



Nanorészecskék a szőlészeti kutatásokban

Dr. Körösi László,

Dr. Teszlák Péter, Boudierias Sakina PhD hallgató

PTE Szőlészeti és Borászati Kutatóintézet, Pécs

Nanoszerkezetűnek nevezzük azokat az anyagi rendszereket, melyeknek legalább az egyik dimenziója 1-100 nanométer közé esik. Ebben a mérettartományban (10^{-9} m, azaz a milliméter egymilliomod része) az anyagok különleges fizikai és kémiai sajátságokat mutatnak. Ezeknek az egyedi tulajdonságoknak köszönhetően a nanoanyagok robbanásszerűen kerültek a kutatások élvonalába, és az elmúlt két évtizedben számos területen hasznosították már őket. Mezőgazdasági célú felhasználásuk kutatása szintén intenzíven zajlik, amit jól mutat, hogy a témában megjelent publikációk és szabadalmak száma exponenciálisan növekszik.

A nanoanyagok mezőgazdasági célú hasznosítása

A nanoanyagok kedvező tulajdonságainak kiaknázására jócskán találunk példát az orvostudományban, a biotechnológiában, az elektronikában, az energiaágazatban és a környezetvédelemben egyaránt. A nanoanyagoknak fontos szerepe van a mezőgazdasági technológiák fejlődésében is (Zhao és mtsai., 2020). Az elemzések szerint az agrárszektorban a nanotechnológiával kapcsolatos kutatások száma már több mint egy évtizede folyamatosan emelkedik, megoldást keresve több környezeti és mezőgazdasági kihívásra (Gogos és mtsai., 2012), mint például a fenntarthatóság, az ellenállóbb növényfajták fejlesztése vagy a terméshozam növelése, hogy csak néhányat említsünk. A mezőgazdasági nanotechnológiában nemcsak a tudományos publikációk, de a szabadalmak száma is növekvő tendenciát mutat és napjainkra a modern mezőgazdaságokban már egyre szélesebb körben használják ki a nanotechnológia nyújtotta előnyöket. A nanoanyagok alkalmazásának legfőbb célja közé tartozik a kipermetezett vegyszerek mennyiségének csökkentése, a trágyázás során a tápanyagvesztés minimalizálása, valamint – az optimalizált víz- és tápanyagmenedzsment révén – a terméshozam növelése. A nanotechnológia lehetővé

teszi a mezőgazdasági vegyszerek (műtrágyák, peszticidek, növekedésszabályozók stb.) hatékonyabb célba juttatását. Az agrokemikáliákat hagyományosan permetezéssel vagy kiszórással juttatják ki. Sokszor nagyon alacsony koncentrációban, jóval a minimális hatékonyság alatt jutnak a növény felületére, köszönhetően olyan folyamatoknak, mint a fotolízis és a mikrobiológiai lebomlás vagy a hidrolízis. A hatékony védekezés megkívánja az alkalmazások ismétlését, ami viszont tovább terheli a környezetet. A szabályozott hatóanyag-leadással a nanoanyagok lehetővé teszik a hatóanyag lassú felvételét, elkerülve a túladagolást és csökkentve a felhasznált vegyszerek mennyiségét. A **nanokapszulázott agrokemikáliák** megtervezhetők úgy, hogy minden szükséges kedvező tulajdonsággal rendelkezzenek: hatékony koncentráció (nagy oldhatóság, stabilitás, hatékonyság), stimulálásra bekövetkező idővezérelt felszabadulás, fokozott és célzott aktivitás, alacsonyabb ökotoxicitás, valamint biztonságos és könnyű célba juttatás, mely szükségtelenné teszi az ismételt alkalmazást. Mindezek mellett megfelelő nanotechnológiai módszerekkel a hatóanyag stabilitása is javítható a környezeti degradációval szemben. Biológiailag lebontható anyagokkal **kapszulázva a veszélyes hatóanyagokat**, azok biztonságosabbá és kezelhetőbbé válnak a termelők számára. A terme-

