

Nanotechnológiával előállított anyagok egyes környezeti hatásai

Bakonyi Gábor*

*Szent István Egyetem, Állattani és Állatökológiai Tanszék, Gödöllő, Magyarország

Bakonyi.Gabor@mkk.szie.hu

Összefoglalás: A nanotechnológiával előállított termékek mennyisége és ezek piaca szédületes dinamikával nő. Az ISI Web of Science és a MATARKA adatbázisok segítségével elemezzük a rendelkezésre álló tudományos eredmények mennyiségét. Vizsgáljuk, hogy kellő mennyiségű tudományos eredménnyel rendelkezünk-e ezeknek az anyagoknak a várható környezeti hatásbecsléséhez, és a lehetséges károk előre jelezéséhez? Megállapítjuk, hogy környezetünket a nanoanyagok felhasználása során keletkező nanohulladék egyre nagyobb mértékben terheli. A nanoanyagok hatásainak felmérésére és a káros mellékhatások kivédésére azonban nem vagyunk felkészülve, a tudományos háttér biztosan hiányzik.

Kulcs-szavak: nanotechnológia, környezet, nanoökológia, publikációk elemzése, trendek.

Abstract: Products and market of nanotechnology are dynamically increasing. Two databases, namely ISI Web of Science and MATARKA, are analyzed in order to evaluate the amount of the currently available scientific results. It is continually being examined whether there is enough scientific evidence for a correct/reliable forecast (i) of the potential environmental effects, and (ii) of the possible risks. So far it has been found that the environment is increasingly being loaded by nano-wastes. Environmental effects of nanomaterials are purely known. Scientific background for the side-effect correction is surely lacking.

Keywords: nanotechnology, environment, nanoecotoxicology, analysis of publications, trends.

1 BEVEZETÉS

A nano-méretű (legalább egy dimenziójukban 1-100 nm kiterjedésű) anyagokat az egészségügyben, környezetvédelemben, iparban, mezőgazdaságban, tudományos kutatásban egyre gyakrabban és nagyobb mértékben használják fel. A nanoanyagok jellegzetes tulajdonságát elsősorban a tömeghez viszonyított igen nagy felület határozza meg. Ez a tényező befolyásolja legjobban azokat a tulajdonságaikat (reaktivitás, elektromos tulajdonságok, optikai jellemzők, stb.), amelyek újszerű felhasználásukat lehetővé teszik. Egyben az ökológiai hatásai is jelentősen megváltozhatnak a hagyományos méretű formáikhoz képest. A nano méretű titán-dioxid és alumínium-oxid fonálférgekre gyakorolt toxicitása például kétszer nagyobb, mint a nem-nano méretű formáé [1]. A nanoanyagok és nanotermékek már most jelentősen befolyásolják a modern tudományt, ipart és a gazdaságot is, ez utóbbit egyre nagyobb mértékben. Jelentős hatásai várhatók a környezet és egészségügy területén. Ezek közül sokat pillanatnyilag még megjósolni sem tudunk [2].

Néhány fontosabb, nagyobb mennyiségben gyártott nanoanyag-csoport a következő:

a) Szén nanoanyagok

Az évente előállított szén nanoanyagok mennyisége ezer tonnára tehető. Ezeket főleg használják a mikroelektronikába, a víztisztításban, műanyagok előállításánál, gyógyászatban, ragasztó-anyagok előállítása során, érzékelőkben. Fontos felhasználási területük a számítógép technológiai is.

