

Nanoanyagok humánbiztonsági kockázatot jelentő tulajdonságainak bemutatása és csoportosítása

Classification of Nanomaterial's Risky Properties on the Aspect of Human Safety

Járdán E.¹, Zákányiné M. R.²

¹ Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, afkje@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, zmr@afki.hu

Absztrakt. A nanoanyagok egyedi tulajdonságaik révén egyre szélesebb körű felhasználásnak örvendenek, amelyeknek köszönhetően számos iparág tevékenységében fellelhetők, térhódításuk továbbra is növekvő tendenciát mutat. Az ipari felhasználásuk az utóbbi néhány évtizedben lett számottevő. Hiányos ismeretekkel rendelkezünk az anyagok élő szervezetekre, valamint az emberi egészségre gyakorolt pontos hatásmechanizmusát illetően mind rövid-, mind pedig hosszútávon. A nanoanyagok számos különböző megjelenési formájukból, változatos fizikai és kémiai tulajdonságaikból adódóan különböző módokon juthatnak be az élő szervezetekbe, majd tovább a véráramba, a nyirokrendszerbe elérve az egyes szerveket és ott különböző egészségkárosító hatásokat előidézve súlyos megbetegedéseket okozhatnak. Hazánkban és az Európai Unióban jogi szabályozások tekintetében az érintett tématerület lefedettsége kezdetlegesnek mondható. Az anyagoknak való kitettség kockázatának vizsgálatához szintén nem áll rendelkezésünkre olyan összefoglaló anyag, amely részletesen kitérne az egyes kockázati tényezőkre, vizsgálandó paraméterekre. Munkánk során célunk volt egy olyan szempontrendszer kialakítása, amely figyelembe veszi a nanoanyagok használata, illetve a velük való érintkezés során felmerülő kockázatokat az anyagok egyes tulajdonságai alapján - legyen az fizikai, kémiai vagy biológiai -, amely szempontrendszer a későbbiekben megfelelő kiindulási alapot biztosíthat a munkavédelmi kockázatértékelések elkészítése alkalmával, ezáltal biztonságosabbá téve az ezen anyagokkal való munkavégzést, a munkát végzők és a munkavégzés hatókörében jelenlévők számára egyaránt.

Kulcsszavak: nanoanyag, humánbiztonság, egészségi kockázat

Abstract. Due to their unique properties the application of nanomaterials continuously extends thus these appear for several industries. The industrial application of nanomaterials became significant during the last decades. As a result of the intensive development, our knowledge about the exact influence of nanomaterials for living bodies and human health is characterised by deficiency for both short and long time. Nanomaterials able to be entered to the living organism through several ways then invade to the circulatory system and the lymphatic system, reach the organs and can induce various kind of damages and serious diseases as a result of their different appearance, physical and chemical properties. Legislation in Hungary and in the European Union seems to be incomplete. There is no document which summarizes and details the risky factors and parameters in case of a risk assessment. Our aim was to develop a criterion system considering the risks related to the use and contact of nanomaterials based on their physical, chemical and biological properties, which criterion system

could provide basic principle for a risk assessment thereby make the industrial processes safer both for the employees and those who are in the vicinity.

Keywords: nanomaterial, human safety, health risk

Bevezetés

A nanoanyagok alkalmazásuk során eltérő viselkedést mutathatnak az eddig ismert, veszélyüket tekintve megismert, illetve jogilag szabályozott anyagoktól. A gyors térhódításuk következtében nem volt elegendő időnk arra, hogy alaposabban megismerjük ezen anyagok hatásmechanizmusát. Nem vagy alig ismertek számunkra ezeknek az anyagoknak a rövid és a hosszútávú hatásai. A nanoanyagok kockázatértékelésével foglalkozó szakirodalmak száma a 2000-es évek közepe óta növekvő tendenciát mutat. Fontos kiemelt figyelmet fordítani a nanoanyagok teljes életciklusára, az egyes folyamatok, a bányászat, előállítás, felhasználás, deponálás, hatástalanítás milyen hatással van a környezetünkre, illetve a közvetlenül és közvetve érintettek egészségére, biztonságára rövid- és hosszútávon egyaránt.

A nanoanyagok alkalmazására vonatkozóan a szabályozásokat többnyire hiányosságok jellemzik Magyarországon, azonban 2020. január 1-jétől jogszabály vonatkozik a nanoanyagokat előállító vagy importáló cégekre, az 1907/2006/EK, azaz a REACH-rendelet alapján. Az 1272/2008/EK, vagyis a CLP-rendelet szintén relevánsnak tekinthető [6].

