

17. fejezet

Az éghajlatváltozás által jelentkező kihívások a nukleáris biztonságban

Csurgai József¹

17.1. Bevezetés

A vegyi és nukleáris ipar fejlődése és tömegessé válása az adott ország és közvetlen környezete számára egy velejáró kockázati tényező. A békés célú vegyi és nukleáris ipar akaratlanul is a veszélyforrásokat teremti a pusztán létezésével. Ha nukleáris iparról beszélünk, értve ez alatt nemcsak az atomerőműveket, hanem minden olyan létesítményt, amely a nukleáris fűtőanyagciklus részét képezi, idesorolva a kísérleti és tanreaktorokat is, a technológiai biztonság, a fizikai védelem, a nukleáris védettség meg fogja határozni a környezetbiztonságnak szerves részét képező nukleáris biztonságot. Ezenkívül meg kell említeni a nagy aktivitású, különböző céllal alkalmazott sugárforrásokat is, hiszen ezek is veszélyforrások lehetnek. Természetesen bármilyen szintű védelem adott szintű veszélyforrással meghatározott kockázati tényezőt rejt, ez az összetett rendszereknek a sajátossága. Éppen ezért számba véve a lehetséges veszélyforrásokat, modellezve ezek károsító hatását késznek kell lenni az ellenük való védelem lehetőségeire, ha az ember közvetlen szabályozó ráhatása alól „kiszabadulnak” valamilyen oknál fogva. A következmények súlyossága a kibocsátási körülmények mellett alapvetően környezeti, vagyis domborzati, terepfedettségi, illetve időjárási paraméterek függvénye lesz. Ezen paraméterek valamilyen extrém anomáliája, például egy extrém időjárási helyzet akár súlyosbíthatja a kialakult helyzetet. A nukleáris biztonság e részterületének vizsgálata, súlyt helyezve a váratlan és extrém környezeti hatásokra, lesz a célja a jelen fejezetnek.

17.2. A nukleáris katasztrófa lehetséges forrásai

A nukleáris katasztrófa lehetséges forrásai lehetnek:

- energiatermelő, tudományos kutatási vagy oktatási célú atomreaktorok;
- új vagy kiegészített fűtőelem, illetve más izotóp szállításának balesete;
- radioaktív izotóp vagy hulladék véletlen vagy szándékos szétszórása.

¹ ORCID: 0000-0003-4770-7997, jcsurgai@gmail.com

17.2.1. Atomreaktor nélküli egyéb nukleáris létesítmények

A radioaktív izotópok hazai felhasználása során mind nagy aktivitású zárt sugárforrásokat, mind nyitott radioaktív izotópokat használnak. Hazánkban több nagy aktivitású, zárt sugárforrás található:

- Hazánkban négy technológiai besugárzó berendezés található 4500–9000 TBq ^{60}Co és 100 TBq ^{137}Cs névleges aktivitással.
- A kilenc hazai terápiás berendezés 75–300 TBq ^{60}Co és 130 TBq ^{137}Cs alkalmazását jelenti.
- Húszt különböző típusú laboratóriumi besugárzó berendezés üzemel 0,4–750 TBq ^{60}Co és 0,7–110 TBq ^{137}Cs névleges aktivitással.
- Ipari radiográfiás céllal 62 létesítményben működik berendezés ^{192}Ir forrással, 2–5 TBq névleges aktivitással. Az éves aktivitásfelhasználás 600–700 TBq. Sok helyen alkalmaznak még berendezést 0,1–1 TBq névleges ^{60}Co vagy ^{137}Cs aktivitással.
- Mintegy 200 ipari munkahelyen 1000–1500 darab MBq–GBq aktivitású ^{60}Co , ^{137}Cs és ^{241}Am sugárforrást alkalmaznak.

Hazánkban nyitott radioaktív anyagokat különböző izotóplaboratóriumokban lehet alkalmazni. Jelenleg egy darab öt egységből álló A típusú, 53 B típusú és 270 C típusú izotóplaboratórium működik az országban. Az A típusú laboratóriumokban 1000 TBq /év aktivitást dolgoznak fel, a B típusú laboratórium évi forgalma TBq alatti, és a C típusú laboratórium forgalma nem éri el a GBq nagyságrendet.

17.2.2. Kozmikus objektumtól származó veszélyeztetettség

Jelenleg az űrkutatásban kétféle nukleárisenergia-termelő rendszert alkalmaznak:

- radioizotópos termoelektromos generátort;
- fedélzeti atomreaktort.

A radioizotópos termoelektromos generátorok első példánya az amerikai gyártmányú SNAP-3 típusú volt 1961-ben. A berendezés névleges villamos teljesítménye 2,7 W, sugárforrása ^{238}Pu volt. A sorozatgyártás során 100–750 W teljesítményű példányok is készültek, a Voyageren működő példány 7700 TBq ^{238}Pu izotópot tartalmazott. A jelenleg fejlesztés alatt álló típusok teljesítménye 10 kW körüli, 350–400 ezer TBq ^{238}Pu aktivitással.

A szovjet gyártmányú radioizotópos termoelektromos generátorok első példányait 1970-től a Kozmosz műholdakon használták, ^{210}Po izotóppal működtek, és 8–22 W névleges villamos teljesítményt szolgáltatottak. A Luna holdakon a hetvenes évek elején már 1 kW teljesítményű ^{210}Po töltetű berendezések működtek.

Az első fedélzeti atomreaktor a SNAP-10A típus volt 1965-ben. Ez 4,5 kg ^{235}U izotóppal működött, 500 W névleges villamos teljesítménnyel. Ezen berendezés 43 napos működés után elektromos hiba miatt leállt, ezután olyan pályára vitték, amelyről csak ezer év múlva tér vissza a Földre. A 80-as évek közepén kezdték el fejleszteni a 100 kW teljesítményű SP-10 típust, illetve egy 10–100 MW-os egységet. Ezen típusok telepítése a főleg katonai célokat szolgáló kozmikus objektumokra az elkövetkezendő évtizedben megtörtént.

Az első szovjet fedélzeti atomreaktort 1967-ben küldték fel a Kozmosz–198 fedélzetén. Két szovjet fedélzetireaktor-típus ismert. A Romaska 45 kg 90%-ra dúsított ^{235}U izotóppal működik, és 500 W névleges villamos teljesítményt szolgáltat, ez egy radioizotópos termoelektromos generátor. A Topáz típusú fedélzeti atomreaktor 5–10 kW névleges villamos teljesítményt szolgáltat 5000 órán át az ^{235}U töltet segítségével.

