényekben megfigyelt egyedi, 0,2-5 Hz-es növényi ritmus tulajdonképpen az ún. P_{c1} pulzálás lenyomata volna, hogy a geomágneses viharok merisztémasejtek aberráns formáinak megjelenéséhez vezethetnek, a mágneses szélességi körök, félteke-függően irányíthatják a kókuszpalmák spirális elrendeződésének jobbos (É) vagy balos (D) irányultságát, végül pedig, hogy tkp. a holdfázisok ill. szoláris rotációs ciklusok és felharmonikusaik a növényekben (pl. juharban) elektródokkal is kimérhető áramlásbeli változásokat – s így közel heti, kétheti ill. havi ritmusokat - generálhatnak (MINORSKY, 2007)

Mivel az állatok esetében bizonyítható, hogy a mágneses tér érzékelése – részben legalábbis – a kriptokrómok közvetítésével érvényesül, növények esetében is felmerül a lehetőség, hogy gyenge mágneses tér befolyásolja a kriptokrómok kontrollálta reakcióikat. Ezt a problémakört két kutatócsoport is vizsgálta (AHMAD és mtsai, 2006; HARRIS és mtsai, 2009), azonban egymásnak ellentmondó eredményt kaptak. *Arabidopsis* növényeken folytatott, igen hasonló körülmények közt kivitelezett vizsgálataik során két, a kriptokrómok által (is) szabályozott, és jól megfigyelhető tulajdonságot vizsgáltak, nevezetesen az antocián felhalmozódást és a hipokotil megnyúlásának gátlását.

Antocián felhalmozódás

Az első kutatócsoport (AHMAD és mtsai, 2006) azt találta, hogy az antocián felhalmozódás mértéke azon növények esetén, melyek erős (500 μ T) mágneses térben nevelkedtek, szignifikánsan nagyobb volt, mint azon növények esetében, melyek a helyi – természetes – mágneses mezőben (40 μ T) nevelkedtek.

A másik kutatócsoport (HARRIS és mtsai, 2009) mindazonáltal nem talált eltérést a különböző mágneses térben nevelt növények antocián felhalmozásában.

Hipokotil növekedés gátlása

Az első kutatócsoport a növényeket két helyszínen (Párizs és Frankfurt) vizsgálta, mindkét helyen megegyező eredmények születtek. A kísérletek során kék és vörös fény alatt, valamint teljes sötétségben vizsgálták a lúdfű *hy4-3fha1* névre keresztelt mutánsát, melyben a két növényi kriptokróm gén (*Cry1*, *Cry2*) inaktív formában van jelen. A kapott eredmények azt mutatták, hogy kék fénnel való megvilágításban a várt eredmények születtek, vagyis a vad típusú növényeknél a növekedés a kék fény és a mágneses tér erősségével arányosan gátolt volt. Vörös fényben, illetve

megvilágítás hiányában ellenben a kísérleti növények közt viszont nem volt megfigyelhető szignifikáns különbség – ami arra utalhat, hogy a kriptokrómok közvetítette hatások mágneses befolyásolásához az említett molekulák kék fény közvetített, aktivált állapota is alapvető feltétel.

Harris és kutatócsoportja ugyanakkor ez esetben sem találtak szignifikáns eltérést a különböző körülmények között nevelt növényekben.

E két kísérlet eredményéből világosan látszik, hogy a kriptokrómok közvetítésével zajló mágneses térérzékelés ugyan növények esetében is egyike a leginkább támogatott, s talán legvalószínűbb mechanizmusoknak, még távol vagyunk attól, hogy ezt határozottan és különösen kizárólagos jelleggel és ki is jelenthessük.

4. CÉLKITŰZÉS

Kísérleteimmel a Budapesti Corvinus Egyetem Növényélettan és Növényi Biokémia Tanszékén előzetesen folytatott kísérletekbe kapcsolódtam be, azokat folytattam. Így a korábban azonosított, megfelelő elrendezéseket alkalmazhattam, némely esetben pedig azokat módosítottam, továbbfejlesztettem. Ezen kísérletekben célul tűztük ki az esetleges makroszkóposan látható elváltozások megfigyelését, feljegyzését, valamint a Tanszéken kapott korábbi eredmények megerősítését.

5. ANYAG ÉS MÓDSZER

5.1 Felhasznált növények

5.1.1 Lóbab (*Vicia faba* L.)

Rendszertanilag a hüvelyesek (*Fabaceae*) közé sorolható, Észak-Afrikából származó, hazánkban növekvő jelentőségű, termesztésben lévő haszonnövény. Kísérleteinkhez a német Sperli Samen cég *Dreifach weisse* fajtáját használtuk fel.

5.1.2 Lúdfű (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.)

Ez a kistermetű, őshonos növény a keresztesvirágúak (*Brassicaceae*) családjába tartozik. Alacsony kromoszómaszáma, teljesen megszekvenált genomja és igen rövid tenyészideje miatt előszeretettel használják a kutatók kísérletük alanyaként. Kísérleteink során a *Columbia* ökotípust és annak *cry1-304-cry2-1* dupla deficiens mutánsát használtuk fel (utóbbiban a mutációk a kék fény receptorok *Cry1* és *Cry2* génjét érintik, minek következtében a mutáns nem képes aktív kriptokróm fehérjét szintetizálni). A mutánsokat Dr. Kozma-Bognár László, az MTA SZBK, Növénybiológiai Intézet, Növényi Foto- és Kronobiológiai Csoportjának tudományos főmunkatársa bocsátotta rendelkezésünkre.

5.2 Felhasznált mágnesek

Homogén, statikus mágneses térben tervezett kísérleteink során a mágneses erővonalak kétféle (függőleges és vízszintes tengelyű) irányultságának hatását vizsgáltuk. Célunk eléréséhez két különböző (érdemben egy nagyságrend eltérést mutató) térerősségben is dolgoztunk – ennek biztosításához kétféle mágneset használtunk: patkómágnes (5-1. ábra) és hengermágnes (5-2., 5-3., 5-4. 5-5. ábra).

A patkómágneses-rendszer megépítésében Markó Gábor és Nagy Gergely, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet munkatársai voltak segítségünkre. Minden patkómágnes 4 kisebb (5 x 2 x 1 cm) vas-neodímium-nikkel ötvözetű rúd-mágnesből épül fel a következő módon: 2-2 rúd-mágnes lapjával lett összeillesztve úgy, hogy ellentétes pólusaik kerültek egymás mellé. Az így nyert mágnespárok között egy U-alakba hegesztett vaskeretbe helyezve biztosítottunk összeköttetést úgy, hogy a két mágnespár között 1 cm maradt a távolság. A mágneses erővonalak ebben a rendszerben, a pólusok közti kis távolság miatt szintén párhuzamosak, de egy-egy patkón belül, a rés két oldalán fordított É-D-i irányultságúak. A „rövidre záró” vaskeret miatt ugyanakkor

jelentős mágneses mező képződik: a térerősség lokálisan, a ~1 cm-es részben egy-egy É-D pólus között eléri a 400 milliTeslát (a lapjukkal illeszkedő mágnespárok érintkezésének síkjában ugyanakkor 0 mT erősségű).

A hengermágnesek két példányát Kozák Attila, a Távközlési Kutató Intézet (TÁKI) egykori munkatársa bocsátotta rendelkezésünkre – eredendően egyes mikrohullámú berendezésekben a haladó hullámú cső gerjesztésére szolgáltak. A hengerek tulajdonképpen egyenként 4-4 darab, egyforma polaritással párhuzamba rendezett és végeiken ~9 cm-es átmérőjű hengerpalást mintájára, körbefogatott rúd-mágnesből (12 x 5 x 1,5 cm) állnak. Belsejükben a mágneses tér az összetorlódó, párhuzamosított É-D irányú erővonalak miatt homogénnek tekinthető, a legfrissebb mérések szerint azonban, a két példányban kissé eltérő erősségű: az egyikben 40-42 mT (I.), a másikban 33 mT (II.) – a tengelyvonal két végén ugyanakkor mindkét esetben 0-ra csökken. A mágneses rendszernek megfelelő fa kontroll panelek utángyártását Gecse János végezte a BCE KERTK Műszaki Tanszékének lakatosműhelyében.

5.3 Növénynevelés

5.3.1 A lóbab csíranövények nevelése

A hüvelyes faj csíranövényeinek előnevelését és mágneses kezelését vízkultúrában nevelt egyedeken végeztük, 10 óra sötét és 14 óra fényperiódusú megvilágítás mellett, 22°C-on, Budapesti Corvinus Egyetem Növényélettan és Növényi Biokémia Tanszékének Conviron Model S10H növénynevelő klímakamrájában.

A magokat felhasználásig a tanszék 4°C-ra beállított, légkondicionált hűtőhelyiségében tároltuk. Az előválogatott (egészséges, ép és esetleges szennyeződésektől megtisztított) magokon első lépésként duzzasztást végeztünk 1-2 órán át desztillált vízben, majd a megduzzadt magokat nagy lyukú, 4 literes, desztillált vízzel töltött csíráztató edény rácsára helyeztük nedves vatta alá, így könnyebben indulhatott meg a csírázás. A csíráztatás kezdetétől számított 12-20. napon, amikor a csíranövények elérték a 3-5 cm-es hosszúságot, kezdődtek meg a hajtásnövekedést elemző kísérletek. A gyökérnövekedés vizsgálatát megközelítőleg 7 napos, 3 cm gyökérhosszat elért egyedek kezelésével indítottuk. A mágneses kezelések minden esetben megközelítőleg egyforma fejlettségű növényeken, friss, feles Hoagland tápoldato (ld. 5.3.3-as fejezet) vízkultúrában indultak meg.

5.3.2 A lúdfű steril magvetése

A lúdfű mágneses kezeléséhez steril körülmények között, szilárd táptalajon csíráztatott magvakra volt szükség. A vad és a mutáns genotípus magjait, előkezelésként szintén a fent említett hidegkamrában, +4°C-on tároltuk felhasználásig. A magvetés előtt a magokat négy lépésben sterilizáltuk:

- | | |
|--|----------|
| 1. 70%-os etanol | 1 perc |
| 2. 3x-os hígítású Hypo + 0,1% Tween 20 | 10 perc |
| 3. 70%-os etanol | 1 perc |
| 4. Desztillált vizes mosás | 3x2 perc |

Az így előkészített magokat steril fülkében, 3 cm átmérőjű Petri-csészékbe előöntött, steril $\frac{1}{2}$ MS szilárd-táptalaj felszínére helyeztük. Egy edénybe 20-30 mag került, egymástól megközelítőleg 2-3 mm távolságra elhelyezve. A Petri-csészéket a művelet végén zsugorfóliával lezártuk, majd az 5.4.2 fejezetben leírt mágneses rendszerbe helyeztük. A csíranövények 21°C-ra temperált fényszobában nevelkedtek, napi 12 órás megvilágítás mellett.

5.3.3 Oldatok és reagensek

Tápoldat készítése:

A vízkultúrában nevelt növényeknél minden esetben feles Hoagland-tápoldatot alkalmaztunk a kísérletek során. Az oldatot az alábbi recept szerint készítettük (LÁNG és mtsai, 1994):

A tápoldat 4 féle makroelem, egy mikroelem és egy vastartalmú törzsoldatból áll össze:

Makroelem törzsoldatok (g/1000 ml Milli-Q víz)

- | | |
|--|---------|
| 1. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ | 49,35 g |
| 2. KNO_3 | 34,65 g |
| 3. KH_2PO_4 | 14,28 g |
| 4. $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ | 27,30 g |

Mikroelem törzsoldat (g/1000 ml Milli-Q víz)

- H_3BO_3 4,285 g
- MnSO_4 2,068 g
- $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ 0,331 g
- $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ 0,036 g
- $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ 0,12 g

Na-Fe EDTA törzsoldat (g/1000 ml Milli-Q víz)

- Na-Fe EDTA 7,342 g

Egy liter feles Hoagland tápoldat készítéséhez a makroelem törzsoldatokból 14,25 ml-t, a mikroelem törzsoldatból 1 ml-t, a Na-Fe EDTA törzsoldatból pedig 6,7 ml-t mértünk be, majd desztillált vízzel 1000 ml-re kiegészítve gondosan megkevertettük.