Habár az egyes irányelvek és jogszabályok konkrétan nem térnek ki a nanoanyagokkal történő munkavégzésre, de magukban foglalják a munkáltató és a munkavállaló kötelezettségeit a biztonságos és egészséget nem veszélyeztető munkavégzésre irányulóan. A munkáltató köteles megtenni minden olyan intézkedést, ami a munkavállaló biztonságát és egészségét szolgálja, amely magában foglalja a megfelelő tájékoztatást és oktatást, a munkaszervezést, a különböző foglalkoztatásból eredő kockázatok prevencióját, a szükséges eszközök rendelkezésre bocsátását. Törekedni kell az esetleges kockázatok elkerülésére, amennyiben lehetséges, a kockázati forrásokat eliminálni kell. Abban az esetben, ha fennállnak maradós kockázati lehetőségek, azokról értékelést kell készíteni. Hogyha van rá lehetőség, a veszélyes anyagokat, illetve tényezőket veszélytelenekkel vagy kevésbé veszélyesekkel kell helyettesíteni. A csoportos védelmet előtérbe kell helyezni az egyéni védelemmel szemben. A munkáltatónak tájékoztatási kötelezettsége van a munkavállalók, illetve az őket képviselők felé veszélyes körülmények között történő munkavégzés felmerülése esetén. Szem előtt kell tartani a műszaki fejlődést és ahhoz kell igazodni. A feladatot a munkavállaló képességeinek megfelelően kell meghatározni. Biztosítani kell, hogy súlyos, illetve különleges veszélyt jelentő területre csak az a munkavállaló léphessen be, akit elláttak a megfelelő oktatással, képesítéssel és utasításokkal. A munkáltató köteles gondoskodni a védő és megelőző szolgáltatásokról. A munkavállalónak kötelessége, hogy munkavégzése során úgy járjon el, hogy azzal ne veszélyeztesse se a saját, se mások egészségét és biztonságát [1].

1. A nanoanyagok rövid ismertetése

A nanorészecskék viselkedésüket tekintve, alakjuktól, méretüktől és szerkezetüktől függően különbözhetnek a makroméretű megfelelőiktől. Azon jellemzők, amelyek miatt robbanásszerűen elterjedt a nanoanyagok felhasználása, egyben jelentős kockázatokat is magukban hordozhatnak a

környezetünkre, az élővilág résztvevőire nézve, legyen az humánegészségügyi, állategészségügyi vagy ökológiai kockázat. A kockázatokról való ismereteink jelenleg hiányosak, ennek következtében a munkavédelem területén egy új protokoll kialakítása, amely a nanoanyagokkal történő munkavégzést írja le, számos problémába ütközik. Nincs pontos ismeretünk arról, hogy milyen tulajdonság milyen kockázatot hordoz magában.

Ezen anyagok sokasága egyedi fizikai és kémiai tulajdonságokkal bír, ezért az ipar számos területén jelen vannak, mint például a gyógyszeripar, energiatermelés- és tárolás, távközlés, elektronika, környezetvédelem, orvostudomány, élelmiszerek esetében különböző adalékanyagokként, kozmetikumok, talajjavítók [3].

A nanorészecskéket felépítő atomok és molekulák száma jelentősen befolyásolja azok fizikai-kémiai tulajdonságait, valamint a reakcióképességüket. Fontos szerepet játszik a méret, a szemcseméreteloszlás, a kristályszerkezet, a porozitás, az összetétel, az aggregációs/agglomerációs állapot, a szemcsék alakja, felülete, reakcióképessége, kötési energia, ionizációs potenciál, a zeta potenciál vizsgálattal jellemezhető felületi töltés, az oldódás, illetve oldhatóság, diszpergálhatóság, olvadáspont, különböző optikai tulajdonságok, tehát ezek a paraméterek alapvetően meghatározzák a részecskék viselkedését. Az említett tulajdonságokat méreteffektusoknak nevezzük, amelyek alapján elkülöníthetők a makroméretű anyagokat és a nanoanyagokat érintő változások. Megkülönböztetünk belső és külső méreteffektusokat. A belsők a belső tulajdonságokból adódnak, míg a külsők a külső hatásokra adott visszacsatolások [2, 13].

1.1. A nanoanyagok fizikai tulajdonságai

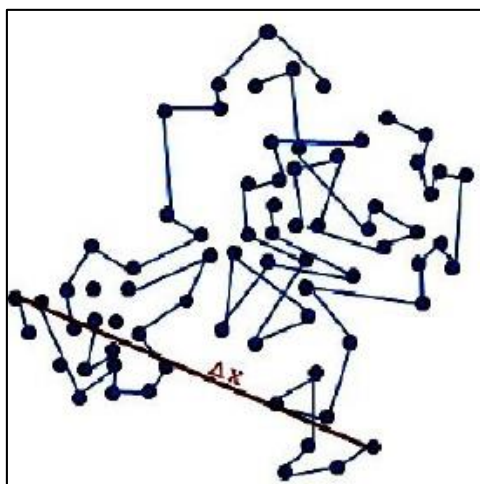
A nanoanyagok közé sorolhatók azok az anyagok, amelyeknek térbeli kiterjedése legalább egy irányban az 1 nm-től a 100 nm-ig terjedő tartományba esik, bár sok esetben ezt a tartományt a részecske átmérőjeként definiálják ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) [3].