Jelenleg több mint 30 reaktorral felszerelt Kozmosz műhold, több mint 1000 kg ^{235}U hasadóanyaggal kering 700–800 kilométer magasságban. Átlagos élettartamuk a világűrben mintegy 300 év.

A radioaktív anyagot tartalmazó űrobjektum, ha a kilövés sikertelen, visszazuhan a talajra, esetleg a levegőben vagy a talajon felrobban. Ilyen esetekben a radioizotópos termoelektromos generátor általában nem sérül meg, és megkereshető. Ha robbanás következik be, akkor az izotóp a levegőben diszpergálódhat. A fedélzeti reaktorok, mivel a kilövéskor még nem működnek, visszazuhanáskor általában nem jelentenek veszélyt.

Ha a meghibásodás az űrben történik, és van elegendő üzemanyag, úgy a műholdat olyan pályára vezérlik, ahonnan csak ezer év múlva tér vissza, addigra a radioaktív anyagok lebomlanak. Ha kevés az üzemanyag, olyan pályára állítják, hogy a sűrű légkörbe érve elpárologjon, és bár világméretű, de csak jelentéktelen intenzitású szennyeződést okozzon.

Ha a többszörözött biztonsági rendszerek elromlanak, amelyek közül egyesek a műhold meghibásodásakor automatikusan működésbe lépnek, akkor az űrobjektum egyes darabjai a talajra hullanak, nagyobb részük a sűrűbb légkörben elpárolog, és csekélyke világméretű szennyeződést okoz.

Eddig három radioizotópos termoelektromos generátorral és három fedélzeti atomreaktorral felszerelt műhold meghibásodását figyelték meg, ezek közül három járt radioizotóp-kibocsátással.

A kilövés folyamán a Földre visszazuhant két műhold radioizotópos termoelektromos generátor berendezése nem sérült meg, az egyiket sikerült megtalálni, a másik pedig 6000 méteres tengerszint feletti magasságba került. Ezeknél nem történt izotópkibocsátás éppúgy, mint annál a meghibásodott fedélzeti reaktornál sem, amelyet sikerült magasabb pályára vezérelni.

A három radioizotóp-kibocsátással járó baleset közül az egyik a SNAP-9A 630 TBq ^{238}Pu tartalmú radioizotópos termoelektromos generátor balesete volt, amelynek izotóptartalma Madagaszkár térségében a sztratoszférában világméretű szennyeződést okozva elpárologott. A szennyeződés a magas légkörben, sőt a talajon is kimutatható volt, azonban a lakosságra gyakorolt sugárhatása a nagymértékű hígulás következtében jelentéktelenül kicsi volt.

A Kozmosz–1402 fedélzeti atomreaktora is elpárologott a visszatéréskor. A világméretű szennyeződés azonban nem jelentett számottevő sugárterhelést a lakosság körében.

A Kozmosz–954 fedélzeti atomreaktorának egyes részei Kanadában értek földet. Mintegy 600 km hosszú és 20 km széles sávban szóródtak szét a darabjai, szerencsére lakatlan, havas tájon. 65 kilogramm makroszkopikus törmelékét sikerült összegyűjteni, amelyek felületén 6 mGy/h és 5 Gy/h közötti dózisteljesítmény volt mérhető. A 0,1–1 milliméteres darabok 0,2–5 GBq aktivitásúak voltak. Az átlagos kiszóródás 100 szemcse/km² volt. Megjegyzendő, hogy a reaktor nagy része, legalább 75%-a elpárologott. A világméretű szennyeződés azonban elenyésző hányadát képezte a légköri atomfegyver-kísérletek által

okozott szennyeződések mennyiségének. Kanadában nem észleltek radioaktív szennyeződést a levegőben, az ivóvízben és az élelmiszerekben.

A fő veszély az egyes nagyobb reaktortörmelék megtalálása, és azokat emléke eltevő személyeket fenyegeti. Kanadában például tíz nagyobb darabot találtak meg a veszély mértékével tisztában nem levő személyeknél.

17.2.3. Radioaktív sugárveszély lehetséges forrásai, az atomerőmű balesete következtében

Az atomreaktorokból a sugárzó anyag különböző formában szabadulhat ki:

- gáz halmazállapotban;
- szilárd részecskék formájában (aeroszol);
- füst, korom és pernye alakban, tűz esetén.

Ezeket a részecskéket, szemcséket a szél elsodorja: kialakulhat egy radioaktív felhő, és a felhő mozgásának nyomvonalán, a földfelszínre történő kiülepedésből egy vagy több sugár-szennyezett terület.

Az élő szervezetre veszélyes besugárzás legfontosabb forrásai:

- az atomreaktorok közvetlen sugárzása (gamma- és neutronsugárzás);
- a mozgó radioaktív felhő (csóva) sugárzása az útjába kerülő emberekre (gamma- és béta-sugárzás);
- a talajra kiülepedett radioaktív anyag sugárzása (gamma- és béta-sugárzás);
- a bőrre és a ruházatra ráakódott radioaktív anyag sugárzása (gamma- és béta-sugárzás);
- a levegőben lebegő (kiülepedett vagy a talajról feláramló) radioaktív részecskék be-nyelése, belélegzése (egy szóval bekebelezése = inkorporációja), illetve az ezekből kibocsátott alfa-, béta-, gamma- és neutronsugárzás;
- a szennyezett élelmiszerek fogyasztása (alfa-, béta- és gamma-sugárzás).

Ezek a sugárforrások három kritikus úton veszélyeztetik az emberi szervezetet:

- az egész test külső besugárzása;
- a pajzsmirigy sugárterhelése a bekebelezett jódizotópok pajzsmirigybe történő beépülése miatt;
- egyéb szervek (tüdő, gyomor stb.) besugárzása a radioaktív izotópok bekebelezése és a szervezetbe beépülése következtében.

