

## Sugárzás hatása a növényekre

A sugárzó izotópok felhasználása a növények táplálkozás-életteni kérdéseinek tanulmányozására kétségtelen sok új eredményt adott és korántsem kimerített lehetőségeket hord még magában.

E módszerek lényege, mint ismeretes, a jelzett és jelzetlen elem azonos viselkedése és részvétele az anyagcsere folyamatokban.

Az izotóp módszerek alkalmazásának egyik korlátja és hibaforrása az izotópok sugárhatása. A sugárzás az élő szervezetre sokoldalú hatást gyakorol, a hatás nagysága és minősége függ a sugárzástól és az élő szervezettől.

Az anyagcsere-életteni vizsgálatokban nem kívánatos zavarójelenség a sugárhatás, viszont a sugárzás okozta változások más kérdések tanulmányozásában, sőt gyakorlati feladatok megoldásában is, mint pl. a növények bizonyos tulajdonságainak megváltoztatásában jó lehetőségeket nyújtanak.

A sugárzás biológiai hatásával foglalkozó tudomány a sugárzás-biológia. A következőkben a sugárzás-biológiának alapvető ismereteit, valamint a sugárzásnak a magasabbrendű növényekre gyakorolt hatására vonatkozó ismereteket, ezek gyakorlati alkalmazását, néhány fontosabb eredményét és módszerét foglaljuk össze.

1. *A sugárzásbiológia alapjai* [7, 9, 15, 18, 20, 22, 25]

A sugárzásnak a biológiai anyagra kifejtett hatása több tényezőtől függ. Függ a sugárforrás minőségétől. Összefoglalónkban csak rádióaktív izotópok által kibocsátott sugárzások: alfa, béta, gamma sugárzás hatására térünk ki. A sugárzás biológiai hatásossága függ továbbá a sugárzás mennyiségétől, energiájától, és a besugárzott anyag sugár-érzékenységtől. A sugárzás biológiai hatásossága szempontjából fontos körülmény a sugárforrás és a besugárzott test térbeli viszonya. Ebből a nézőpontból a sugárforrások lehetnek külső és belső sugárforrások.

A sugárhatás okozta változás a felsorolt tényezőktől függően különböző mértékű és jellegű lehet. Lehet az elváltozás morfológiai, fiziológiai, citológiai, illetve genetikai változás. Természetesen az egyes sugárhatások ilyen szigorú elhatárolása a gyakorlatban nem lehetséges, a hatások mindig együttesen, de különböző mértékben jelentkeznek.

A sugárhatás alapja az anyagban elnyelt sugárzás által létrehozott ionizáció. Az ionizáció következtében kémiaiilag aktív gyökök keletkeznek, melyek a különböző életfolyamatokat befolyásolják. Figyelembe véve, hogy a biológiai anyag mindig nagymennyiségű vizet tartalmaz, az ionizáció útján keletkezett gyökök közül elsősorban  $H^+$  és  $OH^-$  gyökök jöhetnek számba. Az ionizáció következményeképpen megváltozhatnak az élő szervezetben az oxidációs és redukciós folyamatok, polymerizációs vagy kondenzációs folyamatok indulhatnak meg. Fehérjék és enzimek denaturálódhatnak, illetve inaktíválódhatnak, kolloid rendszerek diszperzitásának megváltozása következik be, mely maga után vonja a sejt finom szerkezetében végbemenő változásokat.

A különböző sugárzások nem egyenlő mértékben ionizálnak. Legerősebben ionizál az alfa-sugár. Az alfa-sugárzás hélium atommagokból áll, azaz kétszeresen ionizált hélium atomokból. Az alfa-részek az anyagon való áthaladás közben az atomok elektronjaival kölcsönhatásba lépnek, azoknak energiát adnak le. Az elektronok a kapott energiával leszakadnak az atomról, vagyis ionizáció létesül. Az alfa részek nagy tömegük és töltésük következtében erősen ionizálnak. Levegőben útjuk 1 cm-en  $10^3$ — $10^5$  ionpárt létesítenek. Az alfa részek nagy mértékű ionizáció miatt rövid úton adják le energiájukat, hatótávolságuk aránylag rövid. A béta sugárzás kétféle: negatív elektron és pozitív pozitron sugárzás. A béta részek a mag bomlása során keletkeznek, és azt különböző energiával hagyják el. Energia spektrumuk folytonos, melyben minden érték előfordul, az illető béta sugárzóra jellemző maximális energia értékig. Az anyagon való áthaladás közben a béta részek is erősen ionizálnak. A specifikus ionizáció a pálya 1 cm-en termelt ionpárok száma az alfa sugárzásnál azonban kisebb. Levegőben 100 ionpár/cm. A béta részek pályája zezgűs, hatótávolságuk függ energiájuktól. Kemény béta sugárzás a levegőben több méterre is eljuthat, vízben vagy test-szövetben pedig több milliméterre. A mesterséges rádióaktív izotópok legnagyobb része béta sugárzó. A gamma sugárzás elektromágneses sugárzás, melynek hullámtermészetén kívül kvantum természetű is észlelhető az anyaggal való kölcsönhatás esetén. A gamma sugárzás sokkal kevésbé ionizál, mint az alfa sugárzás, 1 cm úthosszon átlag 1 ionpárt létesít. Azonban a gamma proton



által kilökött elektron másodlagos ionizációkat hozhat létre. A gamma sugarak áthatoló képessége sokkal nagyobb mint a béta sugaraké, vagy az alfa sugárzásé, nincs maximális hatótávolságuk és részletekben adják le energiájukat az anyagnak.

*A sugárhatás függ a sugárzás mennyiségétől.*  
A sugár mennyiségek jellemzésére fizikai és biológiai dózis egységeket használunk. A legáltalánosabban használt dózis egység röntgen és gamma sugárzás esetében az „r” (röntgen), annak a röntgen vagy gamma sugárzásnak a mennyisége, mely sugárzás útján 1 milliliter normál levegőben 1 elektrosztatikus egységnek megfelelő töltést hoz létre. Az ionizáció arányos a besugárzott anyag sűrűségével; az élő szövet, mely tömegében csak kis atomsúlyú elemek vegyületeiből áll, közelítőleg egységnyi sűrűségű, ebben 1 r sugárzás  $1,6 \cdot 10^{12}$  ionpárt létesít. Átlagosan 1 ionpárra, mely gamma vagy röntgensugár hatására keletkezik, 32,5 eV energia esik. A dózisegységnyi sugárzás által 1 gramm normál levegőben vagy biológiai szövetben 83,8 erg. energia elnyelés történik. Ez az érték természetesen bizonyos mértékben módosul az útsugárzott anyag sűrűsége, az atomok rendszama és a sugárzás energiája szerint is.