lékenység növelésére a tápanyagok lassú és elhúzódó felszabadulását biztosító **nanokapszulázott műtrágyákat**, a rovarkártévkök elleni védelemben pedig **nanoanyag alapú rovarölő szereket** használnak. A felületmódosított hidrofób szilika nanorészecskéket sikeresen alkalmazták rovarkártévkök ellen. A funkcionális lipofil szilika nanorészecskék kötődnek a rovar kutikuláris lipidjein, károsítva ezáltal a védőviasz réteget, amely kiszáradásos pusztulásához vezet. A porózus szerkezetű szilícium-dioxidot a **validamycin** (peszticid) és a **2,4-diklór-fenoxi-ecetsav** (herbicide) szabályozott leadásának szempontjából vizsgálták. A növényvédő szereket pórusos szilika nanorészecskébe (PHSN) zárva megakadályozható az UV-fény okozta lebomlásuk. A PHSN hordozó nemcsak javítja a növényvédő szer (**avermektin**) fotostabilitását, de nyújtott hatóanyag-leadást is mutatott. Nyújtott hatóanyag-leadású műtrágyákat állítottak elő különböző nanoanyagokkal (agyag-poliészter, humusz-poliészter, műanyag-keményítő) cementálva vagy bevonva a hatóanyagot. Számos nanoméretű hordozó felhasználható a növénytermesztési folyamatokban. A kitozánon (kitozán eredetű poliszacharidok) alapuló nanokapszulákat sokféle anyaggal kombinálták. A kitozán-réz nanohidrogének hatékonyan gátolják a **Fusarium graminearum**

gombák növekedését. Új fungicid készítményként *karbendazimmal* és *azokonazol*al töltött szilárd liposóm és polimer nanokapszulákat állítottak elő. A nagy töltési kapacitású, vízben oldható nanokapszulák a gombák fokozatos felszabadítása miatt kevésbé voltak kedvezőtlen hatással a növények növekedésére, mint a nem-kapszulázott hatóanyagok. Nanoemulziókat használtak *metilpermetrin* szállítására. A metilpermetrin (feromon) tartalmazó nanogélek a gyümölcskártevők szaporodásában bizonyultak eredményesnek. **A különböző hidrogélek a nanocellulózok növelték a talaj vízkapacitását, így lassan felszabaduló vízforrásként hatnak,** csökkentve a termésideőszakban a vízhiányt. Az ezüst nanorészecskék antimikrobiális hatásuk miatt biológiai rendszerekben a leginkább vizsgált és hasznosított nanorészecskék. A tömbfázisú (nem nanokomplex) ezüsthöz képest az *amorf nanorészecskék* nagy fajlagos felületüknek köszönhetően megmutatják *antimikrobiális hatásukat* a talajban. A jól diszpergált ezüst nanorészecskék a talajban kitapadnak a baktériumok és gombák felületén. A nanotechnológia megoldást kínálhat a tápelem hiányosságok speciális kezelésére is. A tápelem hiány jelentős mikrotápanyag hiányt okozhat, pótlására cink-oxid- és réz-oxid-tartalmú műtrágyákat alkalmaznak. **A cink-oxid nanorészecskék műtrágyaként** való alkalmazásának növekedését a cink biológiai hozzáférhetőségét a kalcium-karbonátok csökkenti. A nanoméretű cink-oxid nagyobb reaktivitásának köszönhetően oldékonyabb, így jóval könnyebben elérhető a növények számára. A cink-oxid (ZnO) nanorészecskék mellett antimikrobiális hatással is rendelkeznek. A különböző körülmények között kétféle nanorészecskék (ROS) termelni, melyek a növények patogén mikroorganizmusainak elpusztítására. A cink-nitrát (Zn(NO₃)₂) előállított ZnO nanorészecskékkel sikeresen inaktívtak több kórokozót, mint például *Fusarium* *fumigatus* gombákat. A ZnO mellett kiemelkedő fotokatalitikus tulajdonságának köszön-

hetően a titán-dioxid (TiO₂) szintén nagy érdeklődésre tart számot a növényvédelemben (Körösi és mtsai., 2019). A részecskék felületén már természetes napfény jelenlétében is jelentős mennyiségű ROS keletkezik (Körösi és mtsai., 2018, 2019), amely sikeresen felhasználható a különböző patogének ellen.