A legsúlyosabb atomreaktor-katasztrófa esetén (zónaolvadáskor) kibocsátott legfontosabb sugárzó izotópok és domináló sugárhatásaik a következő táblázatban találhatók:

17.1. táblázat

A NAS által vizsgált hatások, következmények és az alkalmazkodási beavatkozások

Izotóp	Felezési idő (nap)	Domináló sugárhatások		
		pajzsmirigy	tüdő	egész test
Krypton-88 (^{88}Kr)	0,117	–	+	+
Ruténium-106 (^{106}Ru)	365	–	+	–
Jód-131 (^{131}I)	8,050	+	+	+
Jód-132 (^{132}I)	0,096	+	+	+
Jód-133 (^{133}I)	0,875	+	+	+
Jód-134 (^{134}I)	0,037	+	+	+
Jód-135 (^{135}I)	0,280	+	+	+
Xenon-133 (^{133}Xe)	0,875	–	–	+
Xenon-135 (^{135}Xe)	0,384	–	–	+
Cézium-134 (^{134}Cs)	750	–	+	+
Cézium-137 (^{137}Cs)	11 000	–	+	+
Cézium-144 (^{144}Cs)	284	–	+	–

Forrás: a szerző szerkesztése

Ha a pajzsmirigy dózist jódtabletták megelőző beszédetésével csökkentik, akkor a tüdő sugárterhelése lehet viszonylag a legjelentősebb.

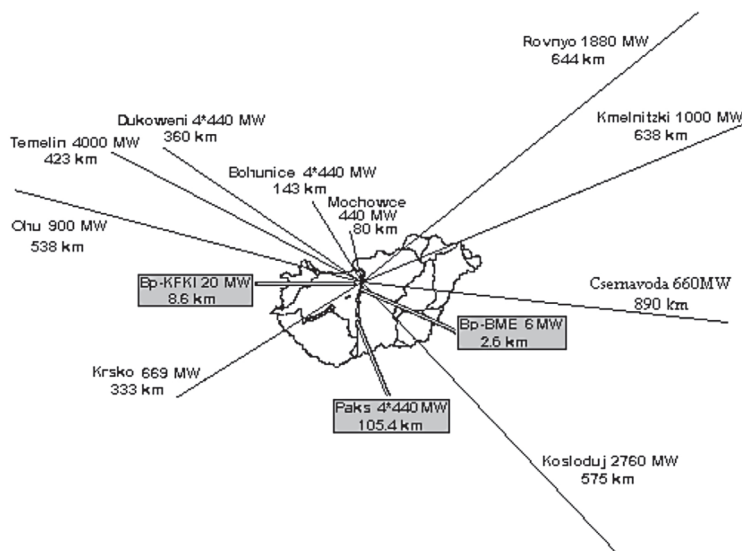
17.2.4. Szennyezett terület kialakulása atomerőmű-katasztrófa után

A radioaktív anyagok mennyisége a levegőben és a talajon, a kibocsátás helyétől adott távolságban, több tényezőtől függ:

- a kibocsátás mennyiségétől, magasságától, hőtartalmától;
- a kibocsátott anyag fizikai-kémiai tulajdonságaitól;
- a szél sebességétől;
- a levegő függőleges stabilitási viszonyaitól (azaz nyugalmától, fel- vagy leáramlásától);
- a csapadék mennyiségétől.

A talajszinten kialakuló aktivitássűrűséget egy adott távolságban e tényezők ismeretében előre jelezhetjük (terjedési modellek alapján) a várható szennyezett terület határainak becslésével.

A sok bizonytalanság és a meteorológiai viszonyok általánosan gyakori és gyors változása miatt azonban a modellszámítások pontosítása szükséges, és ehhez a helyi sugárzás-mérések nélkülözhetetlenek.



17.1. ábra

Magyarországon és közvetlen közelében található atomreaktorok

Forrás: a szerző szerkesztése

A sugárszennyezett terület közeli és távoli övezetre osztható. A közeli övezet a szél irányában néhány 100 km-ig terjed. Itt hullanak ki a radioaktív felhőkből a szilárd részecskék, a pernye-, füst- és koromszemcsék, amelyek a kiszabadult aktivitás nagyobb részét tartalmazzák. Az előre jelzett zónák legfontosabb adatai értékelő táblázatokból olvashatók ki, vagy számítógépes terjedési modellekkel állapíthatók meg. A radioaktív kiáramlás akkor okozza a legnagyobb szennyezettséget, ha a szél sebessége a földfelszínen viszonylag kicsi (5 m/s alatti) és a levegő feláramlását elhanyagolhatjuk (izotermia esetén), ilyenkor a radioaktív felhő csak nagyon lassan oszlik szét. Ha az atomreaktor hűtőközege és a lassító közege egyaránt víz (nyomottvízes reaktor: PWR- vagy VVER-típus), akkor a reaktorközelében nagyon súlyosan sugárszennyezett zóna nem alakul ki még a zóna olvadása esetén sem.

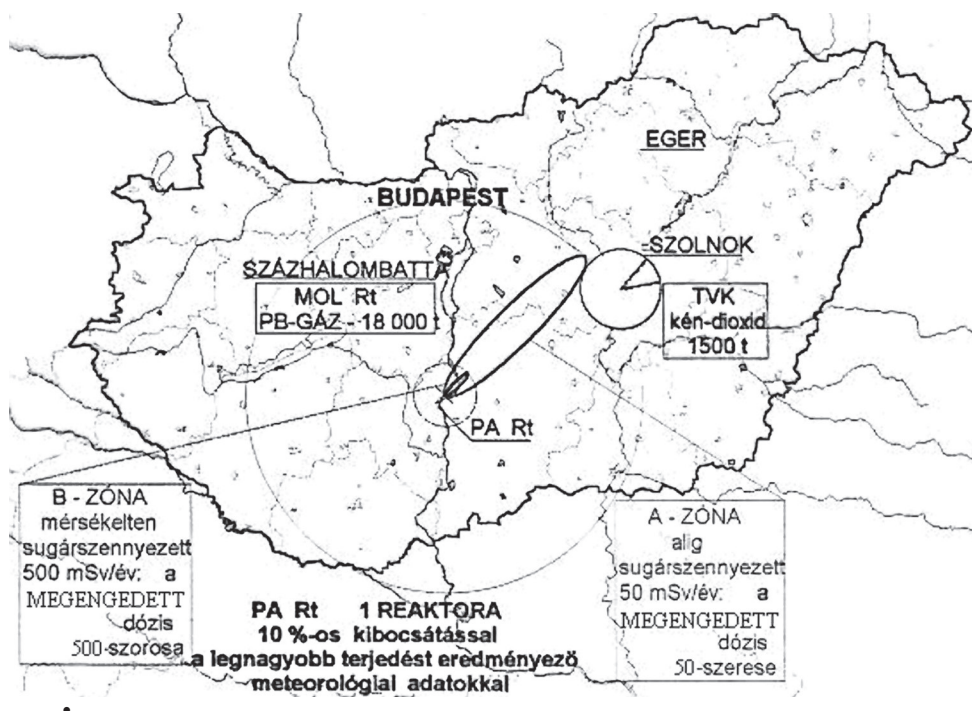
A sugárszennyezett terület mérete és alakja eltér az atomrobbanásakor kialakuló sugárszennyezett területtől. Ennek okai, hogy a reaktorbaleset során:

- a sugárzó anyagok kiáramlása nem pillanatszerű, hanem folyamatos, és néhány órán át vagy napokig is eltarthat;
- kisebb a kiszabaduló sugárzó anyag mennyisége (aktivitása);
- eltérő az izotóp-összetétel és a gáz-szilárd komponensek aránya;
- lassabb a természetes lebomlás.