A röntgen, illetőleg gamma sugárzásra megállapított egységek bizonyos megszorítással béta sugárzásra és más ionizáló sugárzásokra is alkalmazhatók. Béta vagy más ionizáló sugárzás fizikai egységének azt a sugármennyiséget tekintjük, mely ugyanannyi ionpárt létesít, mint egy r ( $1,6 \cdot 10^{12}$ ), illetőleg hasonlóképpen, mint a röntgen vagy gamma sugárzás 83,8 erg. energiacsökkenéssel jár. Az egység elnevezése Parker után: *Rep. (röntgen-equivalent-physical)*.

A dózisegységek abszorbeált energiát jelölnek, mivel a sugárhatás, vagy besugárzás mindig bizonyos időintervallumban történik, a sugárforrás jellemzésére célszerű volt bevezetni a *dózisteljesítmény fogalmát*, melynek mértéke a röntgenóra, illetve milli-röntgen/óra, ( $r/h$ ,  $mr/h$ ).

Különböző sugárfajtákból eredő azonos fizikai dózisos nem azonos biológiai értékűek. A *biológiai hatásosság* jellemzésére az azonos biológiai hatás létrehozásához szükséges fizikai dózisos hányadosát használjuk. Összehasonlítási alapul a rádium gamma sugárzása által okozott biológiai hatás szolgál. *Az egységet RBE jelzéssel jelöljük.* (Relative biological effectiveness.)

A sugárdózisok meghatározásánál azt is figyelembe kell venni, hogy külső vagy belső sugárforrások sugárzását bizonyos meghatározott felületre, vagy térfogatra számítjuk-e. Továbbá, hogy a besugárzott felülethez, vagy térfogathoz milyen a sugárforrás geometriai viszonya. *Belső sugárforrások* esetén a sugárdózis csak akkor számítható ki egyszerűen, ha a rádióaktív anyag megoszlása homogén a besugározott testben, a megoszlása stabilis (a besugárzás alatt nincs exkreció), továbbá ha

a rádióaktív anyag abszorpciója az egyes sejtekben vagy szövetekben állandó.

Béta sugarak esetében ha az említett feltételek fennállnak, és a besugárzott test lineáris kiterjedése a béta részecskék úthosszához viszonyítva nagy, viszonylag könnyen kiszámítható a béta sugárdózis. Legyen példa az egy testben az izotóp koncentráció  $c$ , mC/kg,  $E$  a sugárzó izotóp közepes energiája MeV-ben,  $T$  a felezési idő, akkor eltekintve a felülethez közeeleső részekről, az abszorbeált energiát röntgen equivalensben kifejezve, teljes bomlás esetén összesen szabaddá váló béta sugárdózis:

$$D\beta = 88 E\beta \cdot T \cdot c$$

A bomlásszabály figyelembevételével a fenti egyenlet eredménye alapján kiszámíthatjuk, hogy meghatározott idő alatt, mely a felezési időhöz viszonyítva nem túlságosan kicsiny, milyen dózist ad le a sugárforrás:

$$d\beta(t) = D\beta (1 - e^{-0.693 \cdot t/T}) \text{ rep.}$$

Míg a béta sugárzás dózisének meghatározása az ismertetettek alapján könnyen kiszámítható és gyakorlatilag konstans érték, a *gammásugárzás dózisének* kiszámítása lényegesen bonyolultabb, még akkor is, ha az előbbieken ismertetett három tényező: a homogén és stabil megoszlás, továbbá konstans abszorpció feltételei biztosítottak. A gamma sugarak nagy áthatoló képességük következtében ugyanis a besugárzott test lineáris dimenziójához viszonyítva hosszú úton abszorbeálódnak, sőt a testből ki is lépnek, maga az abszorpció nagy mértékben függ a besugárzott anyag minőségétől is. Ezért a besugárzott test különböző pontjai különböző sugárdózisokat kapnak. A test belsejében nagyobb a dózis, mint felületi részein.

A gamma sugárdózis kiszámításához  $I\gamma$  konstans vezetett be Martinelli. Az  $I\gamma$  konstans pontszerű 1 mC-s gamma sugárforrás sugárdózisát adja 1 cm levegő távolságon át röntgen/órában. A konstans ismeretében a sugárdózis könnyen kiszámítható: ha a besugárzott szövet  $c$   $\mu\text{C}$  gamma sugárzó izotópot tartalmaz grammként, melynek felezési ideje  $T$ , akkor teljes bomlás esetén a sugárdózis:

$$D\gamma = 1,44 \cdot I\gamma \cdot T \cdot 10^{-3} \cdot c \cdot g = K\gamma \cdot c \cdot g$$

röntgen melyből  $K\gamma = 1,44 \cdot I\gamma \cdot T \cdot 10^{-3}$

$K\gamma$ ,  $r$  egységekben kifejezve 1  $\mu\text{C}$  pontszerű sugárforrás dózisa 1 cm levegő távolságban teljes bomlás esetén. A  $g$  geometriai faktor, mely függ a besugárzott szövet sűrűségétől, a mérés helyétől és a gamma sugarak lineáris abszorpció koefficiensétől, minden egyes mérési pontra külön kell meghatározni. A bomlásszabály figyelembevételével hasonlóan a béta sugárzásához, a felezési idő meghatározott hányadára vagy többszörösére eső sugárdózis kiszámítható.



## 2. A növények sugárkezelésének módszerei [12, 25]

A sugárzás hatásának vizsgálata céljából különböző sugárkezelési módszereket alkalmazhatunk.

Végezhetjük a besugárzást belső vagy külső sugárforrásokkal. Belső sugárforrásokkal kezeljük tulajdonképpen a növényeket azokban az esetekben is, amikor sugárzó izotópokkal táplálkozáséletani vizsgálatokat végzünk. Azonban ilyen esetben a sugárdózist a biológiai hatások alatt választjuk meg, mert mint a bevezetésben említettük, ebben az esetben a sugárhatás a kísérlet hibaforrása.