Táptalaj készítés:

Feles MS (MURASHIGE és SKOOG, 1962), szilárd táptalaj készítésénél a szükséges makroelemek, mikroelemek, és mezoelemként vas törzsoldatát, valamint különböző vitaminokat, szacharózt és agart mértünk össze az alábbiak szerint:

Makroelem törzsoldat (g/1000 ml Milli-Q víz)

- NH_4NO_3 0,825 g
- KNO_3 0,95 g
- $\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ 0,22 g
- $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ 0,185 g
- KH_2PO_4 0,085 g

Na-Fe EDTA törzsoldat (mg/1000 ml Milli-Q víz)

- Na-Fe EDTA 25 mg

Mikroelem törzsoldat (mg/1000ml Milli-Q víz)

- KI 0,83 mg
- H_3BO_3 6,3 mg
- $\text{MnSO}_4 \times 4\text{H}_2\text{O}$ 22,3 mg
- $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ 8,6 mg
- Na_2MoO_4 0,25 mg
- $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ 0,025 mg
- $\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ 0,025 mg

Vitaminok (mg/1000 ml Milli-Q víz)

- Mezo-inozit 100 mg
- Thiamin – HCl 0,1 mg

- Piridoxin – HCl 0,5 mg
- Nikotinsav 0,5 mg

Agar (g/1000 ml Milli-Q víz)

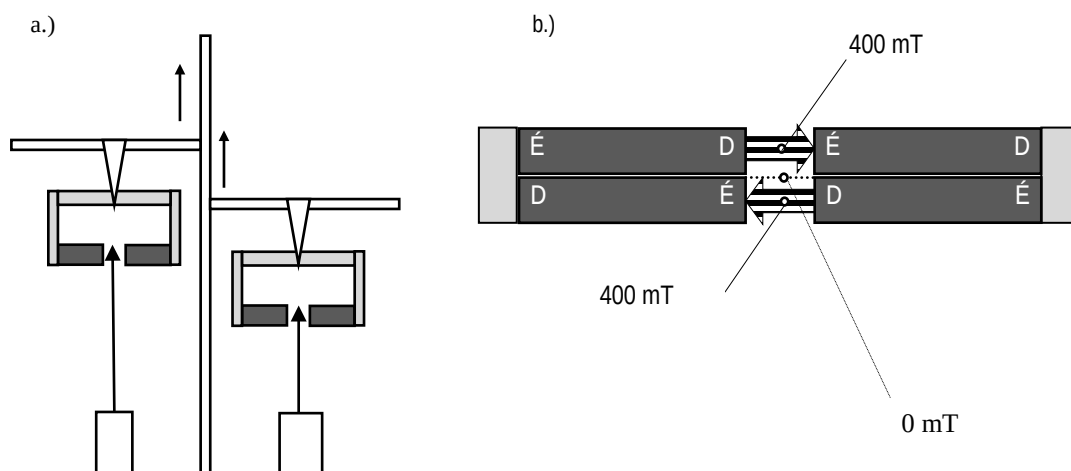
- Plant agar 7 g

Szacharóz (g/1000 ml Milli-Q víz)

- szacharóz 20 g

5.4 Kísérleti elrendezések

5.4.1 Patkómágneses elrendezés



5-1. ábra – A rajzokon a függőleges tengely mentén állítható magasságú patkómágneses elrendezés látható a.) oldalnézetben, míg a b.) ábra a mágnespárokból felépülő patkómágnes felülnézeti képét mutatja. Ebben az elrendezésben a kiválasztott, korlátozott méretű növényi régió (pl. hajtáscsúcs) célzott kezelése lehetséges a vízszintes É-D-i irányultságú, 400 mT erősségű, homogén mágneses mezőben (Forrás: Palásthy, 2009 nyomán).

Ebben a patkómágneses elrendezésben (5-1. ábra) a kezelésre alkalmazott É-D irányultságú (~400 mT erősségű) mágneses mező tengelye vízszintes. A mágnes két pólusa között lévő 1 cm széles rés alkalmas arra, hogy a növény bizonyos, kiválasztott régióját folytonosan vagy éppen időlegesen (átnövesztési jelleggel) kezelve, célzottan vizsgálódjunk. Esetünkben, a keretet fokozatosan emelve a hajtáscsúcs hosszútávú kezelését választottuk – a vizsgálat alanyául pedig vízkultúrában nevelt lóbab csíranövényeket. A növényeket a csíráztatástól számított második hét végén, 5 internódiumos fejlettségi állapotban helyeztük a mágneses mezőbe. A kontroll növények vizsgálatánál fából készült patkókat alkalmaztunk, szintén négy-négy technikai párhuzamossal.

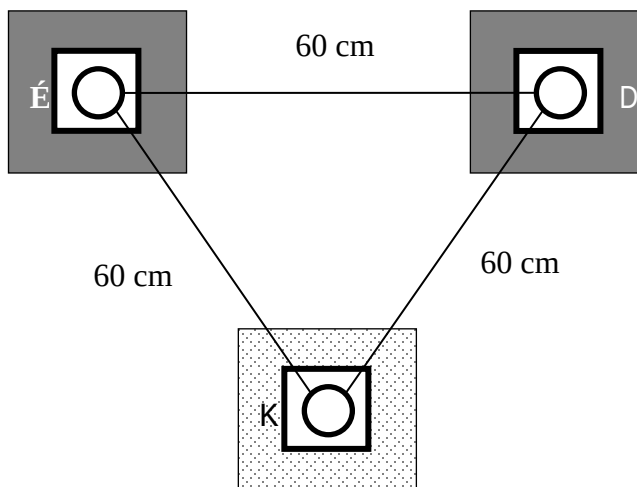
5.4.2 Hengermágneses elrendezések

Lóbabok esetében:

a.)



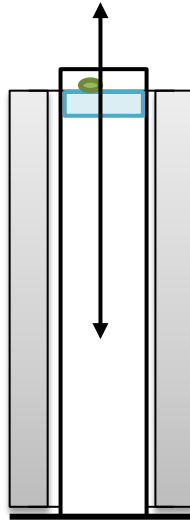
b.)



5-2. ábra – A hajtásnövekedés vizsgálata hengermágneses elrendezésben a.) egy fényképen, b.) felülnézeti ábrán. A hengermágnesek a növénynevelő berendezésben egymástól egyenlő (60 cm) távolságra voltak elhelyezve, a növények pedig keresztülköttek rajtuk. Ebben az esetben mindig más, éppen differenciálódó régióra hat a függőleges É-D vagy D-É tájolású ~40 mT (40-43, ill. 33 mT) erősségű statikus mágneses mező.

Kísérleteinkhez, a függőleges, s így a hajtás- ill. gyökér fő növekedési irányával megegyező tengelyű mágneses tér hatásának követésére – robusztus növekedése, merev, gyorsan differenciálódó hajtása és ortotrop főgyökere miatt, valamint a szakirodalomban fellelhető, mágneses térre való érzékenységeire vonatkozó adatok (GALLAND és PAZUR, 2005) miatt választottuk a lóbabot. A mágneses és fahengerek egy-egy példányában, egy-egy lóbab egyed hajtásának, ill. gyökérzetének kezelésére volt lehetőség a méretek adta korlát miatt. Az északi és déli pólus lehetséges eltérő hatásának teszteléséhez a hengermágneseket fordított állásban helyeztük el, az egyiknél az északi, a másiknál pedig a déli pólus nézett felfelé. Előbbit ezentúl É-vel, utóbbit pedig D-vel jelölöm.

A hajtásnövekedés vizsgálatához a hengerekbe azonos fejlettségű, vízkultúrában előcsíráztatott növényeket helyeztünk, amikor azok hajtása a 3-5 cm hosszúságot elérte – a csíratál rácsára állítva, a hengerek a kísérleti alanyokat körülölelték, de lehetőleg minimálisan érték csak hozzájuk (5-2. ábra). Ekkor az egyedek megközelítőleg a 12 cm magas hengerek harmadáig értek. A növények megvilágítása felülről volt biztosított, a henger tetején található ~5 cm átmérőjű nyíláson, illetve a rúdágnesek összeillesztése során keletkezett, oldalsó réseken. A nyílások a légáramlást szintén lehetővé tették.

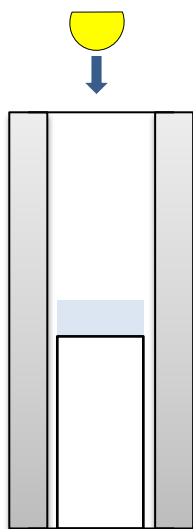


5-3. ábra – A hengermágnesben növő gyökérzet – oldalnézeti ábrázolásban. Az ábrán látható módon a mágneshengerbe helyezett, tápoldatot tartalmazó plexi-hengerben, hungarocell csónakon úszik a vizsgált egyed, gyökere a mágnes belsejébe nő.

A gyökérnövekedés célzott vizsgálatához a mágneshengerekbe szorosan illeszkedő plexi-hengereket gyártattunk, melyben a henger tetejével egy magasságban, hungarocell csónakon lebegett a tápoldatban a csíranövény (5-3. ábra). A kísérletet kb. egy hetes, 2-3 cm gyökérhosszt elérő egyedeken indítottuk.

Lúdfű esetében:

Ebben a kísérleti rendszerben az egyedfejlődés egészen korai stádiumát, a csírázást és a hipokotil növekedést vizsgálhatjuk a 33, ill. 40-42 mT erőterű, homogén mágneses mezőben – az előbbihez hasonlóan, függőleges (a normális növekedési tengellyel párhuzamos) erővonalak mentén. A függőleges É-D irányultságú mágneses térben, a henger belső terének közepén, távtartón helyezkedik el a steril körülmények közt, szilárd táptalajon csírázó lúdfű állomány, amely a megvilágítást felülről kapja (5-4. ábra).



5-4. ábra – A képen az álló hengermágnes oldalnézete látható. A felülről megvilágított, 12 cm hosszú henger (33, ill. 40-42 mT függőleges, homogén mágneses erőterű) belső terének közepén, üveg távtartón helyezkedik el a 3 cm átmérőjű Petri-csésze, melyben a növények nevelkedtek.

5.5 Mérések és kiértékelések

Lóbabok esetében a kísérletek során a lehető leggyakrabban (általában naponta) mértük a növények teljes hajtáshosszát, a szártagok számát és hosszát, és az adatgyűjtést a fejlődő levelek hosszára és a legnagyobb szélességére is kiterjesztettük. A mérések során többféle eszközt is felhasználtunk. Az internódiumok hossz mérésére, illetve a növény teljes magasságának megállapításához milliméter beosztású vonalzót alkalmaztunk. Ugyanezzel az eszközzel végeztük a levelek hosszának és szélességének mérését is. Azokban az esetekben, mikor vizsgálataink tárgya nem a hajtás, hanem a gyökér volt, a hossz mérésénél szintén vonalzót használtunk, de a gyökér vastagságának megállapításához egy Feinmess-Suhl mikrométert használtunk.