A kiszabadult, egy mikrométernél kisebb és a felső légkörbe jutott radioaktív izotópokat a légmozgások több ezer kilométer távolságra is elsodorják, de akár világ körüli útra is kerülhetnek. A szél iránya többször változik, ezért a radioaktív felhők vándorlását és nyomvonalát a talajon nem lehet (teljes biztonsággal) előre megjósolni. Egyrészt a felhő felhígul

sodródása és akár a magas légterbe áramlása közben, másrészt a radioaktív szemcsék kiülepedhetnek a talajra. Így alakul ki a sugárszennyezett terület távoli övezete. Az ebből származó legnagyobb veszélyek a következők:

- a felhőből bekebelezhető jódizotópok;
- a szennyezett élelmiszerek fogyasztása;
- és a megnövekedett háttérsugárzás.



17.2. ábra

Egy paksi atomreaktor lehetséges maximális sugárveszélyes körzetei, összehasonlítva néhány nagy vegyipari központ veszélyhelyzet-elemzésével

Forrás: a szerző szerkesztése saját elemzése alapján

17.3. A nukleárisbaleset-elhárítás lehetőségei, védelmi intézkedések

17.3.1. A nemzetközi nukleáris eseményskála (INES) és a biztonság megítélése

A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség 1990-ben a különböző nukleáris létesítményeknél bekövetkező események besorolására, elsősorban a tájékoztatás egységesítése és megkönnyítése érdekében három kategóriára osztva nyolc szint használatát vezette be. Ezen

osztályozás bevezetésével az ügynökség deklarált célja az volt, hogy hatékony eszközt teremtsen a közvélemény tájékoztatása céljából. A skála hátránya, hogy nem foglalkozik a kiégett nukleáris fűtőanyag reprocessálásával, ami nukleáris biztonság szempontjából nem kevésbé veszélyes.

17.2. táblázat
Az INES skála kategóriái

Kategória	Szint
Baleset	4–7
Üzemzavar	1–3
Biztonsági szempontból nem meghatározó jelentőségű eset	0

Forrás: a szerző szerkesztése

17.3.2. Többoldalú nemzetközi egyezmények

A nukleáris veszélyhelyzettel kapcsolatos első nemzetközi megállapodások a 70-es években jelentek meg, és a nemzetközi szervezetekben is több kezdeményezés történt az atomerőművi balesetek országhatáron túli hatásaival kapcsolatos együttműködés egységes szabályozására. A csernobili események ezt a folyamatot felgyorsították, és az elmúlt években széles körű nemzetközi együttműködési rendszer alakult ki, amelynek Magyarország is részese. Az együttműködést két- és többoldalú egyezmények szabályozzák. Az alábbi többoldalú szerződések vannak érvényben:

- a nukleáris balesetekről adandó gyors értesítésről szóló egyezmény;
- a részt vevő országok azonnali értesítést adnak a területükön bekövetkezett olyan balesetről, amely más ország számára sugáregészségügyi jelentőségű lehet;
- nukleáris baleset vagy sugaras veszélyhelyzet esetén való segítségnyújtásról szóló egyezmény.

Az egyezményben részes minden potenciálisan érintett és veszélyeztetett állam segítségért fordulhat bármely részt vevő államhoz. Az egyes országok által rendelkezésre bocsátható lehetőségekről a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) kézikönyvet adott ki, amelynek adatait rendszeresen pontosítják.

A nukleárisbaleset-elhárításhoz közvetve kapcsolódó egyezmények:

- a nukleáris anyagok fizikai védelméről;
- az atomkárokért való polgári jogi felelősségről;
- az atomkárokért való polgári jogi felelősségről szóló bécsi egyezmény és az atomenergia területén való polgári jogi felelősségről szóló párizsi egyezmény alkalmazásáról szóló jegyzőkönyv;
- Nemzetközi Nukleáris Eseményskála (International Nuclear Event Scale – INES);
- kétoldalú egyezmények.

A többoldalú egyezmények mellett a kétoldalú megállapodások lehetővé teszik, hogy a részt vevő országok ne csak a NAÜ-n keresztül, hanem közvetlenül is tájékoztassák egymást

az esetleges balesetekről. Az egyezmények módot adnak a kölcsönös tájékoztatásra a nukleáris programokról, különös tekintettel az új létesítmények építésére, a környezeti sugárvédelmi mérések összehasonlítására.

17.3.3. A védelmi intézkedések célja

A védelmi intézkedések célját egy hármas feladatrendszerben fogalmazhatjuk meg:

- megakadályozni a sugárzó anyagok kijutását a szennyezett, ellenőrzött területről;
- megóvni a lakosságot az esetleg megnövekedett radioaktív sugárzás okozta többletdózis-terheléstől;
- elősegíteni a káros következmények elkerülését vagy legalább minimalizálását.

A védelmi intézkedések bevezetése gyakran együtt jár különböző konfliktusokkal, dilemmákkal és többletkiadással. A döntések folyamatában ezeket szembesíteni kell a védelmi intézkedések elmaradásának várható következményeivel. Csak akkor célszerű egy óvin-tézkedést elrendelni, ha a dózisterhelés jelentősen csökkenthető, valamint az így elérhető előnyök és az ehhez kapcsolódó elkerülhetetlen hátrányok aránya kedvező.

17.3.4. A vonatkozó törvények, dóziskorlátok kihatása a nukleárisbaleset-elhárításban részt vevő szervezetekre

A nukleáris energiáról szóló 1996. évi CXVI. törvényben rögzítettek szerint a népességre, így a szervezetekre vonatkozóan is a megengedett dózisegyenérték-korlát értéke 1 mSv/év (effektív). Ennél több (maximum 50 mSv egy évre, de öt évre vonatkoztatva maximum 100 mSv) elszennvedésével veszélyeztető feladatra csak olyan önkéntes katasztrófaelhárító vagy életmentő személy alkalmazható, aki a katasztrófahelyzetet megelőzően ilyen munkaveszélyszintű helyen volt foglalkoztatva. Tehát rendelkezik a szükséges elméleti ismeretekkel, gyakorlati tapasztalattal és az egészségi alkalmasságát bizonyító, aktuálisan érvényes orvosi igazolással. Ilyen személyek találhatók az atomreaktort, illetve radioaktív sugárforrást alkalmazó vagy ellenőrző ipari, orvosi és kutató szervezeteknél.