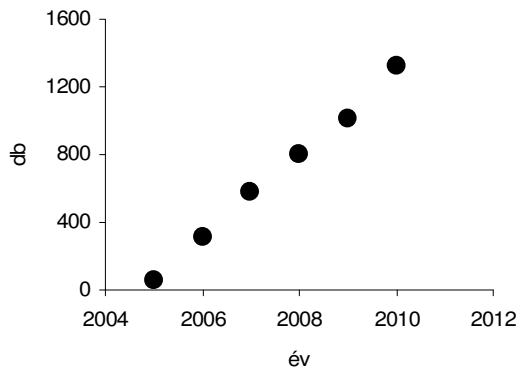
b) Nano fénoxidok:

Igen elterjedten használnak titánium-dioxidot, alumínium és vasoxidokat, cinkoxidokat, különböző katalizátorokként, anyagok mechanikai jellemzőinek javítására, kozmetikumokban és naptejekben és egyéb alkalmazásokban.

c) Kvantum pöttyök (Quantum dots):

Ezek félvezető anyagok, amelyeknek reaktív magja meghatározza az optikai tulajdonságaikat. Kadmium-szelenitet, kadmium-telluridot, cink-szelenidet és egyéb anyagokat tartalmaznak. Számos helyen használják az orvosi képalkotásban, napelemekben, a telekommunikációban és máshol.

A nanotechnológia alkalmazásával előállított termékek (kozmetikumok, festékek, mosószerek, naptejek, adalékanyagok, textíliák stb.) száma folyamatosan nő (1. ábra). Ma már a nagyközönség számára is elérhető termékek száma meghaladja az 1300-at [3]. Ezek nagy része kozmetikum, naptej, ruhanemű, tisztítószerek, szénszálas termékek (pl. hajótestek, teniszütő), festékek, antibakteriális termékek, elektronikai termékek és számítógép alkatrészek, nanotechnológiával előállított élelmiszerek (pl. „super nano-green tee”), játékok stb. Mindezek azt bizonyítják, hogy ezek a termékek mindennapi életünk részévé váltak, hiszen a bemutatott alkalmazási kör mellett még mások is ismertek.



1. ábra Nanotechnológiai úton előállított, kereskedelmi forgalomban kapható termékek számának változása a 2005-2010. közötti években

Ez a helyzet továbbá már ma is hatalmas piacot jelent, ami a közeljövőben jelentősen tovább fog nőni. A becslült forgalmi érték 2010-ben is 15,7 milliárd dollár volt, ami 2015-re várhatóan 26,7 milliárd dollár lesz. Ez évi 11,1 %-os, tehát rendkívül jelentős, dinamikus növekedést jelent [4]. Az RNCOS előrejelzése szerint [5] a nanotermékek piacának évi növekedési rátája a 2011-2013 közötti időszakban 19 % lesz. Nem véletlen tehát, hogy hatalmas vállalatok jöttek létre a technika hasznos oldalainak kiaknázására és hasznosítására.

A környezetbe kerülő nanoanyagok mennyiségével kapcsolatban különböző becslések vannak. Az évente termelt nano titán-dioxid mennyiségét 5000t, nano ezüstöt 500t, a szén nanocsöveket 350t mennyiségre becsülték egy 2008-as tanulmányban [6]. A szén alakú nanoanyagok termelésének nagyságrendje 2001-ben néhány száz tonna volt, 2003-ban már kilencezer tonnára becsülték. Egy másik becslés szerint a nanoanyagok termelésének növekedése a 2004-es ezer tonnáról ötvennyolcezer tonnára fog növekedni a 2011-2020-as periódusban [7]. Bár az előállított nanoanyagok évi mennyisége központi nyilvántartás hiányában, pontosan nem ismert, a becslések jelentősen eltérnek egymástól. Az azonban bizonyos, hogy az előállítási rátájuk dinamikusan nőni fog az elkövetkező években.

A nano anyagok kis mérete következtében könnyen átjuthatnak a sejthártyán. Mivel nagyságuk hasonló néhány sejtalkotóhoz (pl. a riboszomához) kölcsönhatásba léphetnek a fehérjékkel és a nukleinsavakkal. Ezeknek az interakciónak potenciális következménye lehet valamilyen változás az enzimműködésben vagy befolyásolhatják a géntranszkrípciót és transz-szkripciót. Továbbá a szennyező anyagokat gyorsan és hosszú távra szállíthatják a szervezetben belül [8].

