

## Védőintézkedések hatásának elemzése dinamikus rekeszmodellel légköri jódkibocsátás esetére

Madaras Attila \*

MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet  
1525 Budapest, Pf. 49.

### Abstract

*This paper is concerned with the determination of the optimal response in case of an accidental radionuclide emission to the environment respecting the countermeasures of radiation protection. By means of a locally developed self-made computer code we studied the radiation consequences of human incorporation of iodine-131 with modeling a terrestrial food chain in case of an atmospheric emission if any countermeasure or no action is ordered.*

*Keywords: countermeasures, dynamic compartment model, food chain, iodine, accidental atmospheric release*

### Kivonat

*Ebben a cikkben körüljárjuk azt a problémát, amit az üzemzavari vagy baleseti radioaktív környezeti kibocsátással járó eseményekre való helyes reakció, a megfelelő sugárvédelmi intézkedések meghatározása jelent. Egy saját készítésű szoftverrel azt vizsgáltuk, hogy egy légköri jód-131 kibocsátást követően milyen dózist okozhat egy vizsgált személynek a táplálékláncon keresztül hozzá eljutó aktivitás, valamint, hogy milyen elkerülhető dózist lehet elérni az adott esetben különböző védőintézkedések, ill. azok kombinációinak bevezetésével.*

*Kulcsszavak: dinamikus rekeszmodell, jód, tápláléklánc, védőintézkedés, üzemzavari légköri kibocsátás*

## I. BEVEZETÉS

A nukleáris alkalmazások eddigi története során többször előfordult, hogy nem tervezett módon, üzemzavari szituációban, légköri kibocsátás következtében jelentős mennyiségű radionuklid került a környezetbe. Egy ilyen esemény után felmerül, hogy vajon szükséges-e az adott területen valamilyen védőintézkedést bevezetni annak érdekében, hogy a kikerült szennyezők jelentette lakossági kockázatot mérsékeljék.

Segítséget tud nyújtani egy ilyen döntés meghozatalában a környezeti mérések elvégzése mellett azoknak a modelleknek az alkalmazása, amelyek képesek a kibocsátási forrástagság és a környezeti paraméterek ismeretében az embereket érintő kockázat becslésére. Erre a célra léteznek komplex döntéstámogató rendszerek (pl. RODOS), amelyek szennyezésterjedést számító modellek segítségével meg tudják adni az emberi populáció egy vizsgálandó csoportjának dóziszárulékait, majd ez alapján javaslatot tudnak tenni arra, hogy milyen védőintézkedések bevezetésével lehet az optimális elkerülhető dózist elérni.

Ezek a szoftverek sokféle folyamatot figyelembe tudnak venni a számítás során, felépítésük ennek megfelelően igen összetett, és sok számítási paraméter megadását igénylik. Amennyiben egy feladat megoldásánál nincs szükség ilyenfajta komplex problémakezelésre, hanem egyszerűbb kvalitatív elemzést szeretnénk végrehajtani, akkor érdemes egy kisebb léptékű, de könnyebben használható és alakítható szoftvert alkalmazni, amelynek egyszerűbb, flexibilis felépítése lehetővé teszi a vizsgálandó probléma könnyebb körüljárását.

### *Szimulációs program dinamikus rekeszmodellel*

Az előzőekben említett céllal készült el egy olyan program, amely ugyan a szennyezésterjedési folyamatokat csak jelentős egyszerűsítésekkel tudja kezelni, és ezért

---

\* [madaras@aeki.kfki.hu](mailto:madaras@aeki.kfki.hu)

az eredmények is közelítő jellegűek, de általános megfogalmazásának köszönhetően a mindenkor aktuális feladat igényeinek megfelelően átalakítható, és így mind a bemeneti, mind a kimeneti adatok fajtájának meghatározása terén, mind a működési folyamatok beállítása terén nagy szabadságot biztosít. Jelenlegi verziója olyan modellszámításokra alkalmas, melyek eredményei kvalitatív szempontból értékelhetők.