17.3.5. Elzárkózás óvóhelyen, lakásokban

Az átvonuló felhő gamma-sugárzását részben vagy egészben elnyelik az épületek falai és födémjei. Az elnyelődés függ az építőanyag minőségétől és a falak vastagságától. A nagyobb sűrűségű építőanyagok és a vastagabb falak nagyobb mértékben nyelik el a sugárzást. Tehát jobb védelmet nyújtanak a föld alatti építmények, óvóhelyek, pincék és a lakásokban a külvilágtól legtávolabbi, legbelső helyiségek.

A talajra lehullott radioaktív anyag sugárzása ellen nagyobb védelmet nyújtanak a föld felszíne alatti helyiségek és a felsőbb emeletek belső helyiségei. Lényeges tehát, hogy minél vastagabb és minél elnyelőképesebb réteggel elhatárolva, minél távolabb legyenek

a személyek a külső radioaktív sugárözöntől, lehetőleg a külső levegő beáramlásától minél mentesebben.

Az óvóhelyeken és az épületek belső helyiségeiben az elszennvedhető dózis csak 1–10%- a nyílt elhelyezésben elszennvedhető külső dózissal.

17.3. táblázat

Kiülepedett radioaktív szennyeződéstől védő, gyengítési (redukciós) együtthatók (K_{gy})

A radioaktív sugárzást elnyelő körülmény (közeg)	Elszenvedhető sugár-adag (D) szorzója ($\times$ kg)	Elszenvedhető sugár-adag (D) osztója ($/$ kg)
<i>Nyílt elhelyezésben 1 m-re a talaj felett</i>	1,00	1
<i>Gépjárműben</i>	0,50	2
<i>Vagonokban</i>	0,40	2,5
<i>Faházakban</i>	0,40	2,5
<i>Téglaépítményekben</i>	0,20	5
<i>Többszintes épületben, 1. és 2. emeleten</i>	0,05	20
<i>Többszintes épületben, a felsőbb emeleteken</i>	0,01	100
<i>Többszintes épületek pincéjében</i>	0,01	100

Forrás: a szerző szerkesztése

Az óvóhelyek és a belső helyiségek részben megakadályozzák a radioaktív anyagok be-
légzését is. A bekebelezés (inkorporáció) csökkenése a nyílászáró szerkezetek minőségétől
és a szellőztetés mértékétől függ. Az ajtókat, ablakokat be kell zárni, mielőtt a radioaktív
felhő megérkezik. Növeli a védelmet (akár kilencszeresen is), ha a nyílászáró szerkezetek
réseibe nedves lepedőt tömnek, az ajtók és ablakok kereteire nedves pokrócot erősítenek.

Ha közszolgálati hírközlő eszközökből (médiákból) ismertté válik, hogy a felhő elvonul,
és a sugárzó anyag a levegőből kiülepedett a talajra, a helyiségekben felgyülemlett szén-
dioxidot alaposan ki kell szellőztetni. Azonban célszerű ezután is a lakásokban maradni,
a talaj sugárszintjének kevésbé veszélyeztető értéke alá csökkenéséig.

17.3.6. Megelőző gyógyszerelés (profilaxis)

Különböző vegyületek adagolása csökkenti vagy megakadályozza egyes radionuklidok be-
épülését a szervezetbe azáltal, hogy a nem radioaktív készítmény beszedésétől túltelítődik
a szervezet, és az ezután esetleg a szervezetbe kerülő radioaktív anyag lesz a felesleg, amely
beépülni nem tud, hanem kiürül. A stabil jódvegyületek (például a kálium-jodid vagy
a kálium-jodát) hatásosan csökkentik a pajzsmirigyben a jódizotópok felvételét. A gyer-
mekek pajzsmirigy-dózisterhelése (életkori sajátosságuknak és méreteiknek megfelelően)
kb. háromszor nagyobb a felnőttekhez viszonyítva, azonos körülmények között. A sugárzó
jód (^{131}J) beépülésének mennyisége kb. 24 óra alatt éri el maximumát a pajzsmirigyben,
kb. 6 óra alatt a maximum 50%-át, a belégzés kezdetétől számítva. Ezért a jódtabletták csak
akkor hatékonyak, ha beszedésük a radioaktív felhő érkezését megelőzi.

A jódvegyületek beszedése megzavarja a pajzsmirigy működését, ezért mellékhatások
is keletkeznek. Tehát a jódtabletták kiosztása csak akkor indokolt, ha a radioaktív felhőben
a jódizotópok koncentrációja, illetve a várható pajzsmirigy dózis egy adott értéknél nagyobb,

és a bekebelezés ellen (az adott környéken) nem lehet másként védekezni (például megelőző kimeneküléssel, elzárkózással, a levegő szűrésével vagy regenerálásával stb.).

A jódpprofilaxis általában más óvintézkedésekkel együtt lehet eredményes, amelyek értelemszerűen feleslegessé is tehetik az elrendelését (például az elzárkózás).

17.3.7. A be- és kilépés korlátozása (mozgáskorlátozás)

Korlátozni kell a be- és kilépéseket az atomerőmű környezetében néhányszor 10 km-es sugarú körben, a veszély kialakulásától és mértékétől függően, vagyis:

- el kell kerülni, hogy fölösleges sugárzást szenvedjenek el azok az emberek, akik korábban a kevésbé szennyezett zónákban tartózkodtak;
- biztosítani kell a mozgékony (mobil) felderítő, mentesítő, mentő stb. alegységek szabad gyors mozgását;
- meg kell akadályozni, hogy a sugárszennyezett területről járművek, különböző eszközök, élelmiszerek stb. tiszta területre jussanak, illetve hogy a radioaktív anyagok kikerülhessenek az emberek, járművek, házi, illetve vadállatok közvetítésével;
- az utakat célszerű olyan csomópontoknál lezárni, ahol a forgalom a járművek viszszafordítása nélkül is elterelhető.

17.3.8. A lakosság kitelepítése

A kitelepítés akkor indokolt, ha a sugárveszély igen nagy, tartós, és más óvintézkedések együttesen sem helyettesíthetik.