Annak ellenére, hogy a nanotechnológiai úton előállított termékek mennyisége dinamikusan

növekszik, a nanoanyagok előállítása és felhasználása során keletkező környezeti hatásokkal kapcsolatban nagyon keveset tudunk. A nano méretű fémek felhasználása például a talajok remediációjában egyre elterjedtebb. Ennek ellenére a környezetben való viselkedésüket, hatásukat kevéssé tanulmányozták [9].

Környezetünkben található természetes nanoanyagok is, de ezeket kevéssé kutatták eddig. A problémát az jelenti, hogy az ember által előállított nanoanyagok jelentős mennyiségben kerülhetnek ki a jövőben a környezetbe és olyan anyagokat is előállíthatunk, amelyek eddig ott nem léteztek. Bizonytalan a környezeti sorsuk, átalakulásaik és hatásaik. Az antropogén források lehetnek ipari eredetűek, véletlen kibocsátások, természetben történő direkt felhasználások, alkalmazások (pl. talaj remediáció).

Ma már általánosan elfogadott a nanohulladék kifejezés és nanohulladék-gazdálkodással is foglalkoznak [7]. A gyakorlat területén a nanohulladék-gazdálkodás foglalkozik a környezetbe kikerülő, nanotechnológiával előállított anyagok tisztításával, feldolgozásával, újrahasznosításával. Ezek az anyagok azonban új kihívásokat jelentenek a hulladékgazdálkodásban. A nanohulladékok sorsa a környezetben nagyon ismeretlen. Pillanatnyilag a hagyományos eljárásokkal kezelik ezeket is. A feldolgozás hatékonyságáról azonban kevés adatunk van. Egy felmérés szerint a nanoanyagok kivonása a hulladékból hagyományos eljárásokkal 0-40%-os hatékonyságú volt [10]. Ez elégtelen tisztítási fok, tehát nagy mennyiségben juthattak be a tisztított vízbe és ezek után akár az ivóvízbe is nanoanyagok.

Ahhoz hogy a kockázatokat megértsük tisztába kell lenni az anyagok mobilitásával, biológiai hozzáférhetőségével, toxicitásával és más anyagokkal való interakcióikkal (life-cycle). A természetben kikerülő nanoanyagok megkötődhetnek, transzformálódhatnak illetve bekerülhetnek különböző biológiai rendszerekbe. Ezekről a folyamatokról, az esetleges toxikus és/vagy ökológiai hatásokról azonban igen keveset tudunk. Mindezekkel a kérdésekkel egy újonnan kialakuló tudományterület a nanoökotoxikológia foglalkozik [11].

A nanoanyagok ökotoxikológiájának áttekintése során kiderül, hogy jóval több az ismeretlen kérdés, mint a megbízható, tudományosan alátámasztott adat. Azt számos tanulmány bizonyítja, hogy a nanoanyagok potenciális kockázatot jelentenek az emberi egészségre és a környezetre [12, 13, 14]. Több információ a fullerénekről, a szén nanocsövekről és néhány fém-oxidról van. Feltűnően hiányoznak azonban az adatok a kvantum pöttyök és a polimerek ökotoxikológiájáról. Nagyon gyakran előfordul továbbá, hogy a közleményekben a fizikokémiai tulajdonságokról nagyon kevés az információ, így nem világos, hogy az eredmények mire vonatkoznak (kis méretbeli

külömbőség például ebben a mérettartományban már nagy hatásbéli különbségeket jelenthet).

Ami a különböző élőlény csoportokat illeti, legtöbb információnk az emlősökkel kapcsolatban van. Sokkal kevesebbet tudunk más csoportokra gyakorolt hatásokról (pl. növények, gerincesek, mikroorganizmusok). Különösen hiányosak ismereteink arra vonatkozóan, hogy a nanoanyagok milyen hatásokat gyakorolnak a tengeri ökoszisztémákra [7]. A szakterület egyik jelentős nehézsége továbbá a nanoanyagok sokfélesége (fizikai, kémiai, biológiai és felhasználási értelemben egyaránt), ami megnehezíti az eredmények extrapolálását.