A lúdfüvek hipokotil hosszának mérése sokkal nehezebb feladat volt, ugyanis az alig pár milliméter nagyságú, törékeny növények kézbe vétele nem igazán kivitelezhető, így más módszerhez folyamodtunk. A kis növényegyedeket csipesszel óvatosan tárgylemezre helyeztük, párhuzamosan egymás mellé, majd egy Leitz Labovet mikroszkópra szerelt Olympus E-450 fotófeltét segítségével, 2,5x nagyítású objektív mellett lefotóztuk, és számítógépen Promicra Quick PHOTO CAMERA 2.3 szoftver segítségével meghatároztuk a kívánt növényi rész hosszát. Az adatok statisztikai kiértékelését MS Excel programban végeztük kétmintás t-próbát használva.

6. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Kutatásaink során megbízható kísérleti elrendezések megalkotására és ismételhető, állandósítható kísérletek megtervezésére törekedtünk, amelyekben a növényben keletkező morfológiai változásokat reprodukálhatóan, hosszabb időn keresztül is detektálhatjuk sérülések nélkül. Olyan rendszer felállítása volt a célunk, amelyben a későbbiekben is megbízható növényanyagot nyerhetünk a megfigyelt mágneses jelenségek okainak és mechanizmusainak feltárására tervezett szövettani és molekuláris vizsgálatokhoz. Vizsgálataink során a vízszintes és függőleges É-D irányultságú, homogén, statikus mágneses mező hatását vizsgáltuk két, nagyságrendjében is eltérő erőterben, valamint a két pólus eltérő hatásának lehetőségét, mert utóbbira a szakirodalomban eddig kevés hivatkozás született (ODHIAMBO és mtsai, 2009).

Vizsgálódásainknál csak kisszámú mágnessel dolgozhattunk, ezért a statisztikai kiértékelésekhez szükséges mintaelemszámot – az egy-egy kísérletben adott, gyakran csekély számú technikai ismételts mellett – a független kísérletek számának növelésével igyekeztünk gyarapítani. Analíziseink során kétféle (patkó és henger) mágnest alkalmaztunk, ezért e csoportosítás alapján szeretném részleteiben ismertetni a kísérleteket és a kapott eredményeket, mind a kísérleti elrendezés, mind pedig a kísérleti alanyok fejlődésében megfigyelt változások értékelése tekintetében.

6.1 Patkómágnes

A kísérleti elrendezést az 5.4.2.1-es fejezetben ismertettem már. Az elrendezés használatához egy sereg problémát kell kiküszöbölni, ami esetünkben sajnos nem mindig sikerült. Kísérleteinkben a mágneses térnek lóbab szártagjainak megnyúlására gyakorolt hatását analizáltuk, a hajtáscsúcs folyamatos kezelésével, a növekedésre merőleges tengelyű, ~400 mT erősségű mágneses térben

6.1.1 Kísérleti elrendezés értékelése

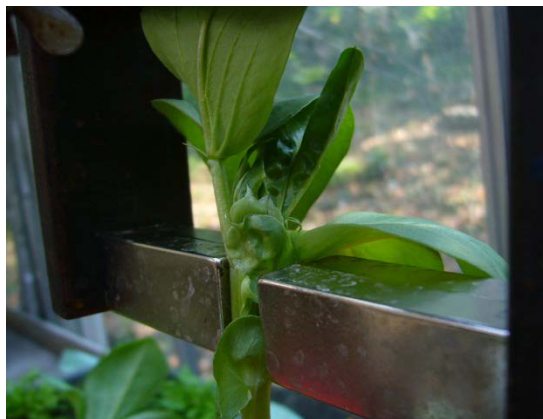
A vizsgálatok alkalmával a patkómágneseket egy állványra rögzítettük, alattuk, csíráztató tálban helyezkedtek el a növények (6-1. ábra) úgy, hogy hajtáscsúcsuk lehetőleg a mágnesek pólusai között legyen (6-2. ábra). A kísérlet során azonban hamar világossá vált, hogy a növények gyors növekedése miatt a napi ellenőrzés is kevés, ennyi idő alatt ugyanis túlnőnek a beállított pozíción. A robusztusnak tűnő kísérleti alanyok előnye volt, hogy külön támasz nélkül is viszonylag egyenesen meg tudtak állni, azonban éppen a merevségből adódott, hogy a leveleik kisebb behatásra is hamar

letörtek. A kontrollként használt fából készített patkók paramétereikben megegyeztek a mágnesesekével, így a fent említett problémák ott is jelentkeztek.

A felmerülő problémákból fakadóan ez a kísérleti rendszer nem volt igazán célravezető, így néhány próbálkozás után, a sikertelenségek miatt a hengermágneses elrendezést választottuk.



6-1. ábra – A patkómágneses elrendezés

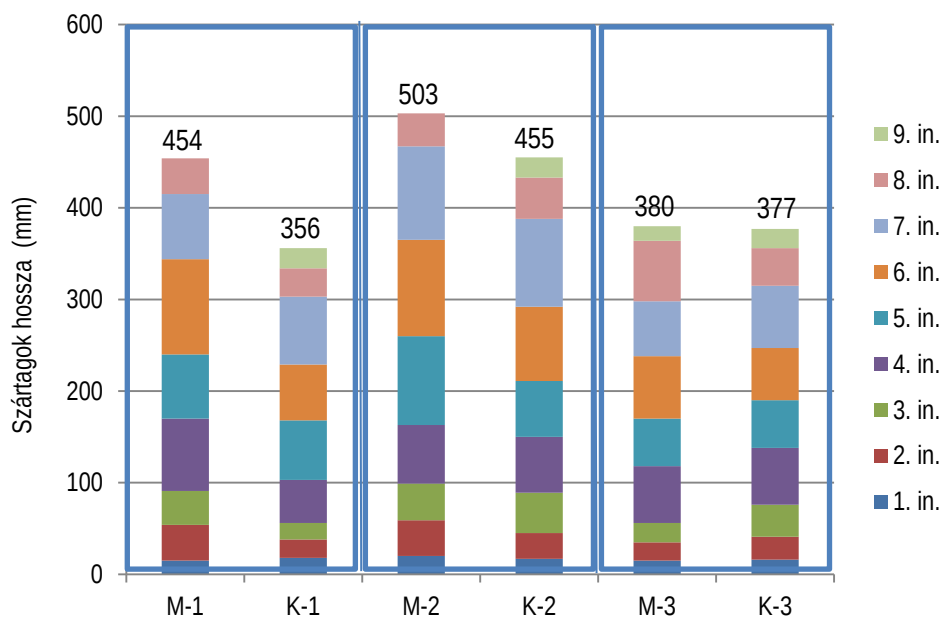


6-2. ábra – A két mágneses pólus között elhelyezkedő hajtáscsúcs

6.1.2 Eredmények

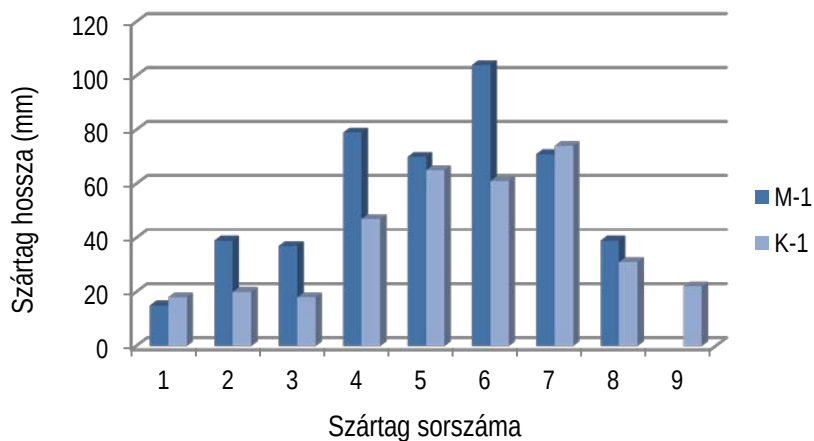
A 8 napon át követett kísérletben azt tapasztaltuk, amint azt az utolsó napi, összesítő kiértékelés is mutatja, hogy a kiinduláskor még páronként közel egyforma fejlettségű (13 cm-es) lóbab növények teljes hajtáshossza különbözővé vált az idő előrehaladtával, mégpedig úgy, hogy az esetek többségében a mágnessel kezelt nöttek magasabbra (**6-3. ábra**). A kezelt egyedeknél az internódiumok is rendszerint hosszabbak voltak (**6-4. a.)-b.)-c.) ábrák**). Utóbbi eltérés a behelyezés idején épp differenciálódását megkezdő, 6. szártag esetében következetesen jelentkezett, míg a későbbi kezelés alatt fejlődő internódiumok hosszbeli eltérései már nem voltak ennyire egyértelműek. Érdekes ugyanakkor, hogy a növekmény nemcsak azokra a szártagokra volt érvényes, amelyek fejlődése a mágnesbe helyezést követően indult meg: az idősebb (1-5.) internódiumok későbbi megnyúlásos növekedésében is eltérések jelentkeztek. Ez annál is inkább meglepő volt, mivel a behelyezést követő, pár naponként ismételt felvételezések során legtöbbször csak az épp aktuálisan fejlődésnek indult, ill. az újonnan megjelenő internódiumok hosszát rögzítettük, s a ténnyel csak az utolsó napi összegző mérés során szembesültünk. A kísérleti rendszer jellege miatt az idősebb szártagokra mindenesetre nem feltételeztünk közvetlen hatást. Azoknál a növénypároknál, amelyeknél a fenti elváltozások megfigyelhetők voltak (három esetből 25

kettőben), még egy fontos különbséget észleltünk, mégpedig, hogy a kontroll növényeken, amelyek összességében rövidebb hajtáshosszt produkáltak, eggyel több internódium fejlődött ki a kísérlet ideje alatt.

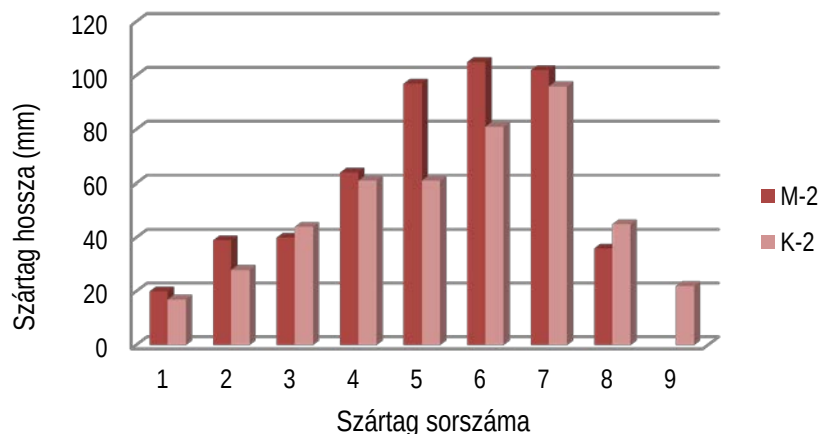


6-3. ábra – Patkómágnesek között nevelt lóbab növények növekedésbeli különbségei a kezelés 8. napján. A kísérleteket öt internódiummal bíró, páronként egyforma méretű egyedeken indítottuk. A 0,4 T erősségű mágneses mezőben (M) és a kontrollként fateretben nevelt (K) egyedek páronként eltérő sorszámmal (1,2, ill. 3), egymás mellett szerepelnek. Az oszlopok tetején a növények teljes magasságát tüntettük fel (mm), míg az oszlopokat felosztó, eltérő színű téglalapok az időben egymást követő internódiumokat (in) reprezentálják.