A kitelepítési tervek elkészítéséhez a következő problémákra kell megoldást találni:

- a kitelepítendő személyek száma és a közösségek jellege (városi, falusi, ipari stb.);
- a szükséges szállítási kapacitás (a járművek száma, telephelye stb.);
- a kitelepítés útvonalai: a szennyezett területről kivezető legrövidebb és legkevésbé szennyezett utak kiválasztása;
- a kitelepítés menetrendje és a forgalomszabályozás rendje;
- a kitelepítés kedvezőtlen tömegpszichikai hatásának megelőzése, illetve kedvezőbb mederbe terelése;
- a kitelepített személyek sugárellenőrzése és sugármentesítése, orvosi szűrése, ellátása, elhelyezése és ételmezése;
- tájékoztató és keresőszolgálat;
- az anyagi javak védelme a kiürített területen.

A kitelepítés az atomerőmű közelében nem hajtható végre a kezdeti időszakban, a radioaktív felhő feltételezhető, illetve tényleges kihatása alatt. Ugyanis a szabad levegőn, illetve a járművekben is végzetesen sok besugárzás érhetné az embereket. Az épületek sugárzást elnyelő képessége lényegesen nagyobb védelmet biztosít. Tehát a kitelepítés csak a felhő beérkezését biztosan megelőzően vagy a radioaktív felhő elhaladása után a kiüledett sugárzás lecsökkenésének kivárását követően ajánlható.

A kitelepítés több problémával és kockázattal jár: betegek, háziállatok szállítása, kórházak, börtönök kitelepítése, torlódások, közúti balesetek, családok és közösségek felbomlása, a kitelepítés megtagadása stb. Nagy anyagi terhet jelent: a szállító járművek mozgatása, a kitelepítettek elhelyezése, élelmezése, másrészt a termelés kiesése az üzemekben, a betakarítás elmaradása, az elhagyott állatállomány kényszervágása, illetve gondozása stb.

17.3.9. Légzés- és bőrvédelem

Az atomerőmű katasztrófája alkalmával leginkább az embereket közvetlenül veszélyeztető radioaktív jód (^{131}J), a stroncium (^{90}Sr) és a cézium (^{137}Cs) káros hatása dominál. Meg kell akadályozni, hogy a levegőben lebegő vagy a talajról felvert radioaktív részecskék a szervezetbe bejussanak (inkorporálódjanak), vagy közvetlenül a fedetlen bőrfelületre és a ruhákra tapadjanak.

A légzőszervek védelmét szolgálják a gázálarcok vagy az orr és száj elé kötött több-rétegű kendők.

17.4. táblázat

A radioaktív részecskék belégzése elleni védelem hatékonysága különböző textíliákkal

Textíliák	Rétegek	Hatékonyság (%)
Pamut zsebkendő	8	89
Pamut zsebkendő	1	28
Pamut zsebkendő nedvesen	1	63
Frottírtörülköző	2	85
Frottírtörülköző	1	74
Frottírtörülköző nedvesen	1	70
Pamuting	2	66
Pamuting	1	35
Pamuting nedvesen	1	66

Forrás: a szerző szerkesztése

A testfelület védelmét biztosítják az egyéni ABV-védelmi készletek vagy a könnyen lemosható műanyag esőkabátok, vagy az egész testet beborító műanyag fóliák, gumicsizmák, a cipőre tekert műanyag fóliák, illetve más módon felerősített műanyag zacskók stb.

17.3.10. Személyek sugármentesítése

A bőrre és a ruházatra tapadt sugárzó anyag a testtel együtt mozgó, azt sugárzásával átható, folyamatos veszélyeztetést jelent. A környezetben lévő sugárzónön felüli sugárterheléssel az egész test külső besugárzását, majd ennek következtében a bőrön égési sérülésekhez hasonló elváltozást okozhat.

A személyek valamilyen mértékű sugármentesítését eredményezheti a szennyezettség benyelésétől és testre kerülésétől védő öltözet, illetve a műanyag fólia menet közbeni

rázogatása, leporolása, lemosása. Tiszta területre jutva a szennyezett ruhákat radioaktív-hulladék-gyűjtőbe kell dobni, majd zuhanyozni langyos szappanos vízzel, végül tiszta ruhát felvenni.

A hatóságok a személyi mentesítést a tiszta területen a sugárellenőrző pontok közelében telepített mentesítő állomásokon vagy a települések közfürdőiben szervezik meg. Egyénileg végezve, a lakások zuhanyzóiban figyelemmel kell lenni a búzelzárokban (szifonokban) történő lerakódásokra, amelyek esetleg fokozott mértékű sugárveszélyt jelenthetnek.

17.3.11. Orvosi ellátás

Az atomerőmű területén és a közelben tartózkodó személyek feltehetően nagyobb sugár-adagot kapnak. Orvosi vizsgálatuk (tüneteik, esetleg vérképük alapján) lehetséges a kialakuló sugárbetegség fokának megállapítása és a gyors orvosi beavatkozás.

A nagyobb távolságból, néhány 10 km-en kívüli körzetből kitelepített lakosság körében nem várható hirtelen fellépő (akut) sugárbetegség kialakulása. Mégis meg kell oldani a kitelepített személyek orvosi vizsgálatát, nyilvántartását és több éven át tartó ellenőrzését.

17.3.12. Az élelmiszer-fogyasztás szabályozása, legeltetési és takarmányfelhasználási tilalom

Biztosítani kell, hogy a lakossághoz ne jusson olyan élelmiszer, amelynek aktivitása a még megengedett értéknél nagyobb. A szabályozás több megoldást foglal magában:

- az élelmiszerek megsemmisítése, ha hosszú felezési idejű izotópokat tartalmaz és a szennyezettsége a normáknál nagyobb;
- az élelmiszer tárolása vagy további feldolgozása (például sajtkészítés, konzervek gyártása) ha rövidebb felezési idejű nuklidokat (például jódizotópokat) tartalmaz, mivel az élelmiszer fogyasztása (a radioaktív izotópok viszonylag gyors lebomlása miatt) néhány hét vagy hónap múlva veszélytelen;
- az élelmiszer összekeverése, hígítása tiszta területről származó termékkel, ha a szennyezettség nem túlságosan nagy, így csökkenthető az elfogyasztott élelmiszer tömegegységére eső aktivitás;
- az élelmiszer fogyasztásának engedélyezése, ha a szennyezettsége a normák alatt van.