Az előbb bemutatott adatok alapján bizonyosra vehetjük, hogy a nanotechnológia során felhasznált, ipari úton előállított nano méretű anyagok mennyisége a környezetben jelentősen nőni fog. A termékek egy része (mosó- és tisztítószeresek, motorok adalékanyagai, nano-fémek, fullerének és nanocsövek, talajok remediációjára használt nano-fémek, egészségügyben használt kvantum pöttyök, stb.) bizonyosan számottevő mennyiségben fog kijutni a környezetbe. Joggal feltehető kérdés tehát, hogy kellő mennyiségű tudományos eredménnyel rendelkezünk-e ahhoz, hogy ezeknek az anyagoknak a várható környezeti hatásait megbecsüljük, és előre jelezzük? Erre a kérdésre keressük a választ különböző adatbázisokban található adatok alapján. Összehasonlítjuk továbbá a nemzetközi és a hazai publikációs helyzetet egymással.

2. MÓDSZEREK

Az elemzések két adatbázison alapulnak. Az ISI Web of Science adatbázisban a következő szavak alapján kerestünk: „nanotechnology”, „nanotechnology and environment”, „nanotechnology and ecotoxicology”, „nanoecotoxicology”. Kigyűjtöttük a megjelenés évét (ebből az első megjelenésre vonatkozó adat is rendelkezésre állt) és az adott évben megjelent cikkek számát. A „nanotechnology” és „nanotechnology and environment” szavak esetében megkerestük az első tíz országot a szavak száma szerint, ahol a keresés eredménye alapján kapott közlemények megjelentek. Az adatbázist 1975-től töltöttük fel. A keresés időpontja 2011.06.17. volt.

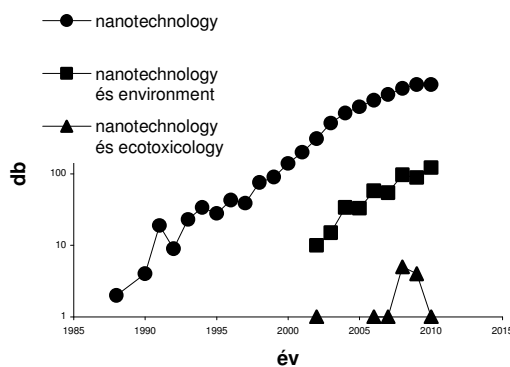
A magyar folyóiratok tartalomjegyzékét a MATARKA adatbázisban néztük át. A következő szótövekre kerestünk: „nano”, „nano és körny”. A „nano” szótövel kezdődő keresés eredményei közül kivettük azokat a közleményeket, amelyek címében a következő szavak szerepeltek: Nanosomia, Nanocyperion communities, nanoplankton. Ezekben a közleményekben természetesen nem volt nanotechnológiával kapcsolatos tartalom. A MATARKA adatbázis 1800-tól kezdődően tartalmaz adatokat. A keresés időpontja 2011.06.11. volt. A 2011-es adatokat kihagytuk az elemzésből, mert

nem egész évre vonatkoznak és így torzítanák az eredményeket.

Más adatbázisokban nem kerestünk mert a Science Direct, ISI Web of Science és Google Scholar adatbázisokban történt keresések eredményei Kahru és Dubourguier [11] adatai alapján végzett elemzés szerint erősen és szignifikánsan korreláltak egymással (legkisebb $r = 0,993$, $p < 0,001$).