Egy adott közegben jelenlévő nanotestek nanorendszert építenek fel, amelyek tulajdonságai akár számottevő mértékben is eltérhetnek a jelen lévő atomok és molekulák, valamint a makrorendszer tulajdonságaitól. Az alábbi 1. táblázat példaként hoz néhány nanorészecskét és a hozzájuk tartozó nanorendszert [2].

Nanorészecskék	Nanorendszer
fullerének	kristályok
fehérjemolekulák	aggregátumok, oldatok
polimer molekulák	szolok, gélek
szervetlen anyagok nanokristályai	aeroszolok, kolloid oldatok
micellák	kolloid oldatok
Langmuir-Blodgett filmek	felületi filmekkel bevont testek
klaszterek gázokban	aeroszolok
nano-blokkok	szilárd anyagok

1. táblázat [2]

A nanorészecskék nagy fajlagos felülettel jellemezhetők, ami a tömegükhöz vagy térfogatukhoz viszonyított felület [m^2/g , m^2/cm^3]. Minél nagyobb ennek az arányszámnak az értéke, az anyag annál inkább reakcióképesebb. A részecskék képesek a felületükön szennyező anyagokat, allergéneket megkötni, amelyek ezáltal az élő szervezetekbe juthatnak, de ugyanezen tulajdonság miatt a gyógyászatban is alkalmazhatók. A nanoanyagok fizikai és kémiai tulajdonságainak alakulásában döntő szerepet játszik a részecskék szemcsemérete és szemcseméret-eloszlása. A gyártási módszertől függően a végtermék számos megjelenési formát ölthet, amely jelentősen befolyásolja annak viselkedését, fizikai és kémiai tulajdonságait. Kísérletekkel alátámasztható, hogy ugyanazon összetételű, de más alakú részecskékből álló anyagok különböző válaszreakciókat váltanak ki élő szervezetek esetében [13]. Alakjukat tekintve a nanoanyagok lehetnek: dendrimerek, grafén, fullerének, nanocsövek, egyfalú és többfalú szénnanocsövek, nanoszálak, nanolapcsokák, nanopálcikák, quantum dot, nanoporok [10]. A nanoanyagok mozgása a Brown-féle mozgással jellemezhető, amely egy időben állandó, kaotikus mozgás, ami azt jelenti, hogy pályájuk ismert törvényszerűségeknél nem feleltethető meg (1. ábra).



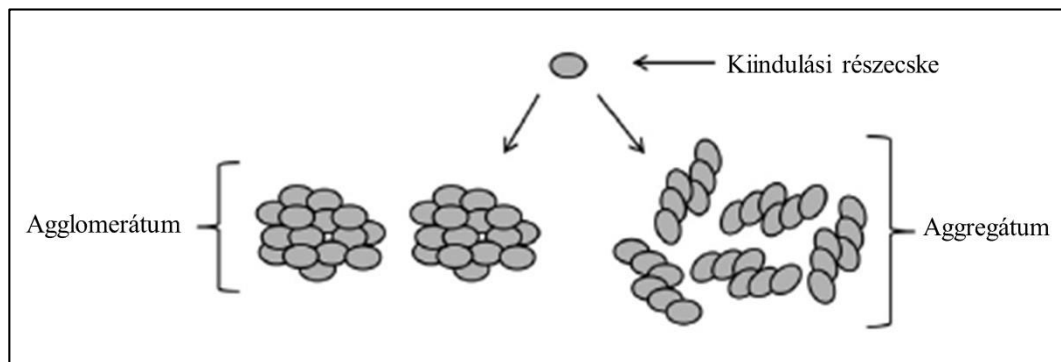
1. ábra Brown-mozgás [2]

Ezen felül az anyag saját tulajdonságából eredő, tengely körüli forgás is megfigyelhető. Tulajdonképpen a Brown-féle mozgás a részecskék translációja, vagyis helyváltoztató hőmozgása. A részecskék mozgékonyasága függ a tömegüktől, a közeg hőmérsékletétől és viszkozitásától. Tehát minél kisebb az adott részecskék tömege, minél nagyobb a hőmérséklet, illetve minél kisebb a közeg viszkozitása, a mozgás annál nagyobb intenzitást mutat. Minél kisebb egy részecske, az elmozdulás annál nagyobb mértékű [2].

1.2. A nanoanyagok kémiai tulajdonságai

A nanoanyagok viselkedését meghatározza a kémiai összetétel, a kristályszerkezet, a járulékos szennyezőanyagok jelenléte. A kristályszerkezettől függően ugyanazon anyag lehet toxikus vagy éppen teljesen ártalmatlan [13].

Az anyag felületi tulajdonságainak fontos szerepe van abban, hogy az mennyire képes kölcsönhatásba lépni más részecskékkel, illetve az ütközések során mennyire képesek összetapadni, egyesülni, azaz aggregátumot vagy agglomerátumot képezni. Az apró részecskék képesek aggregátumot alkotni a kovalens kötésnek vagy a van der Waals-erőknek köszönhetően. Ez az agglomerációs állapot azt jelenti, hogy az összekapcsolódott részecskék külső felülete sokkal kisebb, mint az önálló részecskék felületének összege. Az, hogy az összekapcsolódás mennyire valósulhat meg, jelentős mértékben függ az ütközések valószínűségétől, illetve számától, valamint az ütközések során felszabaduló mechanikai és hőenergiától, továbbá a közeg tulajdonságaitól, mint például a pH, a hőmérséklet és az alkotók. Az aggregátum esetében a részecskéket összetartó erők erősebbek, még az agglomerátum esetében gyengébbek, melyet az 2. ábra szemléltet [13].