Nanorészecskék hatása a növények fejlődésére

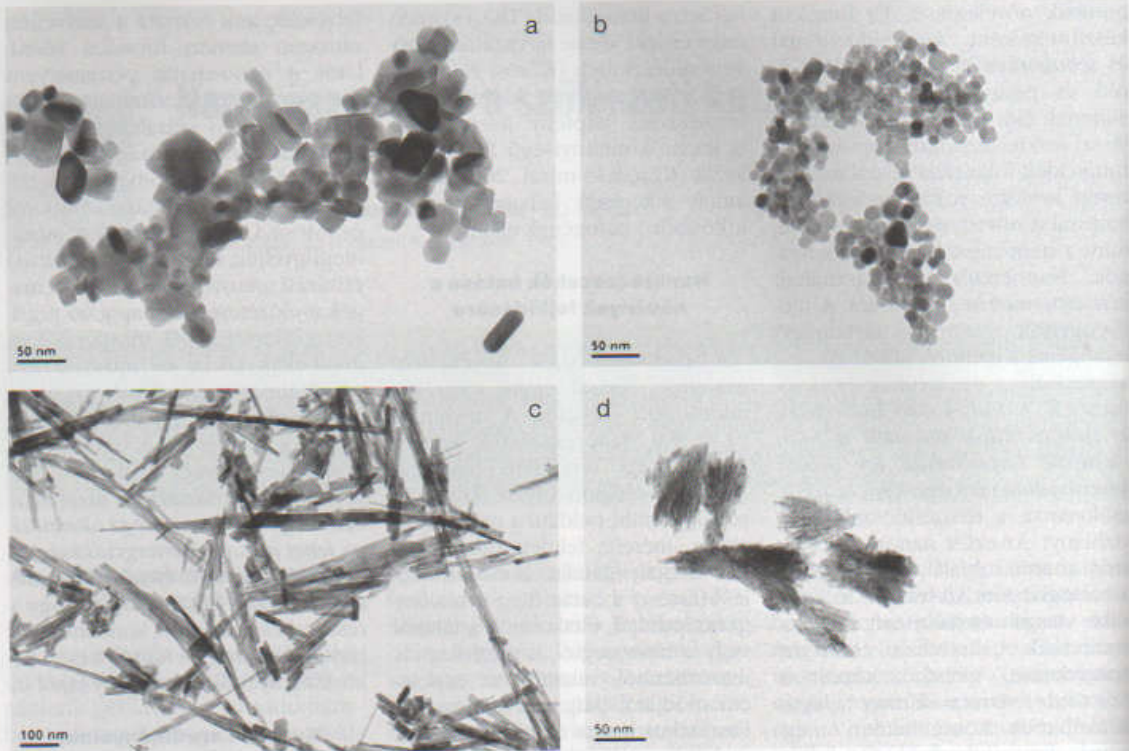
A nanorészecskék növényekre gyakorolt hatását egyre több kutatócsoport vizsgálja. A növények és a fém nanorészecskék közötti kölcsönhatás rendkívül összetett. Az egyik oldalon olyan tényezőtől függ, mint például a nanoanyag alakja, mérete, felületi tulajdonságai, kristálykémiaja, koncentrációja. Másrészt a hatás függ a növény genotípusától, életkorától, a talajtól vagy a tápközegtől, a megvilágítás intenzitásától, valamint az expozíció módjától. Míg sok nanoanyag fitotoxikus hatást mutat, sok másik szabályozza a növekedést, jelentős mértékben megnöveli a biomasszát és még a táplálkozási minőségben is értéknövekedését eredményezhet (pl. a paradicsom likopin tartalmának növekedése). A csírázás az első lépés, amely meghatározza egy növény növekedését. A fém és fém-oxid nanorészecskék növelhetik és csökkenthetik is a haszonnövények csírázási képességét. Sok tanulmány foglalkozik a TiO₂ nanorészecskéknek az élelmiszer-növények (búza, kukorica, repcé, retek, paradicsom, hagyma, édeskömény) csírázására gyakorolt hatásával (Haghighi és Teixeira da Silva, 2014). 100%-os csírázástól számoltak be hagyma és paradicsom magoknál 100 mg/L koncentráció esetén, retekénél 400 mg/L koncentrációnál. Nem volt hatása a TiO₂-nek 10, 50 és 100 ppm koncentrációkban a búza és a repcé magok csírázására. Zheng és mtsai. arról számoltak be, hogy a spenót növekedését elősegítette, ha TiO₂ nanorészecskékkel kezelték a magokat vagy permetezték a leveleket (Zheng és mtsai., 2005). Kimutatták, hogy a TiO₂ nanorészecskék növelték számos enzim aktivitását és elősegítették a nitrát