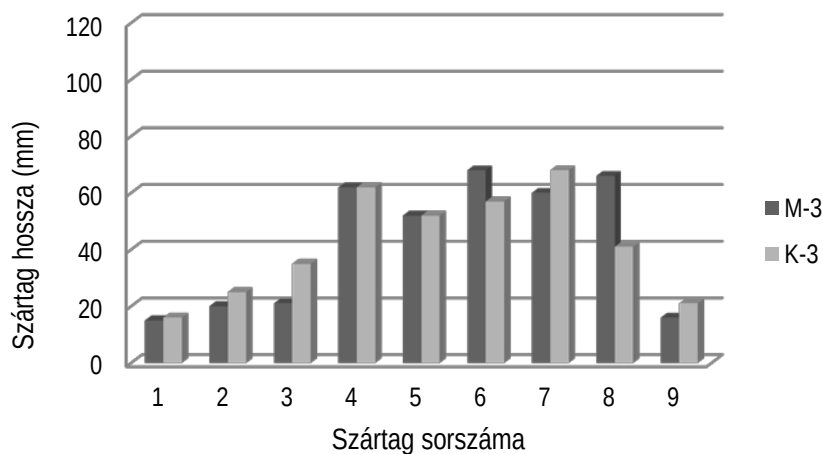
a.)



b.)



c.)



6-4. ábra - Patkómágnesek pólusai közt nevelt lóbab növények szártaghosszt érintő növekedéskülönbségei a kezelés 8. napján. A három diagramon (a., b. és c.) három különböző növénypár adatai szerepelnek.

Az ábrákon könnyen észrevehető, hogy a bemutatott kísérletben csak két párhuzamos esetben jelentek meg meggyőző erővel a vélt különbségek, míg a harmadik esetben – a kezelés megindításakor differenciálódó 6. internódium kivételével – nem tapasztaltunk jelentős eltéréseket (6-4. c.) ábra). Ahhoz, hogy megbízható következtetéseket vonjunk le, még jó pár ismétlést el kell majd végezni, de úgy tűnik, hogy a patkómágnese által biztosított 0,4 T erősségű mágneses tér jelentős serkentő hatással van a szár növekedésére nézve. A rendszer korántsem problémamentes, ezért alkalmazása inkább csak rövidtávon, nagy odafigyelés mellett eredményes, valamint a lehetőségeket tovább korlátozza, hogy – jelen, szoros elrendezésben – csak a kisebb növények ortotróp növekedésű (függőleges növekedésű, hosszanti irányban megnyúlt) részeinek vizsgálatára használható.

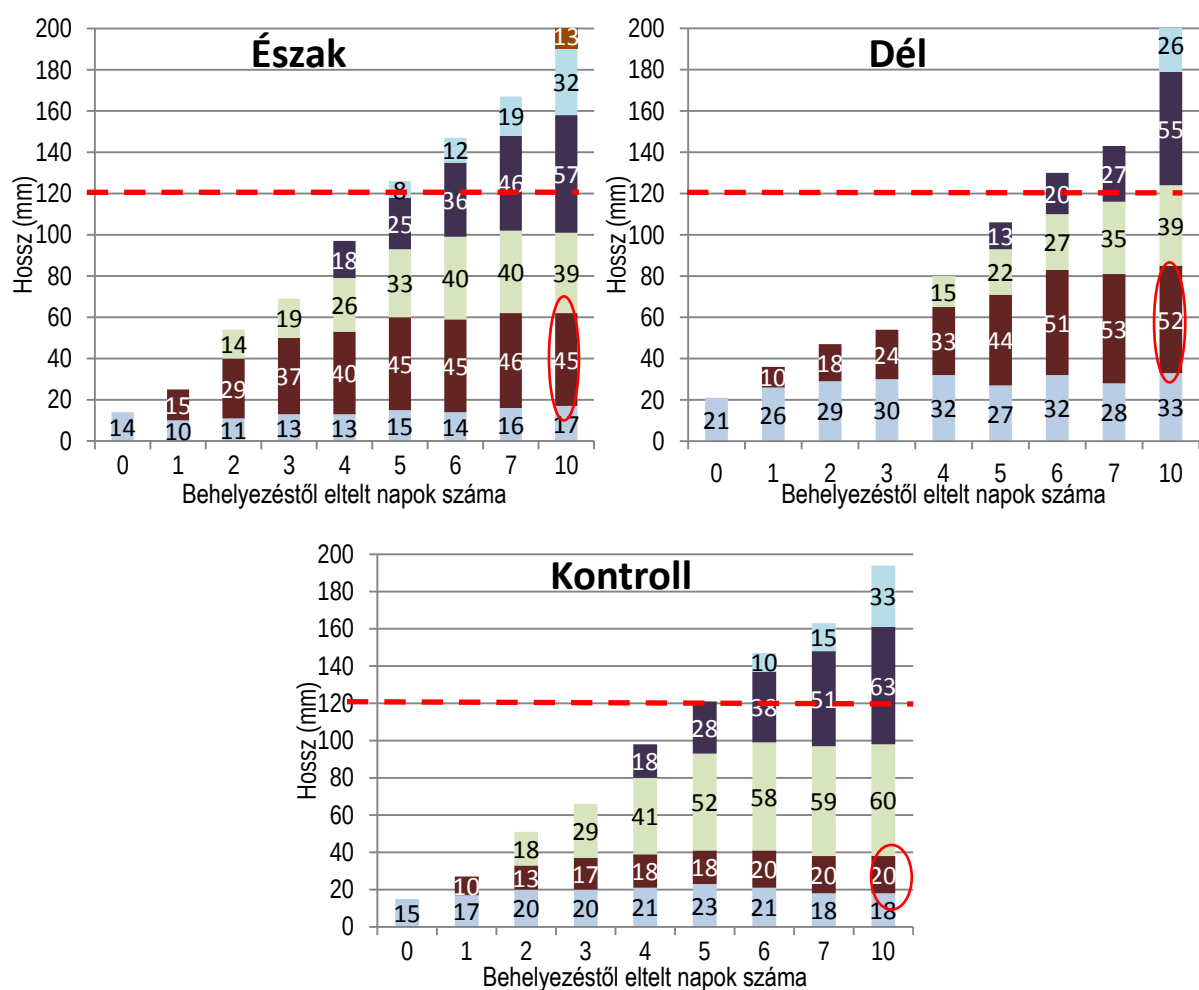
6.2 Hengermágnes

A patkómágnesekkel ellentétben, a hengermágneseknél függőleges az É-D irányultságú mágneses mező tengelye. A 4 darab mágnesvas összeszerelésével kapott hengerek mágneses mezője a henger belsejében homogén (33 mT, ill. 40-42 mT). Kísérleteink során figyelembe vettük az É-i és D-i pólus esetleges különböző hatásait is a henger megfordításával. Kontroll növények esetében szintén fából készült mágnes-utánszatokat használtunk.

6.2.1 Lóbab hajtás vizsgálatok kiértékelése

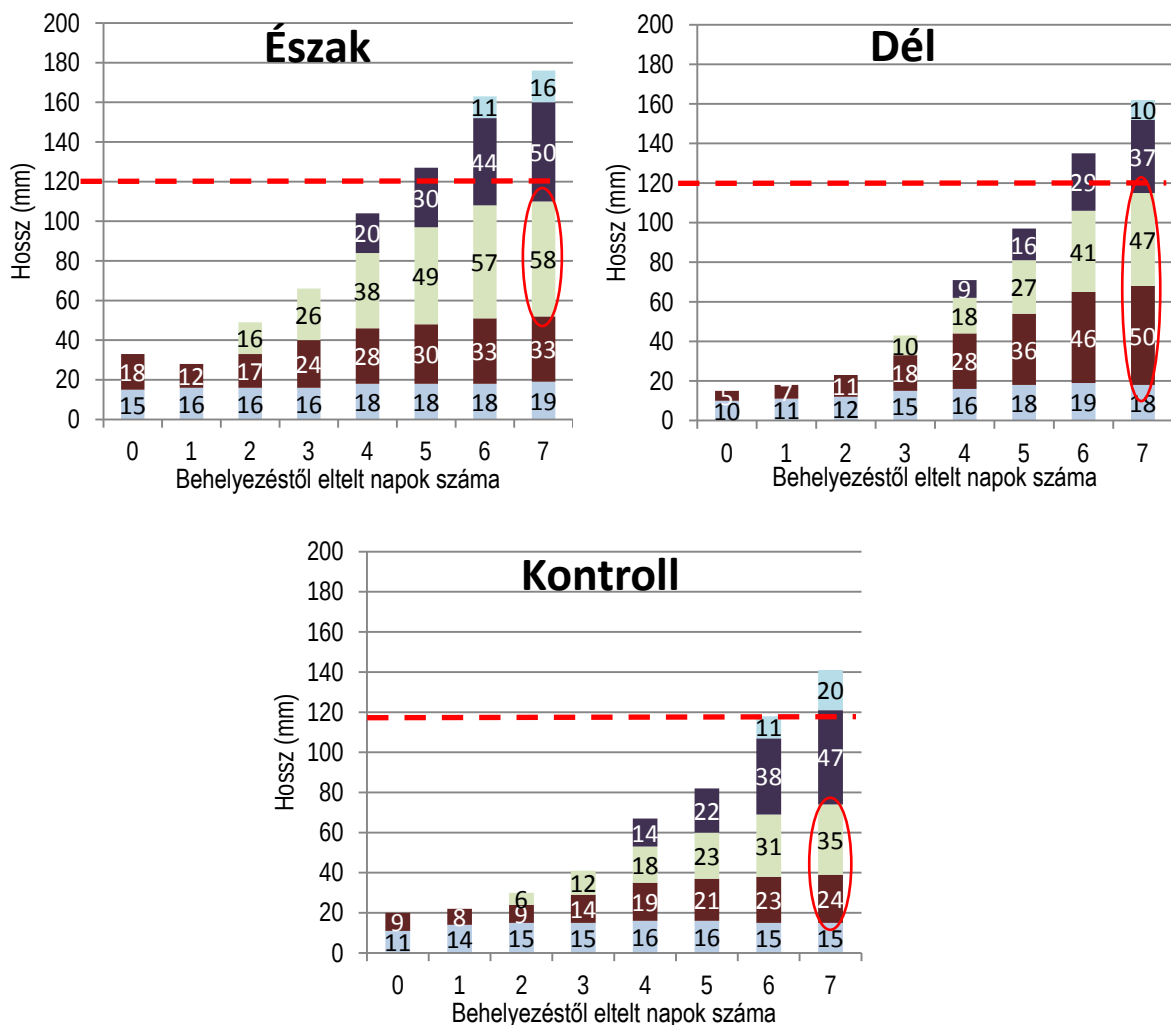
A kísérleti elrendezést az 5.4.2-es fejezetben vázoltam. Ez a rendszer kísérleteinkben jól bevált, ismételhető, tervezhető, közel azonos adatokat eredményező vizsgálatokat lehet vele végezni. Hátránya azonban, hogy a benne nevelt növényt minden mérés alkalmával ki kell szedni a hengerből, hogy hozzá lehessen férni, s e művelet közben gyakran sérültek a levelek. Meg kell még jegyezni, hogy a növények csírázása nem volt teljesen egyöntetű, ez gyakran nehezítette azt, hogy valóban egyforma fejlettségű növényekkel kísérletezzünk. Továbbá, a fiatal növények áthelyezésénél könnyen sérülhet a gyökércsúcs, ami a növény későbbi fejlődését jelentős mértékben befolyásolja.