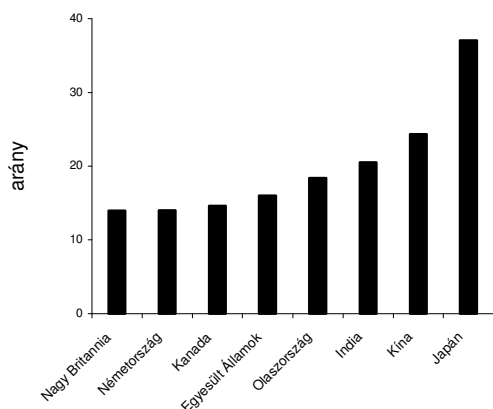
3. EREDMÉNYEK ÉS DISZKUZZIÓJUK

Az ISI Web of Science adatbázisban 1988-ban jelentek meg az első nanotechnológiával kapcsolatos tudományos közlemények. Számuk dinamikusan emelkedik és ma már ezernél is több közlemény jelenik meg a témakörben évente (2. ábra). Az emelkedés üteme különösen 2002-től kezdődően igen jelentős. Az első közlemények, amelyek a nanotechnológia és a környezet kapcsolatát tárgyalták, illetve amelyek ezeknek az anyagoknak az ökotoxikológiájával foglalkoztak, tizennégy évvel később, 2002-ben jelentek meg. 2010-ben a nanotechnológiával foglalkozó közleményeknek mindössze 6,9 %-a volt kapcsolatos a környezettel.



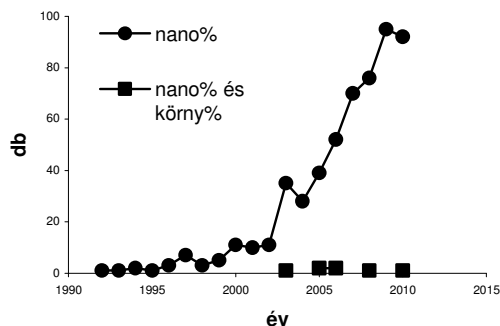
2. ábra. Különböző keresőszavakra talált tudományos közlemények száma az ISI Web of Science adatbázisban

Érdekes eredményre jutunk, ha a cikkeket a megjelenés helye szerint analizáljuk és megvizsgáljuk, hogy egy nanotechnológiával és környezettel is foglalkozó cikkre hány nanotechnológia témájú cikk jut („nanotechnology” / „nanotechnology and environment”)? Minél kisebb a szám, annál magasabb a „nanotechnology and environment” témájú cikkek aránya. Ez az analízis azt mutatja, hogy Nagy Britanniában, Németországban és Kanadában foglalkoznak leginkább a nanotechnológia környezeti hatásaival és Indiában, Kínában a legkevésbé a legtöbb cikket publikáló országok közül (3. ábra). Meglepetés Japán utolsó helye a tízes listán. Lehetséges azonban, hogy ez módszertani torzítás amiatt, hogy a japán kutatók arányaikban többet publikálnak külföldi, mint japán lapokban.



3. ábra Egy nanotechnológiával és környezettel egyaránt foglalkozó cikke jutó, csak nanotechnológiai témájú cikkek száma

A magyar nyelvű, nanotechnológiával foglalkozó közlemények aránylag kis lemaradással követték a világ trendjét, amint a MATARKA adatbázis elemzése mutatja (4. ábra). A nanotechnológiával foglalkozó közlemények száma exponenciálisan növekedik. A nanotechnológiával és környezettel foglalkozó cikkek száma azonban elenyésző, mindössze hét darab a 2003-2010 közötti időszakban. Tendencia nem látható, mindössze azt lehet megállapítani, hogy az első közlemény 2003-ban jelent meg. Ez jó eredmény, ha figyelembe vesszük, hogy a „nanotechnology and environment” címszavakra történő keresés eredménye szerint az első közleményeket nemzetközi szinten is 2002-ben publikálták.