felvételét, ami fokozta a szerves nitrogén szerves formába alakulását. A nano-anatáz petrezelem magokon történő alkalmazása növelte a csírázás százalékos arányát, a csírázás dinamikáját, a gyökér- és hajtáshosszt, a zöldtömeget és a palánták klorofilltartalmát (Dehkourdi és Mosavi, 2013). Feizi és mtsai. megfigyelték, hogy a zsálya (*Salvia*) csírázási aránya javult, amikor a magokat előzetesen 21 napig 60 mg/L koncentrációjú TiO₂ diszperzióban inkubálták (Feizi és mtsai., 2013). Az alkalmazott kezelések azonban nem gyakoroltak jelentős hatást a hajtás, a gyökér és a csíranövény növekedésére vagy a biomasszára. A kutatási tapasztalatok alapján **a vetőmagok előkezelése jó alternatíva lehet a magok energizálásának növelésére és a növekedés elősegítésére.** A pozitív hatás azonban függ a részecskék méretétől, koncentrációjától, az expozíciós időtől, a csírázás körülményeitől és a növény fajtól is.

Kutatási eredményeink, a felhasznált nanorészecskék áttekintése

A Pécsi Tudományegyetem Szőlészeti és Borászati Kutatóintézetében a nanorészecskék mezőgazdasági hasznosításának kutatása 2017-ben indult. A munka során különböző fotoreaktív TiO₂ nanorészecskéket állítottunk elő és vizsgáljuk, hogy a partikulumok **miként befolyásolják a szőlő fiziológiai és biokémiai reakcióit.** A szőlő válaszreakciójának felderítése céljából mérjük a levelek antioxidáns vegyületeit (HPLC), valamint mikro- és makroelem tartalmának változását (ICP-AES). A munka kisebb, de nem elhanyagolható részét képezi a **nanorészecskékkel kezelt szőlőmagok csírázási képességének vizsgálata.** A továbbiakban ezzel kapcsolatosan mutatunk be néhány részeredményt.

A nanorészecskék – még azonos kémiai minőség esetén is – nagyon változatos szerkezettel és morfológiával rendelkezhetnek. Parányi méretük miatt optikai mikroszkóppal nem tanulmányozhatók, ahhoz, hogy lássuk őket elektronmikroszkóp szükséges. A kísérletekhez előállított nanorészecskékről készült



1. kép Különböző morfológiájú titán-dioxid nanorészecskék transzmissziós elektronmikroszkópos felvételei: (a) polimorf, (b) gömbszerű, (c) szál- és (d) rúdszerű morfológia. A felvételek az Italian Institute of Technology (Genova, Olaszország) intézetében készültek.

transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) felvételeket szemlélte-tünk az 1. képen.

A hidrotermális szintézis gyak-ran változatos alakú (szabálytalan, gömbszerű és poliédres) TiO_2 na-

norészecskéket eredményez (1. a kép). A részecskeszintézis paraméte-reit helyesen megválasztva a morfo-lógiai sajátság kontrollálható. Adalé-kok felhasználásával gömbszerűbb monodiszperz nanorészecskék állíthatók elő (1. b kép). Az 1. c és d képen már szál-, ill. rúdszerű, egy-dimenziós nanorészecskék látha-tóak. Míg ezeknek a „szálaknak” az átmérője mindössze csak néhány nanométer, hosszúságuk a mik-rométert is elérheti. A bemutatott különböző TEM felvétel mindegyi-ke TiO_2 nanorészecskékről készült, mindegyiküket csupán két elem, a titán és az oxigén építi fel, azonban a kristályszerkezetük, morfológiá-juk drasztikusan különbözik. Ez a morfológiai, ill. méretkülönbség meghatározó a részecske és a nö-vény kölcsönhatásában.