Belső sugárforrások alkalmazása elsősorban béta sugárzó izotópoknál indokolt, mert biológiai hatások dózist, tekintve, hogy rövid úthosszon abszorbeálódnak az energia, csak így tudunk elérni. A besugárzás módszerének lényege: diffúzió, abszorpció, vagy izotóp kicserélődés útján bejuttatni a sugárzó anyagot a növénybe. A bejuttatás technikája: áztatás izotóp oldatban, magvak esetében izotóppal itatott szűrőpapíron csíráztatás, szövet, vagy szerv-tonyészlet esetében a táptalajhoz izotópot adunk, egész növény esetében pedig gyökéren, vagy levélen át történő abszorbeáltatás. Növényeknél az injektálás nehezen alkalmazható módszer.

Belső sugár kezelés esetében mindig számolni kell egyes sejt, vagy szövetrészek specifikus abszorpciójával, ezért az egész testben homogén eloszlást elérni nehéz. A  $P^{32}$  pl. mindig a foszforban gazdag, fiatal, osztódó sejtekben halmozódik fel, ott is elsősorban a sejtmagban, mivel az osztódó sejtek sugárérzékenysége, továbbá a sejtben belül a sejtmag érzékenysége a legnagyobb, ilyen helyeken fokozott sugárhatás jelentkezik. Ezzel magyarázható pl. izotóp foszfor trágyázási kísérletekben, nagyobb dózis esetén a visszamaradt növényfejlődés.

**Külső sugárforrások** alkalmazása a nagy áthatolóképességű gamma sugárzó izotópok esetében előnyös. Sugárkezelés céljára legalkalmasabban a kobalt  $^{60}$  izotóp használható. A külső sugárforrás egyik előnye, hogy a sugárzás lokalizálható, megfelelő berendezéssel a besugárzott biológiai objektum valamelyik részére. Sugárkezelést adhatunk érzékeny növényi részeknek, tenyészőcsúcsoknak, a megtermékenyítés szerveinek, stb. Másik előnyös tulajdonsága, hogy a sugárzás jól dozírozható, megszakítható, vagy megismételhető. Belső sugárforrások sugárzásának megszakítása, a sugárforrás eltávolítása igen körülményes lenne. Külső sugárforrás további előnye, hogy a sugárzás útján közelebb kívánt dózist meghatározott idő alatt adhatjuk le, ha megfelelően megválasztott aktivitású sugárforrással és kísérleti elrendezéssel dolgozunk.

Kis terjedelmű kísérleti anyagot kisebb sugárdózissal (100 r-es nagyságrend) viszonylag rövid idő alatt, néhány mC-s  $Co^{60}$  sugárforrás-

sal besugározhatunk, ilyen sugárforrás kezelése és tárolása viszonylag egyszerű. Kis terjedelmű anyagok nagy dózissal rövid idő alatt terápiás kobalt ágyúval sugározhatók be. (Száras magvak kezelése mutáció kiváltás céljából.)

Egész növények continuous, vagy időszakos besugárzása különböző dózissal a növény fejlődése folyamán bizonyos szakaszokban vagy az egész tenyészidő alatt eredményesen végezhető az ún. kobalt-radiációs földeken. Ilyen kísérleti elrendezés lényege a következő: Curies nagyságrendű kobalt  $^{60}$  preparátumot helyeznek el megfelelő védőaknában kísérleti területen. A sugárforrás tolerancia távolságból távmanipulátorral a talaj felszínére, vagy meghatározott magasságra kiemelhető, és visszahelyezhető. A kísérleti növényeket a sugárforrás köré ültetik, vagy vetik köralakban. Az egyes növényekre eső sugárdózist a sugárforrás nagysága, a növény távolsága és a besugárzási idő szabja meg. Olyan kísérletek esetében, amikor a sugárdózist többféle növénynek különböző időpontban vagy ugyanannak a növénynek különböző fejlődési szakaszokban akarják adni, a növényeket körszegmentekre osztva ültetik a sugárforrás köré. A sugárforrást pedig megfelelő sugár-blendével látják el, mely a sugárnyaláb útját csak meghatározott körszegmentek irányában teszi szabaddá. Ilyen elrendezések előnye, hogy természetes szabadföldi viszonyok között a legváltozatosabb sugárkezelési lehetőségeket tudnak biztosítani.

## 3. A sugárzás hatása a növényekre

A biológiai hatás okait, körülményeit az eddig előadottakban tárgyaltuk. Megemlítettük, hogy az egyes jellegzetes effektusok nem jelentkeznek elszigetelten, morfológiai, fiziológiai, citológiai és genetikai hatások legtöbbször együttesen jelentkeznek. Nem lehet felállítani olyan dózishatárokat, melyeken belül csak egyik vagy másik hatás érvényesül, növényfajok, fajták és egyedek fejlettségi foka, ezen belül az egyes szervek érzékenysége szerint a hatás igen különböző lehet.

Gyakorlati szempontból a morfológiai és fiziológiai hatás fejlődési rendellenességekben jelentkezik, melynek eredménye, a növekedés stimulálása, vagy gátlása, esetleg az organizmus előlése. A citológiai és genetikai hatás pedig mutációk kiváltásában jelentkezik.

Az ionizáló sugarak stimulációs hatásával foglalkozik Kuzin [12] előadása az 1955-ös genfi kongresszuson. Az előadó a Szovjetunióbeli kutatásokat ismertette. Ezek négy csoportra oszthatók:

1. magvak vetés előtti besugárzása,
2. magvak vetés előtti áztatása természetes és mesterséges rádióaktív anyagokat tartalmazó oldatokban,
3. rádióaktív anyagok, mint mikrotrágyák talajba vitele,



4. különböző mezőgazdasági növények  $Co^{60}$  gamma sugaraival való folyamatos kezelés.