2. ábra Agglomerátum és aggregátum [4] nyomán a szerzők saját szerkesztése

A felületi töltés meghatározza, hogy a részecskék milyen mértékben tudnak a felületükön ionokat és molekulákat megkötni. Az aggregáció során a növekvő mérettel csökken a fajlagos felület [13].

A diszpergálhatóság és oldhatóság függvényében változik, hogy a részecskék milyen eloszlást követnek a minket körülvevő környezetben, illetve az élő szervezetekben. A két paraméter függ a nyomástól, hőmérséklettől és a pH-tól. Az anyagok vizsgálata során fontos különbséget tenni a két folyamat között [13].

2. A nanoanyagok egészségi kockázatai

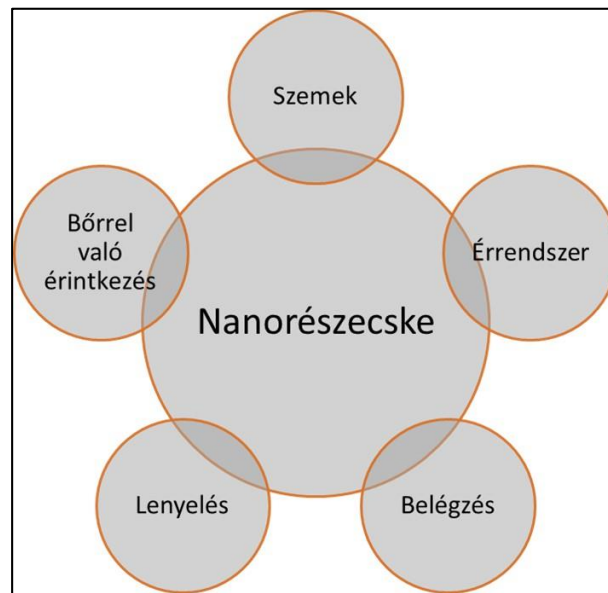
Méretükből adódóan a nanorészecskék a belélegzést követően akadály nélkül továbbjuthatnak a véráramba, ezzel elérve az egyes szerveket. Hogy egy adott részecske mennyire veszélyes, függ annak eredetétől is, így van, amelyik kifejezetten ártalmas, kevésbé ártalmas, de van olyan is, amelynek jótékony hatása lehet a szervezetbe jutva [8]. A szervezetbe bekerült idegen anyagokra az immunrendszer valamilyen formában reagál.

Különböző kutatások azt igazolják, hogy a nanoanyagok toxikus hatása nem pusztán a dózistól függ, hanem a részecskék együttes felületétől, valamint az egységenként számított részecskék össz tömegétől. A részecskék mérete összefügg az aggregációs képességükkel, így az általuk okozott hatásokkal is, azaz minél nagyobb egy részecske, annál inkább képesek az összekapcsolódásra, aminek köszönhetően csökken a fajlagos felületük, ezáltal csekélyebb káros hatást gyakorolnak az élő szervezetekre. A méreten kívül fontos szerepet játszik a részecskék megjelenése, alakja. További paraméter, ami befolyásolja ezen anyagok viselkedését, a kristályszerkezet [11].

Egészségi kockázat szempontjából kiemelendők az oxidok formájában megjelenő fém nanorészecskék, melyek adott esetben nagymértékben különböznek normálméretű megfelelőiktől, mely tulajdonságuk biztosítani tudja a széleskörű felhasználást, ellenben a veszélyt is magában hordozza. Ezek a fém-oxidok a mindennapokban használt termékekben is fellelhetők különböző adalékanyagok formájában, elősegítve a termék minőségének javítását, megőrzését. Problémát jelent, hogy a nanoméretű fém-oxidok tulajdonságainak meghatározásához a makroméretű oxidok vizsgálata sok esetben téves információkkal szolgálhat, így a részecskék hatásmechanizmusát illetően nem lenne helyénvaló csupán abból következtetéseket levonni. Ezek az anyagok olyan hatással lehetnek a környezetünkre, az élő szervezetekre, amelyeket a megfelelő tudás, illetve tapasztalat hiányában egyelőre nem tudunk előre leírni [13].

2.1. A nanoanyagok szervezetbe jutása

Az alábbi ábra (3. ábra) szemlélteti a nanoanyagok szervezetbe jutási módjait. A jelen kutatási anyagban a belélegzést, a bőrrel való érintkezést és a lenyelést vesszük figyelembe, a szemén keresztüli, valamint az intravénás expozíció kevésbé tekinthető relevánsnak a munkavégzés szempontjából.