A program a környezeti rendszer időbeli viselkedését rekeszmodellel írja le, az egyes rekeszek egy-egy környezeti elemnek (pl. talaj, fű) feleltethetők meg. Az egyes elemeket homogénnek tekintjük és aktivitáskoncentrációval jellemezzük. A rekeszeket összekötő csatornákhöz transzfer együtthatókat rendelünk, amelyek meghatározzák a csatornákon keresztül egységnyi idő alatt átáramló aktivitás mennyiségét. A rendszer dinamikai működését csatolt lineáris differenciálegyenlet-rendszer írja le, melynek megoldása numerikusan, negyedrendű Runge-Kutta eljárással történik. A rekeszek forrástagjai és összekötő transzfer együtthatói időben tetszőleges diszkrét változással bírhatnak, ezek megadása és a kezdeti értékek rögzítése a modellezett rendszert egyértelműen definiálja.

#### *A modellszámítások célja és a cél elérésének eszközei*

Ebben a cikkben az ismertetett számítások a jelenleg kifejlesztett programmal készültek. A konkrét alkalmazásban egy egyszerű tápláléklánc működését szimuláljuk, ahol az élelmiszerekbe bejutó  $^{131}\text{I}$  a táplálékok emberi elfogyasztásával többletdózist eredményez a vizsgált személynek. A modellszámítás egyik célkitűzése annak meghatározása volt, hogy a dózis hogyan oszlik el a különböző beviteli források között, a másik cél a dózis csökkentésére irányuló védőintézkedések hatásának vizsgálata volt.

A számítási végeredményként kapott dózis meghatározása dóziskonverziós tényező (DCF) felhasználásával történik. A számítás során kigyűjtjük az emberi szervezetbe élelmiszerral bevitt jódkoncentráció összességét, majd ezt megszorozzuk a megfelelő DCF értékkel. Így az eredményként kapott dózis a jódkoncentrációban való tartózkodása alatt okozott teljes effektív dózist adja meg.

A védőintézkedések szimulálására az ad lehetőséget, hogy a rekeszek közötti kapcsolatok jellemzői időben változtathatók, és így megfelelő időfüggést adva a használt transzfer együtthatóknak a rendszer egyes folyamatait kizárhatjuk a számításból. Az intézkedések fajtájától és bevezetésének időpontjától függően különböző mértékű elkerülhető dózist lehet elérni. A programmal kapott eredményekből fel lehet állítani egy rangsort, amellyel minősíteni lehet az egyes forgatókönyveket az emberre gyakorolt káros hatás szempontjából az elkerülhető dózis alapján. Egy ilyen sorrend egy valós esetben segítheti a döntéshozókat a különböző intézkedések kockázatainak mérlegelésében.

## II. A MODELLEZETT KÖRNYEZETI RENDSZER TULAJDONSÁGAI

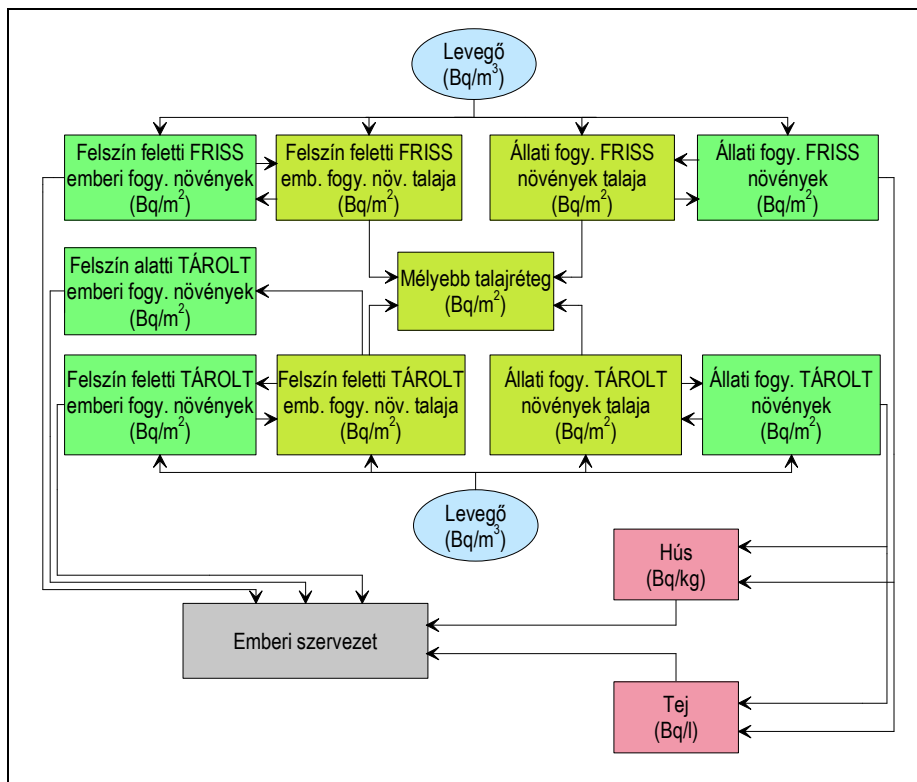
A szimulált forgatókönyvekben a levegő aktivitáskoncentrációja egy adott görbe szerint alakul homogén térbeli eloszlásban egy olyan terület fölött, amely mezőgazdasági felhasználás alatt áll és korábban nem volt szennyezve. A megtermelt növényeket, valamint a helyben tenyésztett állatok termékeit a területen élő lakosok fogyasztják el.