Megállapították nyert, hogy kis sugárdózis (500 r) sokszor kedvezően befolyásolja a csíranövények fejlődését, a fejlődés kezdeti fázisának gyorsulása száraz vidékeken növeli a termést. Ezt tapasztalták retek, káposzta, borsó esetében. Hasonló pozitív eredményt ad a magvak áztatása is. Rádióaktív trágya 0,2—1,5%-kal fokozza a cukorrépa cukortartalmát és 10—18%-kal növeli a termést. A természetes rádióaktív szennyeződésektől megtisztított tápelemek nevelt borsó gyökerein tenyészedényes kísérletekben nem volt gumóképződés. A vetéstől a virágzásig 21,5 r sugárdózist kapott hajdina-növények termése a kontrolhoz viszonyítva 45%-kal emelkedett.

A növények radiostimulációja és lehetőségének elméleti értékelése címmel egy moszkvai izotóp konferencián tartott beszámolóban, Timofeeff—Ressovsky és Lucsnyik [24] 1949-ben különféle fajtájú kultúrnövényekkel végzett kísérletekről számoltak be, melyek azt bizonyították, hogy a béta és gamma sugarak kis dózisa gyorsítják a növekedést és emelik a termést. Hasonló jellegű radiostimulációt figyeltek meg laboratóriumi és szabadföldi körülmények között végzett kísérletekben. Egyenlő mennyiségű kemény béta sugár nagyobb stimulációs effektust mutat, mint a lágy. Alfa részecskék hasonló körülmények között stimulációt nem váltanak ki és a sugársérülés lényegesen hamarabb mutatkozik. A citológiai analízis azt mutatja, hogy a növekedésgátló hatás, mely magasabb dózisok hatására észlelhető, korrelációban van a merisztéma-sejtek kromoszómaszámával, radiostimuláció esetén a sejt nagysága csak kis mértékben változik meg (magnagyobbodik), de e jelenség függ erősen az adott időben osztódó sejtek számától, különös tekintettel a profázisban levőkre.

A citológiai kísérletekben kapott eredmények értékelése után azt az elméletet alakították ki, hogy a kis mennyiségű alfa sugarak és nagyobb mennyiségű béta sugárzás növekedéskorlátozó hatása a sejtek károsulására vezethető vissza, melynek alapja a kromoszómaapparátus erős károsodása. A stimuláció alapja az intenzívebbé váló sejtosztódás. A sejtosztódás intenzitásának oka mindenek előtt az, hogy a magosztódás válik intenzívebbé és a desoxi-ribonucleinsav szintézise emelkedik, ennek következtében természetesen felerősödik a citoplazma osztódása is, illetve a fehérjeszintézis, mely további osztódásokat eredményez. A biofizikai analízisek azt mutatták, úgy a növekedésgátlás, mint pedig a serkentés több-kevesebb mértékben eddig még ismeretlen folyamatok eredménye, mely folyamatok összefüggést mutatnak az ionizáló sugár hullámhosszával és az időfaktorral. A kromoszóma-fragmentáció eredményezi a sejtek károsodását, mely a később jelentkező növekedésgátlás alapját is képezheti,

mivel az ilyen sejt öfenntartásához nagyobb energiát igényel. A mitózis stimulálásához optimális a kis mennyiségű energia, melyet a sejt diffuzeloszlásban kap, az osztódás interfázisáig terjedő szakaszában.

Megállapítható, hogy a stimuláció új sejtek keletkezésének útján valósul meg: és igen kis koncentrációban jelen levő „sugárzást elnyelő” fehérje denaturációs termékeiből származó anyagok eredményezhetik, melyek elsősorban radio-kémiai effektusra reagálnak, olyan láncreakciókat indukálnak, melyek következtében a sejtek proteolitikus aktivitása emelkedik.

Ugyancsak radiostimuláció kérdésével foglalkozik Timofeeff—Ressovsky és Porjadkova: [23] A növények radiostimulációja munkájában. A szerzők több éves kísérletek eredményeiről számolnak be, melyeket kisadagú besugárással végeztek, magasabbrendű növényeken. A kísérleteket háromféleképpen végezték.

1. Száraz, vagy duzzasztott magvak besugárzása a vetés előtt (100—1000 r dózis).

2. Áztatás sugárzó izotópok híg oldatában.

3. A sugárforrás bevitel a talajba.

A kísérleteket részben tenyészházban, részben szabadföldön végezték, egyeseket üzemi körülmények között is. A laboratóriumi kísérletek fő kísérleti objektuma borsó volt, ezenkívül végeztek kísérleteket babbal, lucernával, vöröshérével, búzával, árpával, zabbal, kenderrel és répával. Minden esetben kisadagú röntgen vagy béta sugarak a növekedés fokozódását eredményezték és nagyobb anyagprodukciónak, — keménysugarak, (ceriumból és urán hasadási termékekből) hatékonyabbak voltak, mint a légysugarak (Promethium). Nagyobb dózisok gátolták a növekedést, még nagyobbak pedig letálasítok voltak. Az adatok közül megemlítendő, hogy híg oldatban történt magkezelésnél 1-től 100 mC/liter dózist használtak, rádium alfa sugarainál 0,1 mC/liter már gátló hatást fejtett ki és a letális dózis sokkal alacsonyabb volt, mint béta sugaraknál.

A stimulált növények sejtjei a kontrolhoz viszonyítva kisebbek voltak, viszont szárazanyagtartalmuk volt nagyobb. A gátolt fejlődésű növényeknél nagyobbak voltak a sejtek, és a szárazanyagtartalom kisebb, mint a kontrolban. A sejtosztódás gyakorisága a stimulált növényekben növekedett, a gátolt növényekben citológiai abnormitások léptek fel. A megfigyelések eredményeit a szerzők úgy értelmezik, hogy különböző ionsűrűség esetében, egyrésztől gyors elektronok áthatolása a testen, másrésztől alfa részecskék áthatolása a testen, másrésztől alfa „sugármérgezést” okoz minden esetben, de az energiamegoszlás alfa sugárzás esetében nagyon egyenlőtlen a sejtek között és a kromoszómasérüléseknek a gyakorisága nagyobb, ez makroszkópon ténylegesen is megfigyelhető volt. Végül azt az általános következtetést vonják le, hogy gyenge „sugármérgezések” épp úgy,



mint más gyenge adagu sejtmérgek, a sejttevékenységet stimulálják.