3. ábra A részecskék szervezetbe jutási módjai [5] nyomán a szerzők saját szerkesztése

2.2. A különböző nanoanyagok élő szervezetekre gyakorolt hatása

A nanoanyagok által az élő szervezetekre kifejtett hatásokat *in vitro* és *in vivo* kísérletek alapján próbálják felmérni. Élő állatokon végzett tesztekhez sok esetben zebradániót, egereket, patkányokat használnak, kedvező tulajdonságaik révén.

A szervezetbe jutást követően a szövetközi térben rekedt részecskék, melyeket a falósejtek nem tudnak eliminálni, hosszabb távon gyulladás kialakulásához vezethetnek, amely további negatív egészségi következményeket okozhat. További lehetséges hatás az oxidatív stressz kialakulása, amely különböző fizikokémiai folyamatok következtében alakul ki, a részecskék nagy fajlagos felülete és a felület reakcióképessége miatt. Részben az oxidatív szabad gyökök túlzott termelődése okán alakulnak ki daganatképződési folyamatok, melyek során DNS károsodás következik be, ami sok esetben végleges marad. Előfordulhat allergiás reakció kialakulása a nanoanyagok légutakba jutását követően, hiszen a jelentős méretű fajlagos felületük miatt különféle anyagokat képesek a felületükön megkötni, így akár allergéneket is. A nanorészecskék felhalmozódása vezethet asztmához. Rendszeres kitettség esetén, ha már jelentkeztek tünetek és kialakult a betegség, a beteg állapotában további romlás következhet be, valamint felléphet tüdőtágulat, idült légúti gyulladás, rendellenes sejtszaporulat. A szervezetbe jutva keringési, szív- és érrendszeri problémák forrásai is lehetnek a nanorészecskék, az oxidatív stressz következtében. A szívben szintén gyulladás alakulhat ki, amely miatt romlik a hám állapota, felbomlik az egyensúly, fokozódik a plakk-képződés, amely egy idő után leválhat az érfalról, mindezen tünetek hozzájárulva a vérrögképződéshez, az oxigénhiányos állapothoz, ezáltal a szívinfarktushoz is, akár végzetes következményeket okozva. A szívizomsejtek falán átjutva szívritmuszavart válthatnak ki. Az orr szaglóhámján keresztül a részecskék direkt módon az agyba, illetve az idegrendszerbe juthatnak, amely ahhoz vezethet, hogy a központi idegrendszer funkcionálisan károsodik. Az alsó végtagokon keresztül a nyirokrendszerbe jutott részecskék a nyirokereket eltömítik, amely következtében „elefántláb” szindróma kialakulásához vezethetnek [11]. A kísérletek eredményeiből kimutatható, hogy a szervezetben a nanorészecskék felhalmozódása okozhatja az embrió, a magzat károsodását, pusztulását,

kiválthat fejlődési rendellenességet. A sejtszintű károsodás, illetve a sejtek pusztulása szintén lehetséges következmény [9].

3. Nanoanyagokkal történő munkavégzés vizsgálata



















A nanoanyagokat felhasználó iparágak (4. ábra) közül a legjelentősebbek a vegyipar, az egészségügy, az autógyártás, az elektronikai és telekommunikációs ipar, textilipar, a hatékony energiátárolást célzó iparágak. A nano-területen a kereslet folyamatosan bővül [10].






4. ábra Nanoanyagok alkalmazási lehetőségei, szerzők saját szerkesztése

A munkaterület biztonságossá tételéhez lehetőség van légtérelvezetésre, amely során ki kell tudni szűrni, melyek azok az anyagok, amelyek az üzemi területen kívülről származnak, illetve nem a gyártási folyamat következtében szabadulnak fel. Annak a lehetősége, hogy a nanoanyagok mesterséges körülmények között történő előállításánál a munkavállaló belégzés útján érintkezik az anyaggal, viszonylag alacsony, hiszen az ilyen folyamatok zárt rendszerben zajlanak. Kivételt képez, ha valamilyen üzemzavar során például szivárgás lép fel. Az anyaggal való kontaktus nagyobb valószínűséggel fordul elő a kamra kinyitását követően a szárítás, illetve további kezelés vagy a kamra tisztítása közben [10]. A különböző karbantartási folyamatok az egyik lehetséges módjai annak, hogy a részecskék a munkavégzés során, főként belégzés útján, az emberi szervezetbe jussanak. Ilyen munkafázisok lehetnek többek között olyan feladat elvégzése, amely maga okozza az anyagok felszabadulását, úgy, mint a csiszolás, őrlés vagy olyan szerek használata, amelyek tartalmaznak valamilyen nanoanyagot, illetve azoknak a berendezéseknek a karbantartása, javítása, amelyek valamilyen módon érintkezésben vannak nanoanyagokkal. Porok felhasználása vagy porgyűjtő rendszerek takarítása közben lebegő részecskék kerülhetnek a munkakörnyezetbe, így belégzéssel, lenyeléssel a szervezetbe juthatnak vagy bőrön keresztüli kontaktus merülhet fel. Folyékony anyagok, például kenőanyagok, festékek, felületkezelők esetében szintén felléphetnek az imént említett szervezetbe jutási formák. A munkafolyamat lehet előkészítés, magának az anyagnak a használata vagy a kiömlött termék takarítása. Az előkészítési művelet közben, amennyiben az öntéssel, keveréssel, rázással jár, képződhetnek aeroszolok vagy felhasználás közben permet. Különböző felületmegmunkálási feladatok elvégzése következtében sérülhet a mátrix szerkezete, ezzel a