A felépített rendszer alapja az ICRP 29. kiadványban [1] ismertetett tápláléklánc, a számításokhoz szükséges paraméterkészlet is ebből a forrásból származik. Ezek a paraméterek nem rendelkeznek hozzá egységesen valamilyen meghatározott természeti vagy kulturális környezethez vagy meteorológiai viszonyhoz, hanem több, a témában megjelent publikáció eredményeiből összesített átlagos értékek. A tápláléklánc 12 rekeszből épül fel (1. ábra).

A növényzet öt csoportra van osztva. Emberi fogyasztású növényekből szerepelnek a modellben felszín felett vagy a felszín alatt termők, előbbiből két fajta van aszerint, hogy

frissen vagy késleltetve kerül-e fogyasztásra. Az állatoknak szánt növények csak felszín felett termők lehetnek, két fajtája szerepel, egyik a frissen fogyasztott, másik takarmányozott növény. Részletesebb fajonkénti felosztást vagy különböző termési és betakarítási ciklusokkal jellemezhető csoportokat nem tartalmaz a használt modellkép. A talaj két rétegben van modellezve, felső termőtalaj, ill. az elszivárgást jelentő mélyebb talajrétegek formájában. A szennyezésnek kitett területen tenyésztett állatok tej és hús termékek előállítására használják. Ahogyan a növényeknél, az állatok esetében sem teszünk különbséget az egyes fajok különböző jellemzőiben. Minden állat ugyanolyan táplálékszerkezettel jellemezhető, az összes olyan faj, amelyet a húzáért tenyésztének egy rekeszbe kerül, ugyanígy a tejet adó haszonállatokat is összevonjuk.

1. ábra. A modellezett tápláléklánc rekeszrendszere



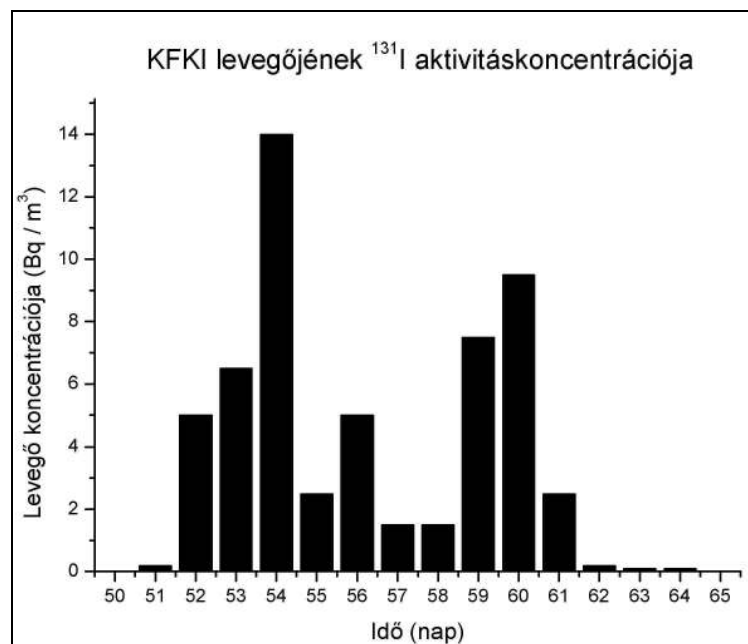
Az emberi dózisterhelést az adott esetben a növényi és az állati termékek fogyasztása során szervezetbe kerülő jód okozza. A vízfogyasztással és beléggzéssel történő bevitelt, a termékek feldolgozási folyamatainak hatását, valamint a külső források (pl. felhő, kiülepedés) okozta dóziseket nem vesszük figyelembe a modellben.