2. kép Kezelésre előkészített Cabernet sauvignon magok

Nanorészecskék hatása a szőlőmagok csírázásra

Általánosan elmondható, hogy a *Vitis vinifera* L. fajták magja ne-

hezen csirázó és a fajták genetikai variabilitásából adódóan a szőlőmagok csirázása erősen fajtafüggő. Sok fajta esetében – optimális feltételek mellett is – csak 20-30%-os csirázási rátával számolhatunk. Az alacsony csirázási ráta háttérében főként a szőlőmagokra jellemző erősen elfásodott, kemény maghéj, illetve a magok stabil nyugalmi állapota (hormonális és enzimikus változás) áll. A maghéj kisméretű pórusain keresztül az anyagtranszport korlátozott, azonban a nanorészecskék kis méretüknek köszönhetően átjuthatnak. A maghéjon átjutó nanorészecskék hatást gyakorolhatnak az enzimekre, hormonokra és ezáltal az embrióra, így célkitűzésünknek megfelelően javíthatják a csirázási rátát. A szőlő magról való szaporításának a keresztezéses (klasszikus) nemesítésben van nagy jelentősége. Az új fajták előállítása – a hibridizációt követően – a magok csiráztatásán és a magonc növények nevelésén alapszik. Minden olyan új eljárás, amely javítja a magok csirázási rátáját, hozzájárul a sikeres nemesítéshez és nagyobb magonc populációt biztosít a szelekcióhoz.

A kísérlet során a megtisztított és előkészített Cabernet sauvignon magokat (2. kép) különböző nanorészecskék vizes diszperzióiba helyeztük (3. kép).

A vizsgálatban 18-féle titán-oxid-alapú nanorészecskét alkalmaztunk 1 mg/ml-es koncentrációban. A kontroll magoknál a közeg víz volt. 24 óras kevertetés után a kezelt magokat elültettük, majd növénynevelő kamrákban 28 °C-on, 80 %-os páratartalom mellett csiráztatuk (4. kép).

A magok csirázását 1 hónapon keresztül követtük nyomon, a kapott eredményeket az 1. ábra mutatja. Jól látható, hogy a különböző nananyagok egy kivételével a kontrollhoz képest növelni tudták a magok csirázási rátáját. A kinetikai görbék azt is felfedik, hogy a csirázás a kezelt magok esetén sokkal gyorsabb volt, így jóval több magoncot számolhatunk meg az első két hétben. A magoncokon toxikus tüneteket nem észleltünk (1. ábra).

A csirázásra gyakorolt hatás hátterének felderítéséhez további vizsgál-



3. kép Szőlőmagok kezelése különböző nanorészecskékkel

latok szükségesek. Ennek céljából tervezzük a magok hormon- és enziméreseit, de olyan elemanalitikai vizsgálatokra is szükség lesz, amelyekkel felderíthetjük, hogy a nanorészecskék milyen hatékonysággal jutnak át a maghéjon, és hol halmozódnak fel. Ilyen irányú vizsgálatokat kezdtünk meg a genovai Italian Institute of Technology intézettel

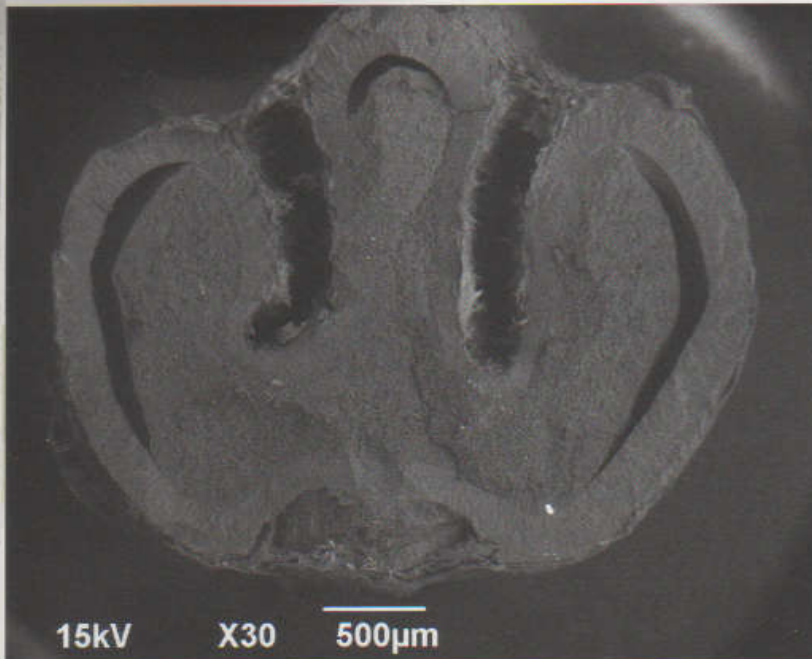
együttműködésben. A nanorészecskék lokalizációjának feltérképezéséhez röntgenanalitikával kiegészített pásztázó elektronmikroszkopos felvételeket készítünk a mag belsejéről. Az 5. kép egy Cabernet sauvignon szőlőmag keresztmetszetét, a maghéjat és a jól elkülönülő szikleveleket mutatja.