Eredményeink alapján, melyeket a 6-5. és a 6-6. ábrán szemléltetünk, azt valószínűsítjük, hogy a függőleges irányultságú, ~40 mT nagyságú mágneses tér serkentő hatással van a hajtás növekedésére. Maga a változás abban nyilvánul meg, hogy amennyiben a mágnesbe helyezés pillanatában a 3-5 cm hajtáshosszú növénynek detektálhatóan X internódiuma fejlődött ki, akkor a megnyúlás jellemzően a következő, tehát X+1. szártagon figyelhető meg. A többi szártag hossza a mágneses térben és a kontroll hengerben nevelt egyedek között nem mutat jelentős különbséget. A tünetek legjobban a D→É irányban növekvő növéynél látszódtak („Északi” rendszer), azonban az ellentétes pólustájolással elhelyezett („Dél” jelölésű) mágnesben nevelkedett egyedeknél is hasonló jelenség mutatkozik. A növények vizsgálata általában csak addig folyt, amíg a hajtáscsúcs a mágnes tetejétől 15-20 cm-re el nem távolodott, ezután már nem fedeztünk fel újabb különbségeket a hajtást illetően.



6-5. ábra – A hengermágnesek függőleges erőterében fejlődő lóbabok hajtás- és szártaghosszáinak változása az időben, a behelyezést követő 10 nap folyamán (egy jellemző kísérlet eredményei). A piros szaggatott vonal a ~40 mT télerősségű mágnes magasságát mutatja. Az oszlopok magassága a teljes hajtásmagassággal egyezik meg, míg az oszlopokat darabokra osztó kisebb egységek a szártagok hosszát jelenítik meg.

A hengermágnes tövétől lefelé növekvő gyökerek esetében ebben az elrendezésben jelentős eltéréseket nem figyeltünk meg. Erre magyarázatként szolgálhat az a tény, hogy a gyökércsúcs a kísérlet alatt a mágneses erővonalaktól egyre csak távolodott. Később, a 6.2.2 fejezetben ezt részletesebben tárgyaljuk.



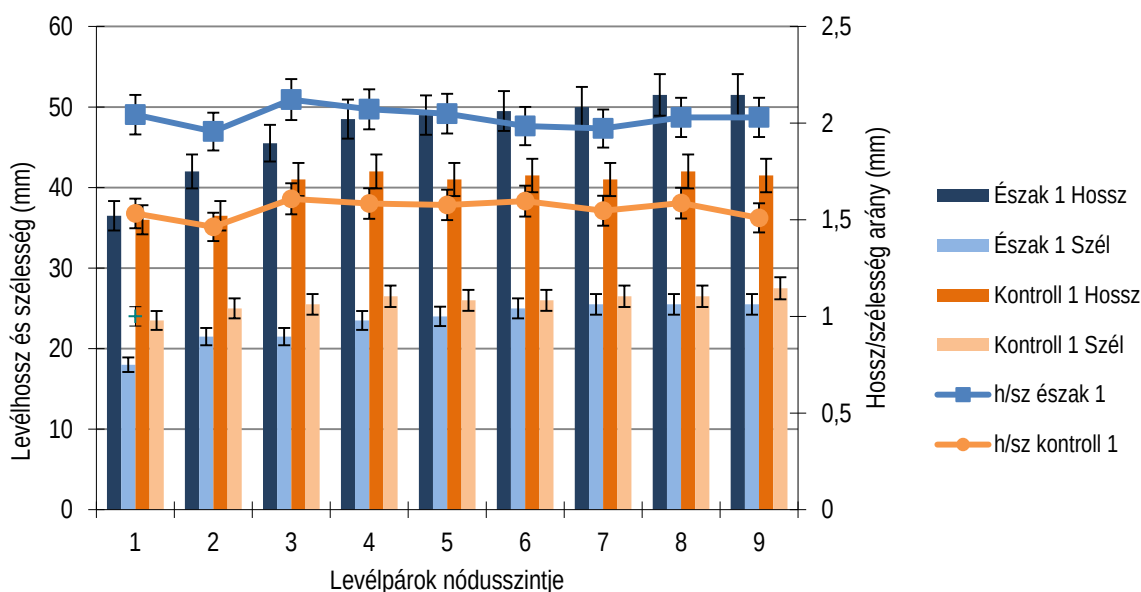
6-6. ábra – A hengermágnesek függőleges erőterében fejlődő lóbabok hajtáshosszának időbeni változása, a behelyezést követő 7 napon (egy másik jellemző kísérlet eredményei). A piros szaggatott vonal a ~40 mT térerősségű mágnes magasságát mutatja. Az oszlopok magassága a teljes hajtásmagassággal egyezik meg, míg az a különböző színnel jelölt szártagok hosszából tevődnek össze.

A 6-6. ábrán bemutatott kísérletben az előzővel nagyon hasonló eredményre jutottunk, azonban ebben az esetben az É-i és D-i növénynél kissé eltérő eredményeket kaptunk. Ezt ugyanakkor – több független kísérletünk kiértékelése alapján – nem az eltérő pólusok hatásának tudjuk be elsősorban. Inkább arra következtetünk, hogy a 6-5. ábrán bemutatott kísérlet által jól szemléltethető szabályszerűség módosul, azaz az X+1. szártagra érvényes „megugrás” kiterjeszthető az X. internódiumra is, ha az a behelyezés pillanatában még kellően fejletlen – ennek határértékét, méréseink alapján ~10 mm-nél valószínűsítjük.

Mivel több független ismételten alapján sem tapasztaltunk érdemi, illetve megbízhatóan reprodukálható különbséget abban a két homogén mágneses térben („É” és „D”), amelyek ugyan közel azonos nagyságúak, de a felcserélt pólusok miatt fordított irányú függőleges erővonalakkal jellemezhetők, így a későbbiekben csak „Északi” (É) és kontroll (K) elrendezést alkalmaztunk,

amellyel a technikai párhuzamosok száma is növekedett. A fenti rendszerben 11 kísérletet végeztünk el. Ezekből három kísérlet esetén súlyos technikai problémák léptek fel (elhalt vagy beteg növény), így adataikat nem vettük be a statisztikai értékelésbe. A maradék 8 kísérletből 7 esetben tapasztaltuk a mágneses mező befolyásoló hatását, a fennmaradó egy esetben pedig nem láttunk különbséget a mágnes- és fahengerben nevelt egyedek növekedésében.

Érdekes eredményre jutottunk a függőleges tengelyű, ~40 mT mágneses mezőben, amit a **6-7. ábrán** szemléltetünk. Ha jobban megfigyeljük az ábrát, kitűnik, hogy a mágneses hengerben és a fa hengerben nevelt növények levélkéinek szélessége nem tér el egymástól jelentős mértékben, viszont megváltozik a levélkéik hosszúsága és a hosszúság/szélesség arány. Azaz a mágneses térben nevelt növények levélkéi hosszabbak, mint a kontroll növényeké – így egyértelműen csak a hossz tengelyük növekményének köszönhető a levélalak változása. Ez a megfigyelés a két tengely megnyúlását szabályzó faktorok eltérő mágneses érzékenységét is előre vetítheti. További megjegyzésre érdemes, hogy ez a levélkéik hosszában mérhető különbség az egymást követő, újabb és újabb szárcsomók levélpárjain egyre szembetűnőbb és a 3-4. nódusz szintjén állandósul.



6-7. ábra – Levélméret ill. -alak alakulása , függőleges észak→dél irányítottágú mágneses térben (É) és fa hengerben növekvő lóbabok esetében (felvételezés a kísérlet 10. napján). Az egy-egy nódusz szintjén feltüntetett szórások a fajra jellemző átellenes levélállásból, továbbá a szárnnyasan összetett lomblevelek párosan elhelyezkedő levélkéinek eltéréseiből adódnak.

Összességében, eredményeink alapján tehát elmondható, hogy a statikus mágneses tér jelentős serkentő hatással van a hajtás növekedésére, a leveleknél a méret csak kis mértékben változik, inkább a levélkéik alakja módosul. Ezen kísérletek során minden esetben előcsíráztatott növényeket vizsgáltunk, azonban érdekes lehet egy olyan kísérlet beállítása is, amelyben a növények közvetlenül a mágnes hengerben csíráznak, így a csírázásra gyakorolt hatást is vizsgálhatnánk.

6.2.2 Lóbab gyökérnövekedés vizsgálata

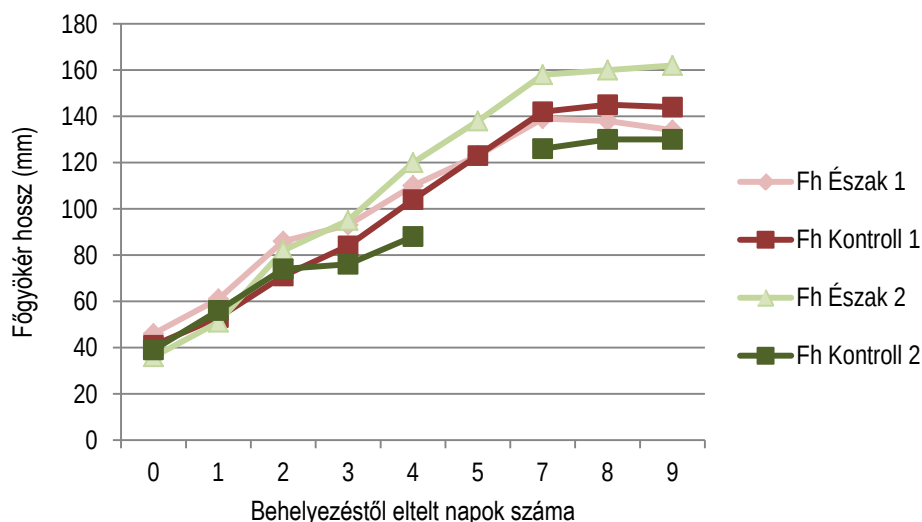
Külön vizsgálatot indítottunk annak kiderítésére, hogy vajon a növények gyökere is mutat-e valamilyen eltérést a statikus homogén mágneses térben történő nevelés hatására. Ezekben a kísérletekben a növényt arra kényszerítettük, hogy a gyökérzetét a hengerek belsejében nevelje. Ezt egy erre a célra készített plexi hengerrel oldottuk meg, melyben a henger tetejével egy magasságban hungarocell csónak lebegett a tápoldaton, ezen a lebegő szerkezeten pedig a kis csíranövény helyezkedett el (6-8. ábra). Ebben az elrendezésben nem volt szükség a nagy csíráztató edényekre.



6-8. ábra – A gyökérvizsgálatoknál használt kísérleti elrendezésről készült felvételek. Az elsőn a plexi henger látható az „úszó” növényrel, a másodikon pedig a mágnes hengerben való elhelyezkedése figyelhető meg.

A kísérletben megközelítőleg egy hetes csíranövényeket helyeztünk a csónakokra, amelyeknek a gyökere már átért a hungarocell lemezen a tápoldatba. A gyökerek teljes hosszát rendszeresen (lehetőség szerint naponta) mértük, de idővel a hungarocell tartóból való kivétele lehetetlenné vált a sok mellékgökér miatt. A kapott eredményeket a 6-9. ábra szemlélteti. Láthatjuk, hogy az egyik növénypárnál a mágnes hengerben nevelt növény főgyökere hosszabbra nőtt, mint a fa hengerben nevelt párja, a másikon azonban ez a különbség idővel eltűnik, sőt megfordul, így ebből semmiképp nem vonhatunk le érdemi következtetéseket.

E rendszerben ezidáig csak ezt az egyetlen kísérletet végeztük, mely előkísérletnek tekinthető. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a kísérlet alanyaként szolgáló lóbab erőteljesen növekvő főgyökere hamar elérte a plexi-cső alját, azaz mechanikai hatás érvényesült rá, ezért a későbbiekben esetleg célszerű lehet áttérni kisebb gyökérzetű növényfajok vizsgálatára. A rendszer ígéretes eredményei mindenesetre magában rejtik a további vizsgálatok lehetőségét.



6-9. ábra – A lóbab főgyökerének hosszában bekövetkező változások függőleges irányultságú, ~40 mT erősségű mágneses tér hatására. Fh-val a főgyökér hosszát jelölöm, a számok (1,2) pedig a növénypárokat mutatják.