Csökkenti a belső dózisterhelést a táplálkozási szerkezet átmeneti átalakítása, mivel előre láthatólag nem lesznek sugárszennyezettek a konzervek, a csomagolt tartósított élelmiszerek, a raktárakban tárolt zsákolt termékek stb. Az ezekből készített ételeket kell előnyben részesíteni a szabad földetől származó élelmiszerekkel szemben.

17.3.13. Sugármentesítés (a személyek sugármentesítésén túl)

A már betömött (kiáramlástól mentes) reaktorból korábban kijutott radioaktív anyagok kiülepedését követően mentesíteni kell a sugárzó anyagoktól az atomerőmű területét

és a közeli övezetben az utakat, tereket, házak külső felületét, a zónákban közlekedő gépjárműveket, munkagépeket stb. Össze kell gyűjteni a sugárzó törmelékeket, hulladékot. Az elszennyeződött, feleslegessé vált és nem mentesíthető dolgokat ideiglenesen vagy véglegesen el kell helyezni az erre a célra kiépített tárolókban, izotóptemetőkben.

17.3.14. A következmények felszámolása (utómunkálatok)

A katasztrófa sújtotta atomerőműben és a közeli övezetekben a feladatok egész sorát kell elvégezni. Ezekkel az utómunkálatokkal az eredetihez közeli veszélytelen állapotokat kell kialakítani.

17.4. Következményelemzési modellek

Egy üzemzavari, baleseti helyzetre való felkészülést messzemenően segítik azok a modern, környezeti és baleseti paramétereket felhasználó modellek és szoftverek, amelyekkel elő lehet állítani egy adott szituációt, és arra el lehet készíteni a baleset-elhárításhoz szükséges erő-, eszköz- és időszámvetést, le lehet lépcsőzni a feladatokat, illetve részleteiben ki lehet dolgozni szervezési intézkedéseket és a tervezési és végrehajtási útmutatókat. Valójában ez az alapvető funkciója e szoftvereknek, hiszen az esemény bekövetkeztekor már csak a monitoringrendszer, a felderítés által bejövő adatok fogják képezni a tevékenység alapjait. Néhány, a tervezéshez alkalmazott szimulációs szoftver vázlatos leírása az alábbiakban látható. Előnyük e rendszereknek, hogy az objektumra vonatkozó forrástag és meteorológiai paramétereket bemenő adatként kezelik, ellenben a domborzat, beépítettség, növényzet, vagyis a terep érdességi paramétereit nem tudják kezelni. A továbblépéshez szükséges kutatásokat már végeztek *Computed Fluid Dynamics* (CFD-) szoftver és digitális térképi adatbázis, valamint digitális domborzati modell alkalmazásával. (CSURGAI et al. 2005) Ugyanezen szoftver futtatásával és szélszatorna-kísérletekkel kialakították a terep érdeségét szimuláló kódokat, amelyek alkalmazása az anyagok terjedésének valósághű szimulációját teszik lehetővé. (CSURGAI et al. 2006)

17.4.1. Simulator of Interactive Modelling of Environmental Consequences of Nuclear Accidents – SINAC (Országos Atomenergia Hivatal [OAH]; BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság [OKF])

A Simulator of Interactive Modelling of Environmental Consequences of Nuclear Accidents, azaz a SINAC (*Az Országos Nukleárisbaleset-elhárítási Rendszer...* 2008) az atomerőművi balesetek környezeti hatásait elemző interaktív szakértői rendszer, környezeti szimulátor, a környezetbe került radioaktív anyagok terjedését, kiülepedését, a kialakuló dózisosokat, a várható egészségi hatásokat számolja, és óvintézkedési javaslatokat ad a veszélyhelyzet korai fázisában. Különböző szcenáriók futtatásával elemezni lehet a sürgős óvintézkedések bevezetésének hatásait.

A SINAC-szoftver működéséhez szükséges input adatokat az OAH BESZ (Országos Atomenergia Hivatal Baleset-elhárítási Szervezet) Nukleáris Csoportja, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) szolgáltatja. (*ALADIN* s. a.)

A baleseti helyzettől függően a programnak két változata használható. A polárkoordinátás változat használatával az esetleges paksi kibocsátásokat követhetjük, a koordináta-rendszer középpontja a Paksi Atomerőmű. A Descartes-koordinátás változatban a paksi kibocsátások mellett figyelembe vehetjük a hazánkhoz legközelebb eső három atomerőmű kibocsátását is (Mochovce [Mohi], Bohunice [Apátszentmihály], Szlovákia; Krško, Szlovénia), valamint a Budapesti Kutatóreaktort is.

Európai veszélyhelyzet magyarországi hatásait is vizsgálhatjuk, ehhez az OMSZ adatokat biztosít a kibocsátás helye és a magyar határ közötti területre, és amennyiben a kibocsátott radioaktív anyagok érintik Magyarországot, a SINAC-program prognózist és óvintézkedési javaslatokat ad a radioaktív csóva által érintett magyarországi területekre.

A program óránként követi a radioaktív csóva útját, viszont lehet választani 6 órás és 24 órás automatikus futtatási módokat is, ilyen esetekben mindig szükséges a vonatkozó időszakra a megfelelő meteorológiai előrejelzés biztosítása.

17.4.2. Real-time, On-line, DecisiOn Support System – RODOS (BM OKF)

A RODOS (Real-time, On-line, DecisiOn Support System) (*A nukleáris balesetek esetén...* 2011) egy európai uniós támogatottságú, valós idejű, online döntéstámogató rendszer a létesítményen kívüli nukleáris balesetek hatásbecsléséhez, helyzetelemzéshez és a szükséges intézkedések szakmai megalapozásához.

A RODOS rendszer négy szinten képes döntéshozatali támogatást nyújtani:

- 0. szint: radiológiai adatok gyűjtése, ellenőrzése és megjelenítése közvetlenül vagy minimális feldolgozással, geográfiai és demográfiai információkkal együtt;
- 1. szint: a jelenlegi és jövőbeni radiológiai helyzet elemzése és előrejelzése (térbeli és időbeli eloszlás) a forrástagra, monitorozási és meteorológiai adatokra, illetve modellekre alapozva;
- 2. szint: a lehetséges beavatkozások szimulációja (például elzárkóztatás, kimenekítés, jódprofilaxis, élelmiszer-felhasználás korlátozása, áttelepítés, mentesítés), megvalósíthatóságuk vizsgálata, előnyeik és hátrányaik számszerűsítése;
- 3. szint: alternatív beavatkozási stratégiák elemzése és rangsorolása előnyeik és hátrányaik alapján (például költség, elkerülhető dózis, stressz, társadalmi és politikai elfogadás), figyelembe véve a döntéshozók preferenciáit is.