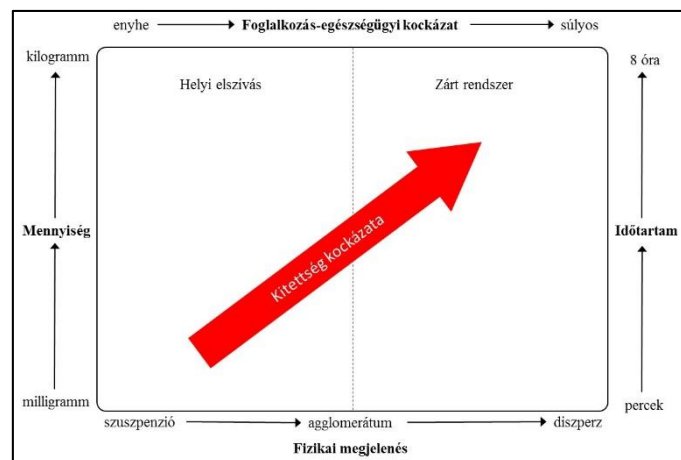
részecskék a levegőbe kerülhetnek, majd tovább a bőrön, a légutakon keresztül vagy lenyelés által a szervezetbe. Porok és aeroszolok jelenléte mellett felmerül a tűznek és a robbanásnak a veszélye is, melyre fokozott figyelmet kell fordítani [7]. Ha a munkavégzés helyén egyidejűleg, egy légtérben fennáll a lehetősége két különböző vagy azonos halmazállapotú anyag találkozásának, keveredésének, az 5. ábra szerinti diszperz rendszerek képződhetnek.

Diszpergált fázis	Diszperziós közeg	Rendszer típusa	Példa
	+	 =	Emulziók Nyersolaj, tej, kenőanyagok
	+	 =	Porózus testek, kapilláris rendszerek, gélek Talajok, ásványok, adszorbensek
	+	 =	Aeroszolok (kód) Kódok, felhők
	+	 =	Szilárd kolloid oldatok Ötvözetek, ásványok
	+	 =	Szuszpenziók, szolok Baktériumok, víz zavarossága
	+	 =	Aeroszolok (por, füst) Kozmikus por, füst
	+	 =	Sűrűségfluktuációkat tartalmazó rendszerek Atmoszféra
	+	 =	Gázemulziók, habok Szappanhab
	+	 =	Porózus és kapilláris rendszerek Aktív szén, szilikagél

 - Gáz,  - Folyadék,  - Szilárd

5. ábra Diszperz rendszerek típusai [2] nyomán a szerzők saját szerkesztése

Az, hogy a munkavállalók, illetve a munkavégzés helyén tartózkodók, milyen mértékben vannak kitéve az adott anyaggal vagy anyagokkal való bármilyen formájú érintkezésnek, a belégzésnek, lenyelésnek, bőrön keresztül történő kontaktusnak, függ a részecskék megjelenésétől, a részecskék állapotától, eloszlásától, az adott területen, helyiségben eltöltött időtől, a légcseré/ szellőztetés módjától vagy hiányától. A fizikai és kémiai állapot esetében fontos szempont a megjelenési forma, valamint az anyagok eloszlása az adott közegben, illetve azok kapcsolódása annak részecskéihez, tehát növekszik a kockázat, ahogy a szuszpenziótól haladunk az erősen diszperz rendszer felé. Amennyiben nő az expozíció, azzal együtt a foglalkozás-egészségügyi kockázat is fokozódik (6. ábra).



6. ábra Expozíció kockázatának alakulása [12] nyomán a szerzők saját szerkesztése