6.2.3 Lúdfű álló mágnes hengerben

Valamennyi kísérleti elrendezés közül ebben a rendszerben lehetett a leghatékonyabban dolgozni. A kísérletek menete itt volt a legjobban tervezhető, szinte óramű pontossággal voltak egymás után végezhetőek a független ismétlések. A rendszer további előnye, hogy nagy (több tucatos) egyedszámmal dolgozunk, így a statisztikai kiértékelésnél megbízhatóan nagyszámú párhuzamos áll rendelkezésre. Mint minden rendszernek, ennek is megvannak a maga hátulütői. Ilyen például a sterilitás megőrzésének fontossága, ugyanis, a táptalaj befertőződése, a fertőzött területen jelentősen visszaveti a megfigyelendő csíranövények növekedését. Fontos megjegyezni, hogy mivel zárt rendszerben dolgozunk, gyakorlatilag csak végpont analízisre van lehetőségünk, így a változások dinamikáját nem vagy csak korlátozottan tudjuk tanulmányozni. Az alkalmazott Petri-csészék sem voltak ideálisak a kísérlethez, ugyanis túlságosan alacsonyak, így a növények hamar elérték a tetőt. Ez a probléma a jövőben magasabb tenyészedények használatával egyszerűen kiküszöbölhető.

A szakirodalomban egymásnak ellentmondó eredményeket találunk a mágneses tér növényi hipokotil megnyúlásra gyakorolt hatása tekintetében – melyet jelen ismereteink szerint a kriptokrómok kontrollálnak. Két kutatócsoport (Ahmad és mtsai, 2006; Harris és mtsai 2009) témát felölelő munkásságáról és egymásnak ellentmondó eredményeiről már a 3.5.2 fejezetben beszámoltam.

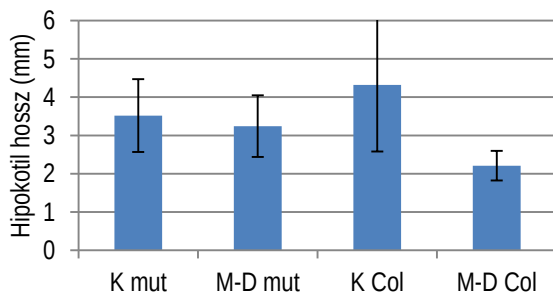
Ebben a vitában kívántunk állást foglalni, amikor elhatároztuk az *Arabidopsis* kísérlet beállítását. Vizsgálatainkat nem csak a vad típusú lúdfű mágnes és fa hengerben nevelt egyedeinél

potenciálisan megfigyelhető különbségekre szorítkoztak. A Dr. Kozma-Bognár László (Szegedi Biológiai Kutatóközpont) által rendelkezésünkre bocsátott *cry1-cry2* dupla hiánymutánsok ugyanis tovább bővítették lehetőségeinket, hiszen mai ismereteink szerint az *Arabidopsis*-ban ez a két kriptokróm közvetíti a hipokotil növekedésének kékfény okozta gátlását. A kísérleti rendszert az 5.3.2 és az 5.4.2 pontokban leírt módon alkalmaztuk. A növények általában egy hétig nőttek táptalajon, az álló hengerekben, utána lemértük a hipokotiljuk hosszát, az eredményeket (6-10. ábra) pedig kétmintás t-próbával értékeltük ki.

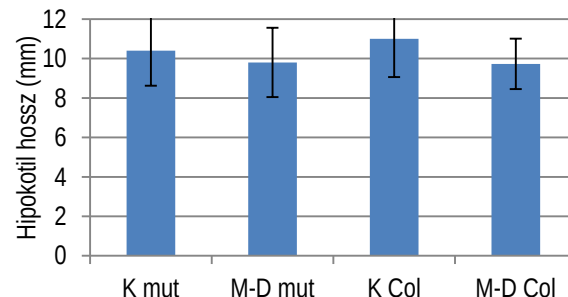
Amennyiben feltételezzük, hogy AHMAD és munkatársainak (2006) van igaza, kísérleteinkben azt várjuk, hogy a mágnesben nevelt vad típusú lúdfű (M-D Col) hipokotiljának átlagos hossza lesz a rövidebb, míg a kontrollként nevelt szintén vad típusú lúdfű esetén ennél szignifikánsan hosszabbnak mutatkozik. A *cry1-cry2* duplamutánsok esetében, függetlenül attól, hogy mágnes vagy fa hengerben nevelkedtek, közel azonos hipokotil hosszúságot várunk, mert ott a mágneses tér kriptokrómokon keresztül érvényesülő hatása nem tud érvényesülni.

Az elvégzett, értékelhető kísérletek kétharmadánál (6 kísérletből 4-szer) a várt eredmény jelentkezett, s csupán a fennmaradó egyharmadban nem észleltük a kívánt eltéréseket. Az elméletet megerősítő eredményeket a 6-10. ábra két független kísérletben is szemlélteti.

a.)



b.)



c.)

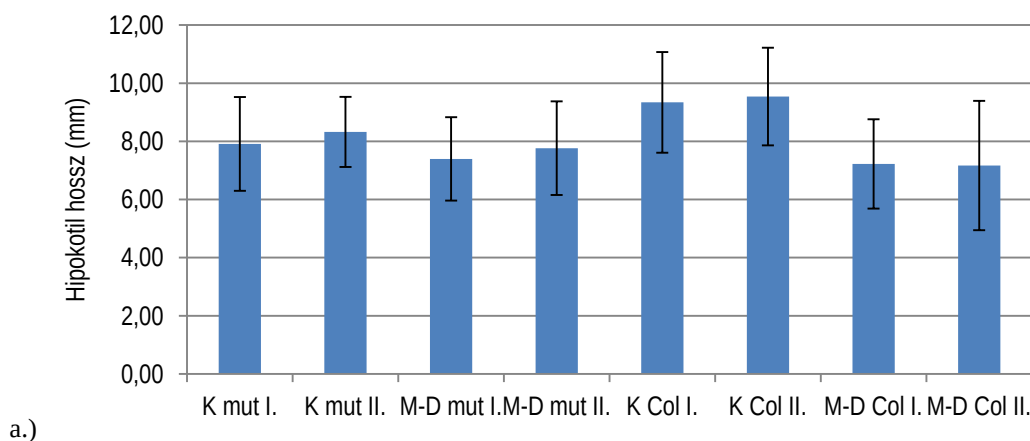
	M-D			
	K mut	mut	K Col	M-D Col
K mut		0,1165	0,0401	0,0004
M-D mut	0,1165		0,0014	0,0582
K Col	0,0401	0,0014		1,489E-06
M-D Col	0,0004	0,0582	1,489E-06	

d.)

	M-D			
	K mut	mut	K Col	M-D Col
K mut		0,2039	0,2100	0,1204
M-D mut	0,2039		0,0119	0,8572
K Col	0,2100	0,0119		0,0039
M-D Col	0,1204	0,8572	0,0039	

6-10. ábra – Függőleges É-D irányú mágneses térben csíráztatott lúdfű hipokotil hosszának változása. Az **a.)** és **b.)** ábrán két, hasonló tengelyelrendezések mellett végzett kísérlet eredménye látható. A hibásávok a szórást jelenítik meg. A **c.)** és **d.)** ábrákon a felettük lévő diagramokhoz tartozó, kétmintás t-próbával számított eltérések láthatók. Pirossal a ***-os (99,9%), narancsszínnel a **-os (99%), citrom színnel pedig az *-os (95%) szignifikanciát jelöltük. A fehérén maradt téglalapok esetében az eltérés nem mondható szignifikánsnak. rövidítések: K-val a fa hengerben nevelt kontroll növényeket, M-D-vel pedig a mágnesben nevelt növényeket jelöltem. A „mut” felirat a mutánsokat, „Col” pedig a vad típusú egyedeket összesíti.

Mivel legfrissebb méréseink során megállapítást nyert, hogy az alkalmazott mágneses hengerek térereje nem teljesen azonos, kísérletesen megvizsgáltuk, hogy ez az átlunk vizsgált változásokra van-e kimutatható hatással. A kapott eredményekből jól látszik, hogy nincs jelentős eltérés a két, azonos orientációjú, de 33 ill. 40-42 mT erősségű mágneses mezőben nevelt növényegyedek növekedésében (**6-11. ábra**). Ezeknél a kísérleteknél is szembetűnő ugyanakkor az előzőekben leírt hatás, miszerint a mágneses hengerben nevelt vad típusú egyedek hipokotilja nem volt képes olyan mértékben nőni, mint a fahengerben nevelt párjaik (a kriptokrómok hatását tovább erősítő, 31,2 %-os gátlás). A kriptokróm-deficiens-mutánsok különböző hengerekben nevelt egyedei között nem tapasztaltunk ilyen mértékű eltérést (7,1% különbség).



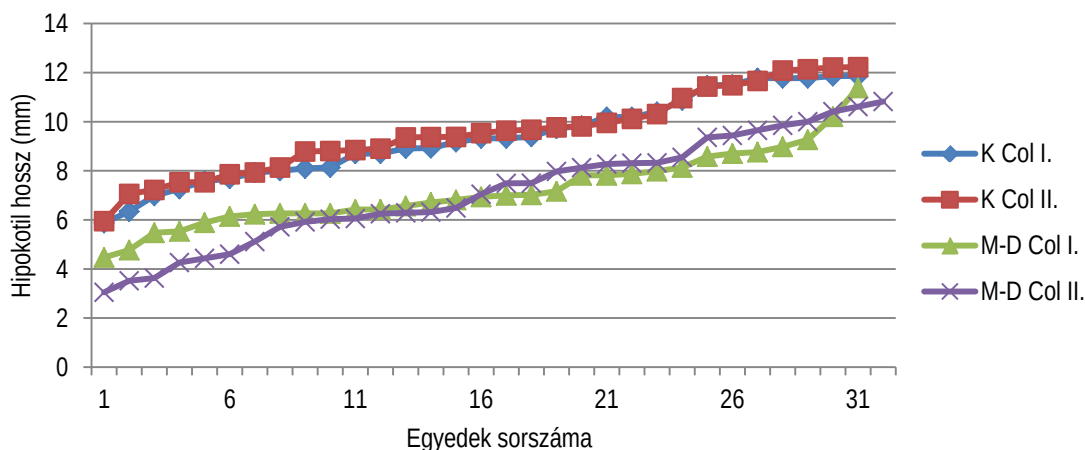
	K mut I.	K mut II.	M-D mut I.	M-D mut II.	K Col I.	K Col II.	M-D Col I.	M-D Col II.
K mut I.		0,2748	0,2058	0,7253	0,0016	0,0003	0,0947	0,1377
K mut II.	0,2748		0,0103	0,1376	0,0099	0,0019	0,0028	0,0135
M-D mut I.	0,2058	0,0103		0,3661	1,61195E-05	2,04946E-06	0,6528	0,6362
M-D mut II.	0,7253	0,1376	0,3661		0,0005	9,88191E-05	0,1876	0,2335
K Col I.	0,0016	0,0099	1,612E-05	0,0005		0,6459	3,77351E-06	5,87552E-05
K Col II.	0,0003	0,0019	2,049E-06	9,8819E-05	0,6459		4,4002E-07	1,22834E-05
M-D Col I.	0,0947	0,0028	0,6528	0,1876	3,77351E-06	4,4002E-07		0,9138
M-D Col II.	0,1377	0,0135	0,6362	0,2335	5,87552E-05	1,22834E-05	0,9138	