Az eddigi szakirodalmi adatok



4. kép Szőlőmagok csiráztatása növénynevelő kamrákban





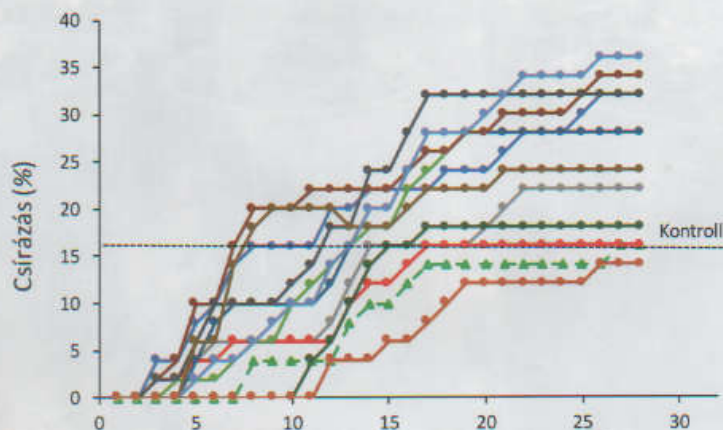
5. kép Pásztázó elektronmikroszkópos felvétel a Cabernet sauvignon magjának keresztmetszetéről. A felvétel az Italian Institute of Technology (Genova, Olaszország) intézetében készült.

alapján elmondható, hogy ezek a parányi partikulumok nagyon változatos sajátságokkal bírnak és hatással lehetnek a növények, ill. a növényeken élősködő mikroorganizmusok élettani folyamataira. Nagyon alapos, mindenre kiterjedő előtanulmányok elvégzése után, a nanorészecskék a közeljövőben fontos szerepet tölthetnek majd be a környezeti kihívásokkal teli agrárszektorban. Figyelembe véve az eddigi

eredményeinket, szőlő esetében a TiO_2 nanorészecskék nemcsak a növényvédelemben ígértesek, de a magok csírázási rátájának növelésére is felhasználhatók.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány az Innovációs és Technológiai Minisztérium UNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának és a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának szakmai támogatásával készült.



1. ábra Kontroll és titán-dioxid nanorészecskékkel kezelt Cabernet sauvignon magok csírázási rátájának kinetikai görbéi

Irodalomjegyzék

- ⇒ Dehkourdi E.H. and Mosavi M., Effect of anatase nanoparticles (TiO_2) on parsley seed germination (*Petroselinum crispum*) in vitro. *Biol. Trace Elem. Res.* 155 (2013) 283-286.
- ⇒ Fetzi et al., Phytotoxicity and stimulatory impacts of nanosized and bulk titanium dioxide on fennel (*Foeniculum vulgare Mill*) *Chemosphere* 91 (2013) 506-511.
- ⇒ Gogos et al., Nanomaterials in plant protection and fertilization: current state, foreseen applications, and research priorities. *Agric. Food Chem.* 60 (2012) 9781-9792.
- ⇒ Haghighi M. and Teixeira da Silva J.A., The effect of N-TiO₂ on tomato, onion, and radish seed germination. *J. Crop Sci. Biotechnol.* 17 (2014) 221-227.
- ⇒ Jo et al., Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi. *Plant Disease* 93 (2009) 1037-1043.
- ⇒ Körösi et al., H_2O_2 -assisted photocatalysis on flower-like rutile TiO_2 nanostructures: Rapid dye degradation and inactivation of bacteria. *Appl. Surf. Sci.* 365 (2016) 171-179.
- ⇒ Körösi et al., Hydrothermal evolution of PF-co-doped TiO_2 nanoparticles and their antibacterial activity against carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae*. *Appl. Catal. B-Environ.* 231 (2018) 115.
- ⇒ Körösi et al., Nanostructured TiO_2 -induced photocatalytic stress enhances the antioxidant capacity and phenolic content in the leaves of *Vitis vinifera* on a genotype-dependent manner. *J. Photochem. Photobio. B.* 190 (2019) 137-145.
- ⇒ Zhao et al., Nano-biotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *J. Agric. Food Chem.* 68 (2020) 1935-1941.
- ⇒ Zheng et al., Effect of nano- TiO_2 on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biol. Trace Elem. Res.* 105 (2005) 83-91.