Az Amerikai Atomenergia Bizottság mezőgazdasági kísérleti programjában [25] szintén végeztek kísérleteket izotópok, mint belső sugárforrások stimuláló hatásának vizsgálatában. Mutatn izotóp kísérletekben  $P^{32}$ -t szintén legkiterjedtebben, elsősorban ennek hatását vizsgálták. Kísérleti növény árpa és lucerna volt. Megállapították, hogy a  $P^{32}$  a merisztémikus részekben, továbbá a szár- és gyökércsúcsokban koncentrálódik, ugyanitt jelentkeznek a legnagyobb sugárhatások is. Árpa és lucerna csíranövények fejlődését vizsgálták  $2 \times 10^{-5}$  Mól-os foszfátoldatban, melybe literenként: 0, 2, 4, 8, 16, 32 és 64 mC  $P^{32}$ -t adtak. Meghatározták a csúcsok és gyökerek hosszát, és száraz súlyát. A szártenyészőcsúcsok károsodása emelkedő foszforkoncentrációval sokkal nagyobb volt, mint a gyökereké. Fontos megállapításuk, hogy a sugárhatást nagy mértékben befolyásolja a  $P^{32}/P^{31}$  arány. Növénytáplálási kísérletekben nagyobb inaktív foszfor koncentráció alkalmazása lehetővé teszi nagyobb specifikus aktivitású tápoldat alkalmazását, mert a növény bizonyos mértékben inaktív tápanyag felvételével védekezni tud a rádióaktív tápanyag felvétele ellen.

Mackie, Blume és Hagen [16] 1952-ben szintén  $P^{32}$  tápoldaton nevelt árpa-növények viselkedését vizsgálták. Megállapították, hogy a  $P^{32}$  elsősorban a merisztéma szövetekben halmozódik fel, és a tenyészőcsúcs epidermis sejtjei megvastagodtak.

Kobalt sugárforrás hatását vizsgálta Kedrov — Zihman, Arafonova és Kozsevnjikova [10] kobalt 60-al alkalmazott mikrotrágyázás formájában. A kobalt 60 izotóppal történő besugárzás mind pozitív, mind pedig negatív hatást fejthet ki, attól függően, hogy a növény milyen fajhoz tartozik és milyen az általános tápanyag ellátottsága. A pozitív hatás főleg vegetatív szervek fejlődésében mutatkozik meg, a reproduktív szervek inkább károsulnak. Megállapították, hogy savanyú talajokon a növények sugártűrése csökken. Egyes növények viszont, pl. az árpa és a len, savanyú talajon, mely meszet nem tartalmazott, mutattak pozitív jó hatást kobalt izotóp sugárzására. A takarmányrépa levele mérszszegény talajon intenzívebb  $CO_2$  kiválasztást mutat kis dózisú sugárhatásra. A talajba vitt kobalt fokozza a növények invertáz-aktivitását. Savanyú és meszes talajon nőtt kukorépában a levelek cukortartalma kobalt 60 trágyázás hatására jelentősen emelkedik. Szántóföldi körülmények között végzett rádióaktív stimulációs trágyázásról számol Alexander [1]. Kísérleteiben „al atron” (rádium tartalmú dolomit oldalmény), továbbá rádium és uranyltrát trágyázás stimuláló hatását vizsgálta, kezeletlen parcellával szemben.

Kísérleteit igen sokféle növényvel állította be, kukorica, búza, árpa, zab, vöröshere, szójabab, répa, burgonya, paraj, gypkat, dohány, stb. „alfatronból” az alkalmazott adagok 5, 10 és 20 kg/ha voltak. Rádumból és uranyltrátrából ezzel egyenlő mennyiségű adagot adott. A kísérletben a sugárzó trágyákkal kezelt parcellák 5% nem szignifikáns termésteöbbletet adtak. 1 kg „alfatron” 60 mikrogramm rádiummal volt egyenértékű.

Tartós gamma-sugárzás hatásának tanulmányozására mint a kezelési módszerek között említettük, az ún. „gamma irradációs földek” alkalmas elrendezés il szolgáltnak. Sparrow és Singleton [25] végeztek nagyszámú növénykísérletet 1943-tól kobaltsugár források segítségével. Első elrendezésükben 16 C-s kobaltot használtak, majd 1951-től 200 C-s kobaltot. A sugárforrás 70 méter távolságról táv-irányítható volt. Növényápolási és talajmunkák idején tartóaknájába leeresztették, egyébként a köréje ültetett növényeket egész tenyészidő alatt besugározta. A forrás körül igen változatos radiációs intenzitású kísérleti tér áll rendelkezésre. A 16 C-s sugárforrástól 1 méterre 500 r/nap volt a sugárdózis, 10 méterre, mivel a sugárhatás a távolság négyzetének reciproka arányában csökkent: 5 r, 60 méter távolságban pedig 0,931 r/nap. A vizsgálatok szerint a legtöbb növény a folytatólagos külső sugárzás nagyon magas szintjét tudja elviselni, látható ártalom nélkül. Viszont megfelelő magas dózissal minden növénynél kaptak sugáreffektust. A megfigyelt jelenségek közül bizonyos szövet-hipertrophák, tumorképződések, és szomatikus mutációk voltak a leglényegesebbek. Paradicsom-növények, melyek 20 ezer r-t kaptak, 150 r/órás dózisban csökkent fejlődést és klorofilldefektet mutattak. A sugárforrástól eltávolítva újra normálsan növekedtek. Az *Antirrhinum liliasitru-mol* (fürtös hölgyke) olyan radiációs területen nevelték, ahol a sugárdózis 5 r és 128 r/nap között változott. A fejlődés és növekedés 10 r/nap dózisig normális volt. Magasabb sugár-adagoknál abnormitások álltak elő, míg 128 r/napos dózis letáls volt. A kukorica 125 r/napnál normális növekedést mutatott, egészen 257 r/napig, de ilyen dózis a reprodukciót már gátolta, igen kevés mag képződött minden egyes csövön. 390 r/napos dózissnál a növények teljesen elsatnyultak. Liliomfélék növekedését és a virágzat kifejlődését a 60 r/napos sugárdózissnál magasabb besugárzás, de semmiféle strukturális abnormitást nem okoz. A növekedés és érés 5 r/napos dózissnál normális volt, 22 r/napnál a virágzat kifejlődött; viszont termést nem hozott, 34 r/nap esetében a magvak még kikelték, azonban a növények nem fejlődtek, virágzást pedig egyáltalán nem figyeltek meg. Megállapították, hogy azok a sugárada-gok, amelyek külső morfológiai változásokat okoznak, nagyszámú kromoszóma rendelleneséget is produkálnak. Mivel számos növényen