6-11. ábra – Elterő erősségű (40-42 vs. 33mT), függőleges É-D irányítottágú hengermágnesek (I., II.) hatása lúdfűvek hipokotiljának megnyúlására. A diagramon látható, hogy a csekély mértékben ugyan, de különböző erősségű mágnesek alkalmazása nem eredményez jelentős eltérést a hipokotil megnyúlásban. A táblázatban a felette lévő **a.)** diagramhoz tartozó, két mintás t-próbával számított eltérések láthatók. Pirossal a ***-os (99,9%), narancsszínnel a **-os (99%), citrom színnel pedig az *-os

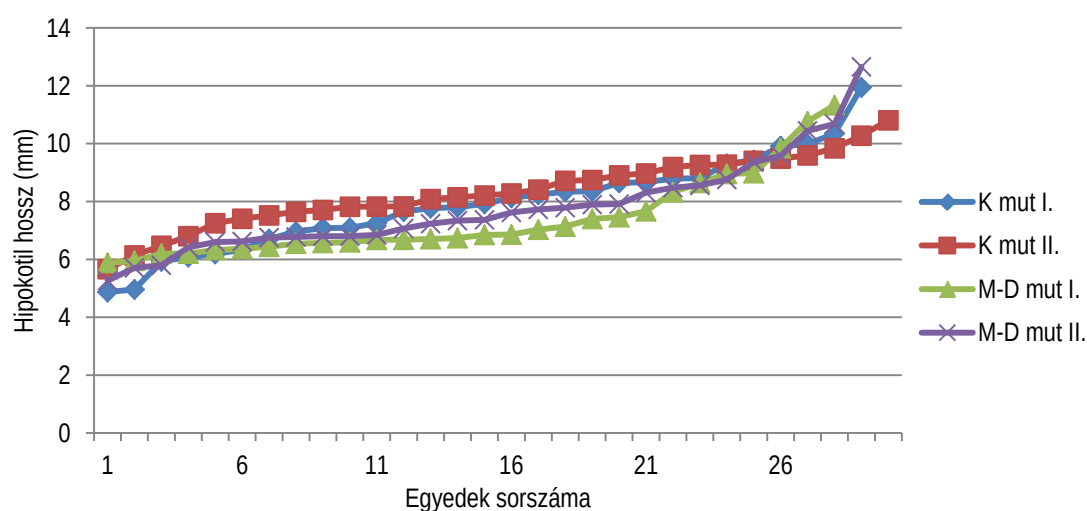
(95%) szignifikanciát jelöltük. A fehéren maradt téglalapok esetében az eltérés nem mondható szignifikánsnak. Jelölések: K-val a fa hengerben nevelt kontroll növényeket, M-D-vel pedig a mágnesben nevelt növényeket jelöltem. A „mut” felirat a mutánsokat, „Col” pedig a vad típusú egyedeket rövidíti.

A két genotípus esetében nem egyformán könnyű elkülöníteni egymástól a mágneses térben nevelt és a kontroll egyedek sokaságát. A különböző mértékű eltérés hatékonyabb bemutatása érdekében az eredményeimet genotípusonként az egyes egyedekre is lebontva további ábrában is szemléltetem (**6-12.ábra**). A 6-12. ábrán jól látható, hogy a hipokotil hossza valamennyi mérési sorozatban és minden mintában nagy eltéréseket mutat, de míg a vad típusú kontroll és kezelt minták aokasága egymástól egyértelműen elkülönül, addig ilyen jellegű elválás a *cry1-304-cry2-1* mutánsnál nem figyelhető meg.

a.)



b.)



6-12. ábra – A függőleges, kissé eltérő nagyságú mágneses térben (I: 40-42 mT; II: 33 mT) nevelt, valamint a kontroll növények hipokotil hosszának méretbeli alakulása – az egyedek szintjére is lebontva. a.) A vad típusú (cv. Columbia), és a b.) mutáns genotípus (*cry-1 cry-2*) esetében. Az egyazon kezeléssel nevelt egyedek az x tengely mentén hipokotil hosszuk nagysága szerint vannak sorba rendezve az így kapott, felfelé tartó görbén.

Eredményeink azt a feltevést erősítik, hogy a hipokotil hosszanti növekedését lúdfüben a mágneses tér gátolja, és mivel ez a gátlás a *cry1-304 cry2-1* mutánsban nem vagy alig figyelhető meg, a gátlást feltehetőleg a kriptokrómok közvetítik. Az általunk alkalmazott térerősségek megfelelő nagyságúak a kriptokrómok aktivitásának serkentésére. Végül mivel a kriptokrómok számos más növényi folyamatot szabályoznak, valószínű, hogy ezen az úton más hatásaik is jelentős mértékben felerősíthetők.

A mágneses mezőben nevelt kettős hiánymutánsok esetén az igen csekély, de tendenciájában következetesen megjelenő növekedésgátlás ellenben arra utalhat, hogy a mágneses tér a hipokotil hosszanti növekedésének komplex élettani folyamatára a két kriptokróm mellett egyéb molekulák ill. folyamatok közvetítésével is befolyással lehet.

Ahhoz, hogy az e kísérletekben kapott eredményeket bizonyító értékűnek tekinthessük, még további számos ismételéseket el kell végeznünk. Az elkövetkező kísérleteknél fokozottan figyelni kell a steril munkavégzés körülményeire és, leginkább a növények növekedésének ütemére és megfelelő időben való mérésére, hiszen a mechanikus ingerek nagyon gyakran képesek felülmúlni a finomabb erőhatások befolyását.

Mindezen fenntartások mellett az elvégzett számos kísérlet és a jelen dolgozatban bemutatott eredmények alapján az a meggyőződésünk, hogy az általunk alkalmazott térerőnél a mágneses mező befolyásolja a növények növekedését, és hatásának közvetítésében az irodalomban leírtakkal (SOLOV'YOV és mtsai, 2007) összhangban növényeknél is fontos szerep jut a kriptokrómoknak. Ebben az értelemben eredményeink Ahmad és munkatársai (2006) eredményeit látszanak igazolni, de nem szolgáltatnak magyarázatot arra, hogy ez a hatás miért nem mutatkozott meg Harris és munkatársai (2009) kísérleteiben.

6.3. Kitekintés

Kísérleteink során sikerült olyan kísérleti elrendezéseket és növényeket találnunk, melyekkel demonstrálható a statikus mágneses tér növényi növekedést befolyásoló hatása. Bár nincs minden esetben megfelelő mennyiségű adatunk ahhoz, hogy biztos kijelentést tehesünk, a különböző megközelítésekkel nyert eredmények összességükben alátámasztják, hogy a mágneses tér a növények életfolyamatait is befolyásolja, és hogy a kriptokrómok a növényekben is jelentős szerepet játszanak a mágneses hatás érzékelésében, vagy legalábbis közvetítésében.

A vonatkozó irodalmi adatok meglehetősen ellentmondásosak: Egyes szerzők egyáltalán nem látják bizonyítottnak a mágneses hatást, míg mások már gyakorlati kiaknázását is célba vették (GALLAND és PAZUR, 2005). Az egymásnak ellentmondó eredmények hátterében – a gyakorta felvetett okok (statikus vs. változó mágneses tér, különböző mágneses térerősség, eltérő faji, szövettáji érzékenység stb.) mellett – szerepelhet például maga az időablak is, amiben vizsgálódnak. Eredményeink egy része ugyanis arra utal, hogy a mágneses tér hatása gyakran csak időszakos. Hosszabb időintervallumú mágneses kezelés során a növény újabban differenciálódó szervei ill. szövettáji idővel toleránssá válhatnak a befolyással szemben.

Emiatt is fontosnak tartjuk a szétterjedést, amelyet kísérleti rendszereink közül leginkább az *Arabidopsis* rendszerben látunk kivitelezhetőnek. Az így nyert, további – pl. szövettani vagy molekuláris vizsgálatokra előkészíthető – növényállomány különösen azért tekinthető értékesnek, mert a lúdfű genom teljes ismerete révén nagy felbontású és kvantitatív génexpressziós vizsgálatokat végezhetünk.

Jövőbeni kísérleteink a makroszkópos változáson túllépve a jelenség okának és jelátviteli útjának kiderítését és a mágneses tér által befolyásolt jelzőgének azonosítását célozzák. Egyfelől célzott génexpressziós vizsgálatokat (RT-qPCR) tervezünk olyan géneken, amelyek fény- ill. akár közvetlenül kriptokrómok által szabályzott volta már bizonyított. Jelöltjeink közt szerepel pl. a virágzás indukcióban közreműködő Flowering locus T (FT), a virágszín kialakításában és egyéb flavonoidok bioszintézisében központi szerepet vállaló kalcion szintáz (CHS), a fotoszintézis klorofill A/B kötő proteinje (CAB) és további, jelenleg leginkább csak jellemző transzkripciós dinamikájuk miatt azonos géncsoportokba rendezett, de funkciójuk tekintetében még részleteiben nem jellemzett fehérjék – pl. az At5G42760 (PESCHKE et al., 2011).

Másrészt, a mágnessel kezelt, vad és kriptokróm hiánymutáns lúdfű minták akár globális génexpressziós profilezés alanyául is szolgálhatnak, ami révén a mágneses tér hatásait közvetítő vagy az érzékelésben szerepet játszó újabb képviselőkre is fény derülhet. A későbbiekben ezen túlmenően hisztológiai analízist, továbbá molekuláris biológiai vizsgálatokat is tervezünk a kriptokrómok által befolyásolt főbb folyamatok (pl. de-etioláció, virágzás) néhány kulcsenzimének kifejeződésére tekintetben, hogy a látható és lemerített különbségek pontos kiváltó okaihoz is közelebb kerüljünk.

Mivel úgy tűnik, eredményeink a kriptokrómok közvetítette fényhatás mágneses befolyásolhatóságát támasztják alá, a további tesztelés során különösen fontosnak tartjuk a megvilágítás paramétereinek változtatását is – mind a megvilágítás intenzitása, spektruma (kék / vörös / fehér / teljes sötétség), és periódusa (ld. rövid / hosszúnappalos körülmények) tekintetében. Bemutatott elrendezéseinkben a klímakamra megvilágítására fehér fénycsövek szolgáltak, amelyek jellemzően a spektrum kék és vörös tartományában emittálnak. Ennek következményeként rendszerünk jelenleg nem alkalmas arra, hogy a kripto- és fitokrómok által közösen szabályzott folyamatok vizsgálatában (pl. virágzás) a kétféle receptortípus hatását szeparálva elemezzük. Technikailag ugyanakkor, a fényviszonyok megfelelő megválasztásával kivitelezhetőnek látjuk az eltérő fotoreceptorok hatásainak elkülönítését.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A mágneses tér élőlényekre gyakorolt hatásáról és a hatás lehetséges molekuláris mechanizmusairól egyre bővülnek ismereteink, de növények esetében még mindig vitatott, hogy a helyhez kötött növényekben kialakult-e az evolúció során a mágneses érzékelés, s ha igen, tettenérhető-e a mágneses hatás makroszkópos élettani és fejlődési folyamatok befolyásolásában. Kísérleteink elsődleges célja egy olyan jól kezelhető, kellő számú precíz ismételésre lehetőséget adó kísérleti rendszer azonosítása volt, amelyben a mágneses tér növekedésre gyakorolt hatása vizsgálható.

Vizsgálatainkhoz olyan növényeket választottunk, amelyek korábbi szakirodalmi adatok alapján mágneses tekintetben érzékenynek tűntek. A robusztus növekedésű lóbab (*Vicia faba*) hajtásnövekedését és lúdfű (*Arabidopsis thaliana*) csíranövények hipokotilnövekedésének befolyásolását kíséreltük meg erős statikus mágneses térben. Ehhez patkó- ill. hengermágneseket használtunk. A homogén erőterű rendszerekben függőleges É-D-i tengelyű, közepes intenzitású (~40 mT) (hengermágnes) és annál tízszer erősebb (~400 mT), vízszintes tengelyű (patkómágnes) erőter hatott a növényekre.