4. ábra Különböző keresőszavakra talált tudományos közlemények száma a MATARKA adatbázisban. A %-jel azt jelzi, hogy csak a szó-tövekre kerestünk

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott elemzések azt bizonyítják, hogy egyre több tudományos eredmény jelenik meg a nanotechnológia témakörével kapcsolatban. Ezeknek nagy része az így előállított anyagok elméleti

problémáival, gyártásával, felhasználási lehetőségeivel stb. foglalkozik. Környezetünket azonban a nanoanyagok felhasználása során keletkező nanohulladék egyre nagyobb mértékben terheli. Hatásuk felmérésére és a káros mellékhatások kivédésére azonban nem vagyunk felkészülve, a tudományos háttér biztosan hiányzik.

5. IRODALOMJEGYZÉK

[1] Wang, H. et al.: Toxicity of nanoparticulate and bulk ZnO, Al₂O₃ and TiO₂ to the nematode *Caenorhabditis elegans*. In: Environmental Pollution. Vol. 157, (2011), p. 1171-1177

[2] Farré, M. et al.: Analysis and assesment of the occurrence, the fate and the behaviour of nanomaterials in the environment. In: Trends in Analytical Chemistry. Vol. 30, no. 3 (2011), p. 517-527

[3] http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/ (2011), (letöltve 2011.06.20.)

[4] <http://bccresearch.wordpress.com/2010/08/09/global-market-for-nanotechnology-products-worth-26-7-billion-by-2015/> (2011), (letöltve 2011.06.20.)

[5] <http://www.rncos.com/Report/IM185.htm>, (letöltve 2011.06.25.)

[6] Müller, N.C., Nowack, B.: Exposure modelind of engineered nanoparticles int he environment.. In: Environmental Science and Technology. Vol. 42, (2011), p. 4447-4453

[7] Musee, N.: Nanowastes and the environment: Potential new waste management paradigm. In: Environment International. Vol. 37, (2011), p. 112-128

[8] Navarro, E. et al.: Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. In: Ecotoxicology. Vol.17, (2008), p.

[9] Wardak, A. et al.: Identification of risk int he life cycle of nanotechnology-based products. In: Journal of Industrial Ecology. Vol. 12, no. 3 (2011), p. 435-448

[10] Westerhoff, P. et al.: Properties of commercial nanoparticles that affect their removal during water treatment. In: Grassian, V.H, (editor): Nanoscience and nanotechnology: Environmental and health impacts. John Wiley and Sons, NY, (2008), p. 71-90

[11] Kahru, A., Dubourguier, H.C.: From ecotoxicology to nanoecotoxicology. In: Toxicology. Vol. 269, no. 2-3 (2010), p. 105-119

[12] Savolainen, K. et al.: Risk assessment of engineered nanomaterials and nanotechnologies—A review. In: Toxicology. Vol. 269, (2010), p. 92-104.

[13] Moore, M.N.: Do nanoparticles present ecotoxicological risks for the health of the aquatic environment? In: Environment International. Vol. 32, (2006), p. 967-976.

[14] Hoyt, V.W., Mason, E.: Nanotechnology: Emerging health issues. In: Journal of Chemical Health and Safety. Vol. 15, no. 2 (2008), p. 10-15.

6 KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A kutatás a TÁMOP-4.2.2.B-10/1 „A tehetséggondozás és kutatóképzés komplex rendszerének fejlesztése a Szent István Egyetemen” c. pályázat támogatásával valósult meg.

7 A SZERZŐ

Bakonyi Gábor Budapesten született 1949-ben. A Gödöllői Agrártudományi Egyetemen szerzett diplomát. Jelenleg egyetemi tanár, az MTA doktora, a biológia tudományterületen. A Szent István Egyetem Állattudományi Alapok Intézetének igazgatója. A zoológia, ökológia, talajbiológia, ökotoxikológia területein végez kutatásokat. Hazai és nemzetközi tudományos folyóiratokban több, mint 80 közleménye jelent meg. A SzIE Biológiai Doktori Iskolájának vezetője Az Ökotoxikológus MSc szak alapítója és szakvezetője. Az “Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae” című folyóirat főszerkesztője. Többek között a Szent-Györgyi Albert és Ipolyi Arnold díjak tulajdonosa.