17.4.3. TREX

A TREX (*A nukleáris balesetek esetén...* 2011) 2009-ben a Paksi Atomerőmű megrendelésére elkészült olyan szoftver, amely háromdimenziós Lagrange típusú terjedési modellre épül, és amely alkalmas különböző szennyező anyagok terjedésének a leírására. A szoftver baleseti módban egy részletes 3D Lagrange típusú részecskemodellt használ, amely alkalmas gyorsan és pontosan előre jelezni a légszennyezési és dózisszinteket lokális skálán.

A kifejlesztett szoftver nagy pontossággal végzi el 30 km-es távolságig a légköri diszperzió modellezését, és a modellrendszert úgy fejlesztették ki, hogy képes a PA Zrt. meteorológiai mérőtornya több szintjén mért adatokat, illetve az Országos Meteorológiai Szolgálat előrejelzési meteorológiai mezőit is használni. (*ALADIN* s. a.)

A szoftver az erőmű SCADA rendszeréből automatikusan szerzi be a tízperces kibocsátási, meteorológiai és technológiai paramétereket. Dedikált ftp-kapcsolaton keresztül szintén automatikusan frissülnek az Országos Meteorológiai Szolgáltatól beszerzett ALADIN/HU meteorológiai előrejelzési fájlok. Minden tízperces kibocsátási, meteorológiai, technológiai, illetve ALADIN/HU fájl előhívható a szoftver archív adatbázisából, így tetszőleges időpontra újra elvégezhetők a számítások.

A modell egy 70×70 km kiterjedésű területre végzi a számításokat, amelynek közepén helyezkedik el a Paksi Atomerőmű. A vonatkoztatási rendszerünk a vizsgált terület közép-pontjában, azaz az erőmű két ikerkérménye közötti pontban érvényes lokális keleti (x) irány, északi (y) irány és függőleges (z) irány. Mivel a vizsgált terület relatívan kicsi, ezért a Föld görbületétől eltekintünk. Azokat az anyagokat is nyomon követjük, amelyek kikerültek a lokális 30 km-es sugarú tartományból, mivel ezek a későbbiekben a meteorológiai helyzet megváltozásával visszakerülhetnek a vizsgált területre. Baleseti kibocsátás szimulációjakor egy futtatás során a radionuklidok terjedésének hat óráját szimuláljuk alapértelmezésben, de lehetőség van egyedi szimulációt végezni más időtartományban, a modell képes akár 5 napot is szimulálni változtatható időlépéssel.

17.5. Végző

A nukleáris biztonság és a nukleárisbaleset-elhárítás egymással szorosan összefüggő fogalmak, hiszen az egyik egyfajta megelőzési, a másik pedig egyfajta védekezési jelleget takar a nukleáris létesítmények szempontjából. Hogyan kerül a képbe az éghajlatváltozás mint egy olyan tényező, amely teljesen idegen az előző két fogalomhoz képest? Soroljuk: egyrészt az éghajlatváltozás együtt jár a csapadékeloszlás módosulásával. Botorság lenne azt hinni, hogy ez a korábbinál kedvezőbb tendenciát jelent. Elsősorban arra kell számítani, hogy nem, ami a Duna szezonális vízszintingadozásának növekményével jár. (PADÁNYI–FÖLDI 2016) Itt valószínűleg nem is az esetlegesen magasabb vízszint fogja jelenteni a problémát (habár az árvíz önmagában is nagy természeti csapás), hanem az anomálishan alacsony vízállás, amely az atomerőművek külső vízellátása szempontjából kritikus tényező.

A nukleárisbaleset-elhárítás szempontjából sem közömbösek azok a hatások, amelyeket esetleges időjárási szélsőségek okozhatnak: egy esetleges kibocsátás paramétereit módosíthatják, a szennyezett felhőből történő kiülepedés volumenét kimosódással növelhetik, a talajon létrejövő belvizek a kihullott szennyeződések viselkedését, terjedését befolyásolhatják, és persze nem utolsósorban a védekezésben részt vevő élőerő pszichés és fizikai állapotát is negatívan befolyásolhatják.

Felhasznált irodalom

- ALADIN: Numerical Weather Prediction Project.* (s. a.) Elérhető: www.umr-cnrm.fr/aladin-old/ (A letöltés ideje: 2017. 12. 16.)
- A nukleáris balesetek esetén hazánkban használt légköri terjedés- és dózisszámító szoftverek összehasonlítása.* (2011) (Tanulmány) Budapest, SOMOS Alapítvány.
- Atomerőművek biztonsága.* A Paksi Atomerőmű honlapja. Elérhető: www.atomeromu.hu/hu/Documents/Biztonsag.pdf (A letöltés dátuma: 2017. 11. 15.)
- Az Országos Nukleárisbaleset-elhárítási Rendszer (ONER) döntéstámogató és értékelő rendszereinek műszaki megújítása.* (2008) (Tanulmány) Budapest, SOMOS Alapítvány.
- CSURGAI, J. – ZELENÁK, J. – LAJOS, T. – GORICSÁN, I. – HALÁSZ, L. – VINCZE, Á. – SOLYMOI, J. (2006): Numerical simulation of transmission of NBC materials. *Academic and Applied Research in Military Science*, Vol. 5, No. 3. 417–434.
- CSURGAI J. – GORICSÁN I. – ÁCS B. – CSÓK L. – HALÁSZ L. – LAJOS T. – PINTÉR I. – SOLYMOI J. – VINCZE Á. – ZELENÁK J. (2005): ABV-anyagok terjedésének numerikus, számítógépes szimulációja. *Haditechnika*, 39. évf. 1. sz. 13–19.
- Országos Nukleárisbaleset-elhárítási Rendszer.* (é. n.) Elérhető: www.katasztrofavedelem.hu/index2.php?pageid=nuklearis_oner (A letöltés dátuma: 2017. 12. 18.)
- PADÁNYI J. (2015): Vízkonfliktusok. *Hadtudomány*, 25. évf. Elektronikus különszám. 272–284.
- PADÁNYI, J. – FÖLDI, L. (2016): Security Research in the Field of Climate Change. In NÁDAI, L. – PADÁNYI, J. eds.: *Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary*. Zürich, Springer International Publishing. 79–90. (Topics in Intelligent Engineering and Informatics, 12.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-28091-2_7