A magasságában állítható patkómágnes használatakor a lóbab növekedésért és fejlődéséért felelős hajtáscsúcsára gyakorolt hatást kívántuk analizálni. A rendszer a növények gyors növekedése miatt nehezen kezelhetőnek bizonyult. Eredményeink szerint a mágneses mező az internódiumok hosszának növekedését idézte elő. Függőleges mágneses mezőt biztosító hengermágnesbe helyezett lóbab növényeinknél azt figyeltük meg, hogy a behelyezés időpontjában épp korai differenciációs stádiumot mutató internódiumok a kontrollokhöz képest jelentős mértékben megnyúltak. Az ezen kitüntetett régió kívül eső idősebb és fiatalabb régiókban azonban nem láttunk szembetűnő különbséget. Különbséget fedeztünk fel a kezelt és kezeletlen növények levélalakjában is: a mágneses térben nevelt növényeké jelentősen megnyúltabb volt, mint fahengerben nevelt társaiké.

Arabidopsis vad típusú egyedeinek fehér fényen történt csírázásakor hengermágnesekben a hipokotil növekedés gátlását figyeltük meg. Mivel a mágneses tér egyes organizmusokban bizonyítottan a kriptokrómokon keresztül fejti ki hatását, olyan mutáns növényeket is alkalmaztunk, amelyekben mindkét kriptokróm működésképtelen (*cry1-304 cry2-1*). E mutánsoknál nem detektáltuk a hipokotilhossz mágneses befolyásoltságát. Eredményeinkből arra következtetünk, hogy az erős statikus mágneses tér gátlólag hat a hipokotilnövekedésre, és a hatás közvetítésében a kriptokrómoknak fontos szerep jut. További kísérleteinkben ezen eredmények megerősítést,

hisztológiai analízist és a kriptokrómok által befolyásolt gének expressziójának közvetlen vizsgálatát tervezzük.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném köszönetemet kifejezni Dr. Lukács Noémi tanszékvezető asszonynak munkám során adott hathatós iránymutatásaiért.

Hálás köszönettel tartozom Dr. Pós Veronikának, konzulensemnek elsősorban határtalan türelméért, rengeteg segítségéért és útmutatásaiért.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Kozma-Bognár Lászlónak, az MTA SZBK, Növénybiológiai Intézet, Növényi Foto- és Kronobiológiai Csoport tudományos főmunkatársának, hogy rendelkezésünkre bocsátotta A kísérleteinkhez elengedhetetlen *Arabidopsis* mutánsokat.

Köszönetemet szeretném kifejezni a tanszék dolgozóinak, akikhez bátran fordulhattam a laboratóriumi munka során felmerült ügyes-bajos problémáimmal.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni a családomnak és barátaimnak, hogy mindenben támogattak és segítették más perspektívából szemlélni a problémákat.

9. IRODALOM JEGYZÉK

- AHMAD, M., CASHMORE, A.R. (1993). *HY4* gene of *A. thaliana* encodes a protein with characteristics of a blue-light photoreceptor. *Nature* 366 (6451):162-166
- AHMAD, M., GALLAND, P., RITZ, T., WILTSCHKO, R., WILTSCHKO, W. (2006). Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 225:615-624
- BAZYLINSKI, A.D., SCHLEZINGER, D.R., HOWES, B.H., FRANKEL, R.B., EPSTEIN, S.S. (2000). Occurrence and diistribution of diverse populations of magnetic protists in a chemically stratified coastal salt pond. *Chem Geol* 169:319-328
- BEGALL, S., ČERVENÝ, J., NEEF, J., VOJTĚCH, O., BURDA, H. (2008). Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. 2008 PNAS vol.15 (no.36):13451-13455
- BLACKMAN C. F. (2009): Alterations in calcium ion activity caused by ELF and RF electromagnetic fields. International Conference on Cell Tower Siting Linking Science & Public Health Salzburg, Austria, June 7 – 8, 2000 Proceedings, pp. 75-80. (http://www.salzburg.gv.at/Proceedings_%2812%29_Blackman.pdf)
- BLAKEMORE R.P. (1982). Magnetotactic bacteria. *Annu Rev Microbiol* 36:217-238
- BURDA, H., BEGALL, S., ČERVENÝ, J., NEEF, J (2009). Extremely low-frequency electromagnetic fields dirrups magnetic alignments in ruminants. *Proc Natl Acad Sci* 106, 5708-5713.
- CASHMORE, A.R., JARILLO, J.A., WU, Y.J., LIU, D. (1999). Cryptochromes: blue light receptors for plants and animals. *Science* 284 (5415):760-765
- FLEISSNER, G., STAHL, B., THALAU, P., FALKENBERG, G., FLEISSNER, G. (2007). A novel concept of Fe-mineral-based magnetoreception: histological and physiochemical data from the upper beak of homing pigeons. *Naturwissenschaften* 94/8:631-642
- GAJDARZISKA-JOSIFOVSKA, M., MCCLEAN, R.G., SCHOFIELD, M.A., SOMMER, C.V., KEAN, W.F. (2001). Discovery of nanocrystalline botanical magnetite. *Eur J Mineral* 13:863-870

GAJDARZISKA-JOSIFOVSKA, M., SCHOFIELD, M.A., ROBERTSON, D., MCCLEAN, R., KEAN, W.F., SOMMER, C. (2002). Botanical iron minerals: electron diffraction and microscopy identification. *Microsc Microanal* 8:752-753

GALLAND, P., PAZUR, A. (2005). Magnetoreception in plants. *J Plant Res* 118:371-389

GIOVANI, B., BYRDIN, M., AHMAD, M., BRETTEL, K. (2003). Light-induced electron transfer in a cryptochrome blue-light photoreceptor. *Nature Struct Biol* 6:489-490

GUO, H., YANG, H., MOCKLER, T.C., LIN, C. (1998). Regulation of flowering time by *Arabidopsis* photoreceptors. *Science* 279:1360-1363

HARKINS, T.T., GRISSOM, C.B. (1994). Magnetic field effects on B12 ethanolamine ammonia lyase: evidence for a radical mechanism. *Science* 263:958-960

HARRIS, S.-R., HENBEST, K. B., MAEDA, K., PANNELL, J. R., TIMMEL, C. R., HORE, P. J., OKAMOTO, H. (2009). Effect of magnetic fields on cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*. *J. R. Soc. Interface* doi: 10.1098/rsif.2008.0519

KEETON, W.T., LARKIN, T.S., WINDSOR, D.M. (1974). Normal fluctuation in the Earth's magnetic field influence pigeon orientation. *J Comp Physiol* 95:95-103

KIRSCHVINK, J.L., HAGADORN, J.W. (2000). A grand unified theory of biomineralization. In: Bäuerlein E. The bio-mineralization of nano- and micro-structure. Wiley, Weinheim, pp 139-150

KIRSCHVINK, J.L., KOBAYASHI-KIRSCHVINK, A., WOODFORD, B.J. (1992). Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA* 89:7683-7687

KORDYUM, E.L., BOGATINA, N.I., KALININA, Y.M., SHEYKINA, N.V. (2005). A weak combined magnetic field changes root gravitropism. *Adv. Space Res.* 36(7):1229-1236

LÁNG F. (szerk) (1994). Növényélettani gyakorlatok. Egyetemi gyakorlati jegyzet. p. 229. Budapest, ELTE Sokszorosító Üzem

- LIBOFF, A.R. (1985). Geomagnetic cyclotron resonance in living cells. *J. Biol. Physics* 13: 99-102.
- LIN, C. (2000). Photoreceptors and regulation of flowering time. *Plant Physiol* 123:39-50
- LIN, C., AHMAD, M., CASHMORE, A.R. (1996). *Arabidopsis* cryptochrome 1 is a soluble protein mediating blue light-dependent regulation of plant growth and development. *Plant J.* 10(5):893-902
- LIN, C., AHMAD, M., CHAN, J., CASHMORE A.R. (1995). *Cry2*, a second member of the *Arabidopsis* cryptochrome gene family. *Plant Physiol.* 110:1047
- LIN, C. TODO, T. (2005). Cryptochromes. *Gene Biology* 6:220-228
- LOWENSTAM, H.A. (1981). Minerals formed by organisms. *Science* 211:1126-1131
- MCCLEAN, R.G., KEAN, W.F. (1993). Contributions of wood ash magnetism to archaeomagnetic properties of fire pits and hearths. *Earth Planet Sci Lett* 119:387-394
- MURASHIGE, T., SKOOG, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant* 15(3): 473-497.
- NODWELL, L.M., PRICE, N.M. (2001). Direct use of inorganic colloidal iron by marine mixotrophic phytoplankton. *Limnol Oceanogr* 46:765-777
- NEVES M., GLIELMO, M., MARTINS, J.L., LINS, U. (2003). Interaction of magnetotactic bacteria with flagellated protozoa: induced magnetotaxis. *Acta Microsc* 12[Suppl B]:11-12
- ODHIAMBO, J.O., NDIRITU, F.G., WAGARA, I.N. (2009). Effects of static electromagnetic fields at 24 hours incubation on the germination of rose coco beans (*Phaseolus vulgaris*). *Romanian J. Biophys* 19(2):135-147
- PÁJER, T. villamosmérnök honlapja (utolsó frissítés: 2004. június 06.) <http://www.free-energy.hu/pajert/index.htm?FoAblak=../pajert48/MPIMagnesesseg.html>

PESCHKE, F., KRETSCH T. (2011). Genome-wide analysis of light-dependent transcript accumulation patterns during early stages of *Arabidopsis* seedling eetiolation. *Plant Physiol* 155, 3: 1353-1366

PERISSE, E., RAYMOND-DELPECH, V., NÉANT, I., MATSUMOTO, Y., LECLERC, C., MOREAU, M., SANDOZ, J.C. (2009). Early calcium increase triggers olfactory long-term memory formation in honeybees. *BMC Biology*, 7:30-

PETHŐ M. (1993). Mezőgazdasági növények élettana. 404-406. Akadémiai Kiadó

SCAIANO, J.C., MONAHAN, S., RENAUD, J. (1997). Dramatic effect of magnetite particles on the dynamics of photogenerated free radicals. *Photochem Photobiol* 65:759–762

SOLOV'YOV, I.A., CHANDLER, D.E., SCHULTEN, K. (2007). Magnetic field effects in *Arabidopsis thaliana* cryptochrome-1. *Biophys J* 92:2711-2726

STAVROULAKIS, P. (Ed.) (2003). Biological effects of electromagnetic fields: mechanisms, modeling, biological effects, therapeutic effects, international standards, exposure criteria, pp. 39, 99, 103. Springer Verlag, 2003

TORRES DE ARAUJO, F.F., PIRES, M.A., FRANKEL, R.B., BICUDO, C.E.M. (1986). Magnetite and magnetotaxis in algae. *Biophys J* 50:375-378

WALKER, M.M, DENNIS, T., KIRSCHVINK, J.L. (2002). The magnetic sense and its use in long-distance navigation by animals. *Curr. Opinion Neurobiol.* 12:735-744

WEAVER J.C., VAUGHAN T.E., MARTIN G. (1999). Biological effects due to weak electric and magnetic fields: the temperature variation threshold. *Biophys J.* 76:3026-3030

WILTSCHKO, W., WILTSCHKO R. (2005): Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *J Comp Physiol A* 191:675-693

YOUNG, M.W., KAY, S.A. (2001). Time Zones: A comparative genetics of circadian clocks. *Nature. Nature Reviews. Genetics.* 2(9):702-715