normális növekedést figyeltek meg, bár ezeket előzőleg különböző sugárkezelésnek tették ki, úgy látszott, hogy a morfológiai rendellenességek legtöbbje nem genetikai természetű. Sugárterben nevelt burgonya rendkívül sugárrezisztensnek bizonyult. Sem stimulációs, sem defektusos abnormitásokat nem mutatott. A genetikusok ezt úgy magyarázzák, hogy a kultúrburgonyák poliploidok és a poliploid növények általában sugárelállóbbak mint a diploidok. Általános megfigyelés volt, hogy a nagy kromoszómájú növények sugárérzékenyebbek, mint a kis kromoszómájúak. Ugyancsak általános érvényű megállapításnak tekinthető ezekből a kísérletekből, hogy a krónikus sugárzás a növényekben kevésbé hatásos, mint az akut.

Biebl [2] 1955-ben az előbb említett gamma sugár térben végzett kísérleteket, szójával, dohánnyal, repcével, melyeken morfológiai, anatómiai és sejtleletani vizsgálatokat végzett. Összehasonlította ugyanezen növények duzzasztott magjainak egyszeri koncentrált besugárzását a tartós besugárzással. Lényegében a szokásos károsító hatásokat kapta, érdekes megfigyelése volt, hogy a tartósan besugárzott növények szövettanilag a succulens növényekhez hasonlítottak. A mezophyll sejtek megnövekedtek, viszont kisebbek voltak az epidermis sejtek és ezzel együtt a légzőnyílások zárósejtjei. Csökkent négyzetmilliméterenként a légzőnyílások száma is. A jelenség nagyban hasonlított anatómiai és szárazságtűréshez. A szerző igen értékes megfigyelést végzett a szövetek sugárérzékenysége és ascorbinsav tartalma között. A légzőnyílások morfológiai megváltozását a sugárzás hatására a serkentő anyag szintézisében beálló változásra vezeti vissza.

Breslavc, Berezina és Ščibrja [4] tartós gammasugárzással végzett kísérleteiben megállapította, hogy napi 1 r dózis rövid kezelési időben teljesen hatástalan, de egész tenyészedő alatt, különösen kukoricánál, hajdínánál és cukorrépánál jelentős stimulálási effektus mutatkozik. (Megnövekedik a zöldanyag, fokozódik a növény növekedése, kukoricán pedig többszöröséget figyeltek meg.) Kukoricánál a kedvező dózis 0,036 és 0,019 r/nap, hajdínánál pedig 2,49 és 0,46 r/nap között változik. Azok a dózisok, melyek hajdínánál a legkedvezőbb stimulációt adják, kukoricánál és cukorrépánál már súlyos fejlődési, növekedési zavarokat okoznak.

Számos munka foglalkozik a stimuláló, illetőleg károsító hatásokról és a növényben lejátszódó biokémiai folyamatok közötti összefüggéssel. Vlassjuk, Klovickaja és Kosmatyj [26] a  $Ca^{45}$  izotóp hatását vizsgálták a cukorrépa termésére, összefüggésben a cukorrépában lejátszódó oxidációs és redukációs folyamatokra. Mérték a katalase, peroxidase és polyphenol-oxidase aktivitását  $Ca^{45}$  adagolása mellett (5–10  $\mu$ C/16 kg talaj) megállapították, hogy a vegetációs szakasz első felében a szövetek

redukációs folyamatai csökkennek, a vegetáció vége felé viszont az oxidációs folyamatok csökkenését figyelték meg. E jelenséggel magyarázzák kis mennyiségű Ca izotóp természetesen növelő hatását. Megállapították, hogy hereféléknél kis mennyiségű  $S^{35}$  melyet a talajba adagolnak, fokoza a növényben az oxidációs folyamatokat.

Fedorova és Szevasztjanova [8] kiindulva abból a megállapításból, hogy a kis dózisú ionizáló sugárzás stimuláló hatást fejt ki a magvak csírázására, a növények fejlődésére és a termés mennyiségére, szabadföldi kísérleteket állítottak be, hogy kis mennyiségű röntgen, illetőleg gamma sugárzásnak kitett magvakból felnevelt kukoricánövény viselkedését megvizsgálják. Megállapították, hogy a magvak besugárzása, a belőlük felnevelt növény levelében bizonyos biológiailag aktív anyagok mennyiségét és egyes fiziológiai folyamatokat megváltoztatja. A kukoricalevélben az ascorbinsavtartalom 30–50%-kal magasabb volt, a kezeletlen kontrollhoz képest, főleg a fejlődés korai szakaszaiban, később a különbségek elmosódtak. Az ascorbinsav felhalmozódás 500–250 r dózis között optimális. A kezelt növényeknél lényegesen korábbi magérés volt megfigyelhető. Nem találtak jellegzetes különbséget a kezelt és kezeletlen növények karotin-tartalmában, viszont  $Co^{60}$  gamma sugárzásával besugárzott magvakból kelt növények klorofillképződése nagyobb volt. A dózisoptimum 500 r körül volt megfigyelhető. 1000 r egységnél a klorofillképződés már gátolt volt, viszont 100 r egység a kontrollhoz viszonyítva még nem mutatott eltérést. Nagyjában hasonló eredményt kaptak a szárazanyagtartalom vizsgálatában is. Vizsgálatakból azt a megállapítást vonják le, hogy magvak kis dózisú besugárzása a biológiailag aktív anyagok koncentrációját növeli a levelekben és meggyorsítja az érési folyamatokat.