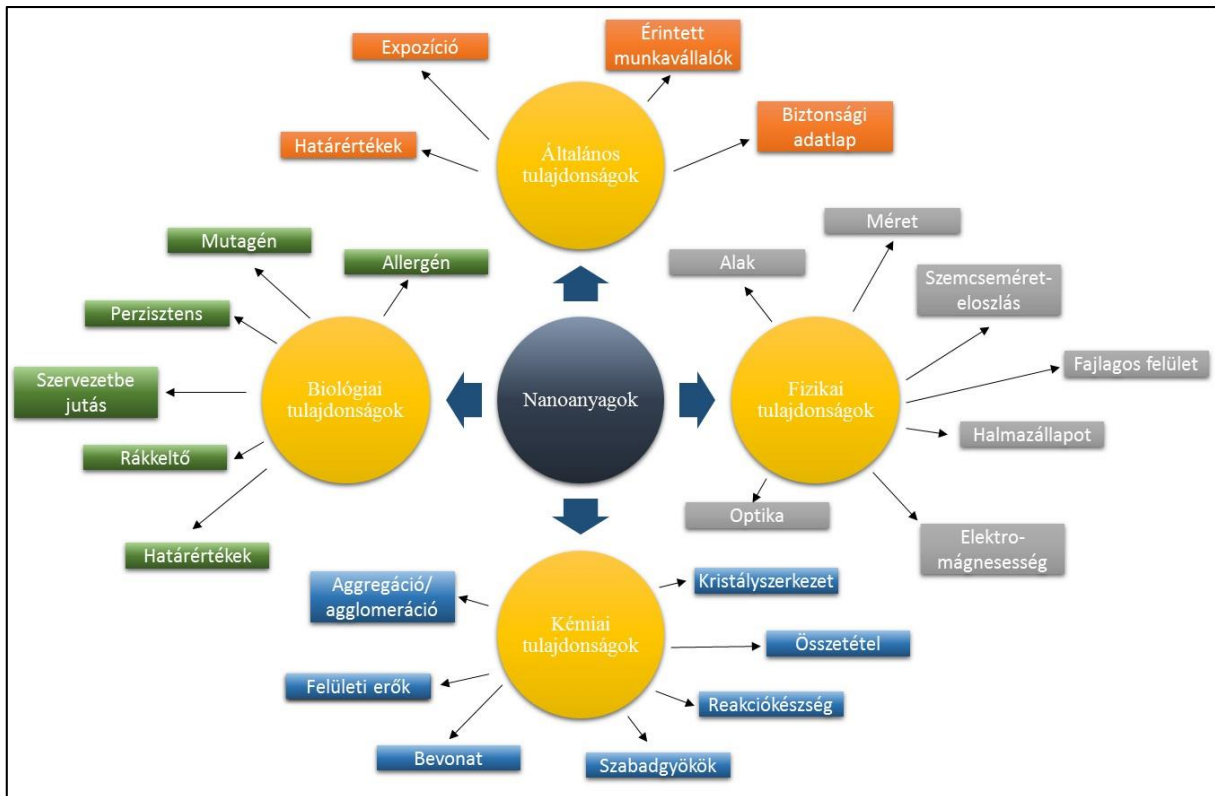
Azon munkahelyeken, ahol felmerülhet a nanoanyagokkal történő érintkezés kockázata, annak bármilyen formájában, kockázatértékelést kell végezni. Ugyanúgy, mint a veszélyes anyagok, tevékenységek, eszközök esetében, úgy a nanoanyagokat és a kapcsolódó folyamatokat is vizsgálni kell. Ebből a szempontból nem rendelkezünk kiforrott értékelő szempontrendszerrel, habár kiemelt jelentősége van. Az új anyagokkal kapcsolatban jelentős mértékű a bizonytalanság, amelyet minél gyorsabb ütemben csökkenteni kell. Szükséges egy olyan alapos és részletes iránymutatás felállítása, amely általánosan alkalmazható az érintett iparágakban.

Magas kockázat esetén a munkafolyamatot le kell állítani és mindaddig szüneteltetni kell, amíg a veszély kiküszöbölése, a kockázat csökkentése meg nem történt. Azt a kockázatot, amely az intézkedések után is fennál, fennmaradó kockázatnak nevezzük, amely esetén a veszély nem csökkenthető tovább, hiszen akkor a vizsgált elem, folyamat elveszíti azt a tulajdonságát, amiért a technológia során alkalmazzák. Ezt a kockázatot el kell fogadni és a biztonsági adatlapon vagy azzal egyenértékű dokumentumon fel kell tüntetni.

4. Értékelési szempontrendszer

Az általunk készített szempontrendszert az alapvető tulajdonságok szerint állítottuk össze, amelyet a 7. ábra is szemléltet. Az anyagok általános tulajdonságait vizsgálva figyelembe vehető a biztonsági adatlap vagy azzal egyenértékű dokumentum megléte, az érintett munkavállalók neme, kora, az expozíció időtartama és gyakorisága, illetve különböző határértékek. A fizikai tulajdonságok tekintetében vizsgálható többek közt a részecskék alakja (pl.: gömb, rost, szál, cső, lapocska, quantum dot stb.), mérete, szemcseméreteloszlás, elektromágneses tulajdonságok, halmazállapot, fajlagos felület, optikai tulajdonságok. Kémiai tulajdonságok közé sorolható és vizsgálható az anyag kristályszerkezete, összetétele, reakciókészsége, felületi bevonat megléte, szabadgyökképződés lehetősége, felületi erők, aggregációs/agglomerációs képesség. Másik fontos tárgykör a biológiai tulajdonságok felmérése, ahová sorolhatók különböző határértékek, a szervezetbe jutás módja, az egészségkárosítás formája (pl.: allergén, karcinogén, gyulladáskeltő, mutagén, perzisztens stb.). Elemezhető a tevékenység, amely során felléphet az expozíció (pl.: előállítás, megmunkálás, szállítás, karbantartás, takarítás stb.). Mindezek mellett érdemes megvizsgálni a részecskék anyagát is (pl.: grafén-oxid, arany, ezüst, fullerén stb.). Az értékelési szempontok a folyamat, illetve technológia típusától függően változhatnak. Nem tekinthető minden szempont relevánsnak bármely folyamat esetében.