Berezina [3] szintén ionizáló sugaraknak száraz magvakra gyakorolt hatását vizsgálta, néhány biokémiai reakció alapján, kukorica csíranövényekben, a csírázás alatt. Száraz magvakat 40 ezer r dózissal tett ki 160 r/perc dózisban. A hystokémiai megfigyeléseket 48 óra múlva végezték. A kontrollnövény endospermiumának keményítő szemcséi káliumjodidos jód oldattal középsárgára festődnek, a besugárzott magvaknál barna vagy viola színt kaptak, mely szín a dextrinre jellemző. A besugárzott magvakban a keményítő gyorsabb hidrolízisét dextrinné, majd cukorrá, a magvak hidrolitikus enzimkészletének nagyobb aktivitásával lehet magyarázni. A besugárzott magvak csírapajzsában lényegesen több lipoidanyag van. A csíráknak az autotroph táplálkozásba való átmeneténél jellegzetes különbség figyelhető meg a besugárzott és a kezeletlen növények között. A kezeletlen növényeknél jellegzetes sárgászöld színnel jelennek meg a kloroplasztidák, míg a kezelt növényekben nem képződik klorofill. 16 ezer r-t kapott növényekben a klorofill-



képződés csak 5—6 leveles stádiumban kezdődik. Ezek a növények még felnevelhetők. Nagyobb dózis esetében a kloroplasztumok erősebb aglutinációja figyelhető meg, mely a besugárzott növények pusztulását okozhatja.

Magasabbrendű állatoknál az ionizáló sugarak károsító hatásának egyik legjellegzetesebb megjelenségi formája a tumorképződés. Hasonló jelenségeket növényeknél is megfigyeltek. Sparrow, Gunckel, Schairer és Hagen [21] arról számolnak be, hogy amphidiploid dohánynövények, melyek emelkedő sugáradagot kaptak, continuous gamma sugárral, 26—385 r/nap dózisban, csökkenő hosszanti növekedést mutatnak és az egyes növények nedves-súlya is kisebb a kezeletlenhez viszonyítva. A besugárzott növényeken rendszerelen oldalhajtásokat és virágzatokat figyeltek meg. 320-as és 385 r/napos dózis a virágképződést megakadályozta. A növények levél-színe, fakó volt. A 34., 44. és 64. napon nagy százalékban tumorok keletkeztek a növényeken, a tumorok száma a napi sugárdózissal együtt emelkedett. A gyökérrészekben is megfigyelhető volt tumorképződés. A tumorképződmények elsősorban a rügyekben léptek fel, de megfigyelhetők voltak az internódusokban is. A szerzők a tumorképződést a növényi hormonanyag-cserében beálló változással, részint pedig citológiai és genetikai okokkal magyarázzák.

Az eddig ismertett sugárhatások: stimulációs hatásúak és károsítások mind a növények egyedfejlődésében mutatkozó jelenségek voltak. A sugárzás azonban nem csupán az ontogenetikus fejlődésben okoz változásokat az élő szervezetben, hanem genetikai változásokat is előidéz és a sugárhatások az utódnemzedékekben is jelentkezhetnek. A sugárzásgenetika alapismereteit és eredményeit nem feladatunk e szemle keretében részletesen ismertetni. Azonban rövid összefoglalásban, néhány érdekesebb eredményt, a sugárzásbiológiai ismeretek teljességéért közlünk.

Már 1910-ben végeztek kísérleteket arra vonatkozóan, hogy sugárral mutációkat váltsanak ki. Az erre vonatkozó első kvantitatív eredményeket Müller 1927-ben publikálta [14] 1947-ben jelent meg Timofeeff—Ressovsky, N. W., és K. G. Zimmer: Das Trefferprinzip in der Biologie c. munkája, mely a sugárzás mutagenetikus hatásának elméleti alapjait tárgyalja. Az azóta eltelt időben elsősorban svéd és amerikai kutatók foglalkoztak a sugárzásgenetika elméleti és gyakorlati irányú kutatásával. Müller [25] megállapította, hogy nagy átlagban 50 r dózis szükséges a természetes mutációk számának megkétszerezéséhez. Catcheside [14] különböző sugárzások okozta letális mutációkra vonatkozóan tett értékes megállapítást, összehasonlítva a béta, gamma és röntgensugarakat, továbbá a neutron és alfa sugárzást, a letális mutációk száma 1000 r-ként 2,89% béta, gamma és röntgensugaraknál, neutronsugaraknál 1,90%,

alfasugaraknál 0,84%. Az amerikai Brookhaven laboratórium növénykutatási programja keretében a kukorica mutációs gyakorlatát állapították meg és a gamma sugárterben végzett vizsgálatokkal igen sok kukorica mutációt állítottak elő. Igen széleskörű kutatásokat végeztek svéd kutatók [13] ionizáló sugarakkal kiváltható mutációk előállítására. E kutatásokban főként az árpa szolgált kísérleti növényül, sikerült néhány olyan mutáns is előállítani, melyek mezőgazdasági szempontokból gyakorlati jelentőséggel bírnak. Jó eredményeket értek el korai édes-csillagfűt mutációk előállításával Ehrenberg, Granhall, Gustafsson [6], ugyanezek a szerzők új árpa, búza és borsófajtáról számolnak be, melyek kedvező eredményt ígérnek.

Számos pozitív eredményről számolnak be különböző rezisztencia nemesítési problémák megoldása terén folyó mutációs genetikai kutatásokról.

Konza [11], gammasugárral olyan zabmutánsokat állított elő, amelyek *Puccinia graminis (avenae)*, 7 különböző biotípusára rezisztensek voltak. Más szerzők búza és ugyancsak zab rozsa és üszög ellenálló mutánsokról számolnak be, melyeket besugárral állítottak elő.

Rezisztens kukoricafaj előállításának lehetőségéről számol be Singleton, Konza, Saphiro és Sparrow [19] a genfi atomkonferencián. A gyümölcs és dísnövény nemesítésben nagy jelentőségűek lehetnek a szomatikus mutációk, melyek continuous besugárral állíthatók elő. Alkalmask a virágszín megváltoztatására, gyümölcsök alakjának megváltoztatására és a beérés gyorsítására. Ehrenberg és Granhall [5] injekcióstúvel juttatott P<sup>32</sup>-t cseresznyerügyekbe és eljárásukkal sikerült hasznos mutációt kiváltani. További lehetőségeket nyújt a sugárkezelés egymással nehezen keresztezhető fajok keresztezésének megkönnyítésére. Reusch [17] *Lolium perenne* és *Festuca pratensis* keresztezéséről számol be, melyet gamma sugárral segített elő.

Összefoglalóan meg kell állapítani, hogy a mutációs kutatások annak ellenére is igen nagy jelentőségűek, hogy többszáz negatív vagy letális mutánsra alg egy-egy pozitív gyakorlatilag használható mutáns esik. Sok kutató dolgozik abban az irányban, hogy megállapítsa egyrészt a sugárfizikai szempontból, másrészt a növénybiológiai szempontból, melyek a feltételei a mutációk kiváltásának, milyen mértékben fordulnak elő pozitív mutánsok, a növények nedvesség- és oxigéntartalmával hogyan lehet a mutációs valószínűséget befolyásolni. További kutatások fogják eldönteni, hogy az ionizáló sugarak felhasználása a növénynemesítésben milyen mértékben lesz hasznosítható.

GÁSPÁR LÁSZLÓ

Érkezett: 1957. szeptember 6.



## Irodalom

- [1] *Alexander, L. T.*: Radioactive Materials as Plant Stimulants-Field Results (Summary). *Agronomy J.* 42. 252-255. 1950.
- [2] *Biebl, R.*: Morphologische, anatomische und zellphysiologische Untersuchungen an Pflanzen vom „Gamma-Feld“ des Brookhaven National Laboratory (USA). Österreich. Bot. Ztschr. 103. 400-435. 1956.
- [3] *Berezina, H. I.*: Nyekatoruje narusenija v obmene vascsesztv prorasztajuscsevo szemeni kukuruzü pod vlijaniem oblcse nyija. Naucsno-tyehnyicseszkaja konferencija po primanju radioaktivnih izotopov. Moszkva. 1957.
- [4] *Breslavac, L. P., Brezina, N. M. & Scibrja, G. I.*: Kisadagü gammasugárzás ionizációs sugárzás hatása a növények oxidációs és redukciós folyamataira. Moszkva. *Biofizika.* 1. 555-563.
- [5] *Ehrenberg, L. & Granhall, I.*: Effect of beta-radiating Isotopes in Fruit Trees. *Hereditas* 38. 385-419. 1952.
- [6] *Ehrenberg, L., Granhall, I. & Gustaffsson, A.*: Genfi Atomkonferencia. 793. Közlemény. 1955.
- [7] *Ejduš, L. Ch.*: A biológiai sugárhatás primer mechanizmusa. Moszkva. *Biofizika.* 1. 544-554. 1956.
- [8] *Fedorova, N. Sz. & Szevasztjanova, L. A.*: Vlijanyije ionizirujuscseh izlucsenij na biologicseszkzi aktivnüle vscsesztva v. lisztjah kukuruzü. Naucsno-tyehnyicseszkaja konferencija po primanju radioaktivnih izotopov. Moszkva. 1957.
- [9] *Hollander, A.*: Radiation Biology, 1. kötet: High energy radiation. McGraw-Hill New York. 1954.
- [10] *Kedrov-Zihman, O. K., Arafonova, A. F. & Kozsevyikova, A. H.*: Vlinyayije gamma-izlucsenija Co<sup>60</sup>-na celszkohozjasztvennüle rasztyenyia. Naucsno-tyehnyicseszkaja konferencija po primanju radioaktivnih izotopov. Moszkva. 1957.
- [11] *Konzak, C. F.*: Stern rust resistance in oats, induced by nuclear radiation. *Agronomy J.* 46. 538-40. 1954.
- [12] *Kuzin, A. M.*: Az ionizáló sugárzás felhasználása a mezőgazdaságban (előadás). Primenenie izotopov v tehnikе, biologii i szel szkom hozjajsztve. Akad. Nauk. SSSR. Moszkva, 1955.
- [13] Különfüzet: Mutation Research in Plant, *Acta Agric. Scand.* 4. (H. 3) 1954.
- [14] *Lamerton, L. F.*: The Biological Effects of Radiation, Genetic Effect of Radiation. *H. Schwiegl: Künstliche Radioaktive Isotope.* 174-176. Springer. Berlin. 1953.
- [15] *Lea, D. E.*: Actions of Radiations on Living Cells. Second ed. University Press. Cambridge. 1956.
- [16] *Mackie, R. W., Blume, J. M. & Hagen, C. E.*: Histological Changes induced in Barley plants by Radiation from P<sup>32</sup>. *Amer. J. Bot.* 39. 229-37. 1952.
- [17] *Reusch, I. D. H.*: Influence of gamma irradiation of the breeding affinities of Lolium perenne and Festuca pratensis. *Nature.* 178. 929-930. 1956.
- [18] *Schwiegl, H.*: Künstliche Radioaktive Isotope in Physiologie Diagnostik und Therapie. Springer Berlin. 1953.
- [19] *Singleton, W. R., Komzak, C. F., Shapiro, S. & Sparrow, A. H.*: Genfi Atomkonferencia. 110. közlemény. 1955.
- [20] *Sommerneyer, K.*: Quantenphysik der Strahlenwirkung in Biologie und Medizin. Akademische Verlagsges. Leipzig. 1952.
- [21] *Sparow, A. H., Gunckel, J. E., Scharier, L. A. & Hagen, G. L.*: Tumor formation and other morphogenetic responses in nan amphidiploid tobacco hybrid exposed to chronic gamma irradiation. *Amer. J. Bot.* 43. 377-88. 1956.
- [22] *Techet, B.-né, & Vödörös, D.*: Radioizotópok gyakorlati felhasználása. Műszaki Könyvkiadó. Budapest. 1957.
- [23] *Timoféeff—Ressovszky, N. V. & Porjadkova, N. A.*: O radiosztimulacii rasztyenij. *Botanicseszkzi Zsurnal* 41. (11) 1620-1623, 1956.
- [24] *Timoféeff—Ressovszky, N. V. & Lucsnjik, V.*: Radiosztimulacija rasztyenij u jijo vozmoznaja teoreticseszkaja interpretacija. (A növények radiostimulációja és lehetőségének elméleti értékelése.) Naucsno-tyehnyicseszkaja konferencija po primanju radioaktivnih izotopov. Moszkva. 1957.
- [25] *Tolbert, N. E. & Pearson, P. B.*: Atomic Energy and the Plant Sciences. *Advances in Agronomy.* Vol. IV. 279-303. Academic Press. New York. 1952.
- [26] *Vlassjuk, P. A., Klímovickaya, Z. M. & Kosmatyj, E. S.*: Kisadagü ionizációs sugárzás hatása a növények oxidációs és redukciós folyamataira. Dokl. Akad. Nauk SSSR. 106. 731-734. 1956.