A szempontrendszert, valamint magát a vizsgálati folyamat elvégzését a munkavédelmi jellegű kockázatértékelések elkészítése során javasoljuk alkalmazni, amely kiterjedhet többek között új anyag beszerzésére, új munkavállaló belépésére, aki munkája során érintkezésbe léphet az adott anyaggal, az anyaggal történő munkavégzés folyamatában és körülményeiben, illetve az anyaggal munkát végzők személyében bekövetkező változások alkalmával.



7. ábra Néhány példa a nanoanyagok vizsgálandó tulajdonságaira, szerzők saját szerkesztése

5. Összefoglalás

A nanoanyagokkal kapcsolatos kockázatértékelésekhez kapcsolódóan a kockázatértékelési folyamat segítése érdekében olyan vizsgálati kritériumrendszert javasolunk, amely az értékelőt tématerületenként segíti végig az értékelés folyamatán a nanonagyagokkal kapcsolatos felmérés végzése során. Fontos kiemelni, hogy az általunk készített kritériumrendszerben a kockázat mértékére nem tettünk utalást, hiszen az nanoanyag típusonként jelentős eltérést mutathat, mindössze egy általános összefoglalást készítettünk, mely az értékelés elvégzésekor támpontot adhat a vizsgáló számára. Az általunk készített kritériumrendszer kidolgozása során megállapítottuk, hogy a nanoanyagokra vonatkozó kockázatértékelések elvégzése során átfogó módon vizsgálni kell az anyagok általános, fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságait. Folyamatosan nyomon kell követni a technológiai fejlődést és a kutatások menetét, frissíteni kell a szakirodalmi adatbázist, a forrásanyagokat, hogy a munkavégzés során alkalmazott és keletkező anyagok és részecskék tulajdonságait illetően mindig naprakészen, a lehető legtöbb és legpontosabb ismerettel rendelkezünk.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalomjegyzék

- [1] A Tanács 89/391/EGK irányelve-intézkedések a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségvédelmének javítására (1989).
- [2] Bárány, S., (2014) 'A kolloidkémia alapjai'.
- [3] Bartis, J. T., Landree, E., (2006) 'Nanomaterials in the Workplace. Policy and Planning Workshop on Occupational Safety and Health'.
- [4] Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, H. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., West, J., Gordon S. C. (2015) 'Comparative assessment of nanomaterial definition and safety evaluation consideration', *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73. kötet, pp. 137-150., doi: 10.1016/j.yrtph.2015.06.001.
- [5] Chen, R., Qiao, J., Zhao, Y., Chen, C., (2018) 'Intelligent testing strategy and analytical techniques for the safety assessment of nanomaterials', *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410. kötet, pp. 6051-6066., doi: 10.1007/s00216-018-0940-y.
- [6] ECHA, (2020) *European Chemical Agency*. [Online] Available at: <https://echa.europa.eu/hu/regulations/nanomaterials> [Hozzáférés dátuma: 10 10 2020].
- [7] EU-OSHA, 'Nanoanyagok a karbantartási munkában: foglalkozási kockázatok és megelőzés', *E-FACTS 74*. hely nélk.:European Agency for Safety at Work.
- [8] Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., Danquah, M. K., (2018) 'Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, toxicity and regulations', *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2018, 9. kötet, pp. 1050-1074., doi:10.3762/bjnano.9.98.
- [9] Jia, H.-R., Zhu, Y.-X., Duan, Q.-Y., Chen, Z., Wu, F.-G., (2019) 'Nanomaterials meet zebrafish: Toxicity evaluation and drug delivery applications', *Journal of Controlled Release*, doi: 10.1016/j.jconrel.2019.08.022.
- [10] Kaluza, S., Balderhaar, J. K., Orthen, B., Honnert, B., Jankowska, E., Pietrowski, P., Rosell, M. G., Tanarro, C., Tejedor, J., Zugasti, A., 'Workplace exposure to nanoparticles', *Literature review*, EU-OSHA, European Agency for Safety and Health at Work, European risk observatory.
- [11] Nagymajtényi, L., (2013) 'A nanorészecskék okozta egészségkárosító hatások', *A természet világa*, 2013. november kötet, https://epa.oszk.hu/02900/02926/00011/pdf/EPA02926_termeszeti_vilaga_2013_11_516-520.pdf.
- [12] NIOSH, (2016) 'Building of Safety Program to Protect the Nanotechnology Workforce: A Guide for Small to Medium-Sized Enterprises'.
- [13] Wholleben, W., Kuhlbusch, T. A. J., Schnekenburger, J., Lehr, C.-M. (2015) 'Safety of Nanomaterials along their lifecycle', *Release Exposure, and Human Hazards*, CRC Press, ISBN 978-1-4665-6788-7.