A modellezett környezeti rendszerben minden paraméterre térbeli homogenitást feltételezünk. Az időbeli, szezonális változásokat is csupán két időintervallumban vesszük figyelembe. Az egyik intervallum az ún. növekedési szezon, amelyben a növények a környezettel állandó, kétirányú kapcsolatban vannak. A 120 nap hosszú növekedési periódus után azok a paraméterek, amelyek a növények tápanyagfelszívását és a lemosódást jellemezték lépcsőfüggvényszerűen nullára csökkennek, ettől kezdve a növényi rekeszek csupán tárolóként funkcionálnak. A frissen fogyasztásra kerülő növényeket a 120 nap alatt folyamatosan mind az emberek, mind a haszonállatok fogyasztják, a késleltetett fogyasztású növényeket kizárólag a növekedési szezont követő időszakban használják fel.

### III. AZ ELVÉGZETT SZIMULÁCIÓK

A forrástagként használt mérési eredmények (a KFKI levegőjének összes  $^{131}\text{I}$  aktivitáskonzentrációja) naponkénti felosztással állnak rendelkezésre oszlopdiagramos formában az 1986. április 29 – május 12 közötti időintervallumra a [2] beszámolóban, ezekből nagyságrendileg valós forrástagot lehet megadni a program számára (2. ábra). Ezt a forrástagot a növekedési szezon 51. napjától a 64. napjáig kapcsoljuk a rendszerre, a többi napon nincs aktivitás a levegőben. Mindegyik szimuláció a növekedési szezon elejétől kezdve 365 napot követ végig. A szennyezett élelmiszert elfogyasztó személy egy átlagos fogyasztási paraméterekkel jellemezhető felnőtt. A dózisszámításhoz használt dóziskonverziós tényező [3] a 17 évnél idősebb embereket lefedő korcsoportra vonatkozik.

2. ábra. A szimulációkhoz használt forrástag



#### Védőintézkedés nélküli eset

Az első futtatás során olyan forgatókönyvet használtunk (1. forgatókönyv), amelyben semmilyen védőintézkedést nem vezetnek be. Ezáltal megkaphatjuk, hogy mennyi az a maximális dózis, amit az adott forrástag okozni tud a vizsgált személynek, valamint kiindulási alapot nyújt ahhoz, hogy megmondjuk, mely védőintézkedések hatását lenne érdemes kipróbálni az elkerülhető dózisos vizsgálatához. Az eredményként kapott dóziszárulékok beviteli forrásokra lebontva (egy értékes jegyre kerekítve) az 1. táblázatban szerepelnek.

1. táblázat. Védőintézkedések nélküli dóziszárulékok

Beviteli forrás	Effektív dózis (Sv)
Tej	6E-04
Hús	1E-04
Friss felszín feletti növények	3E-05
Tárolt felszín alatti növények	5E-11
Tárolt felszín feletti növények	3E-11
Összesen	7E-04

A várakozásoknak megfelelően a rendszerben szereplő beviteli források közül a tej adja a legnagyobb dóziszjárulékot, ezzel azonos nagyságrendű járulékot még a hús bevitele okoz. Ebből látható, hogy amennyiben védőintézkedések bevezetését kell elrendelni, akkor az állati hús és tej alapú termékek révén bevitt aktivitásmennyiséget érdemes elsőnek csökkenteni. A táblázat alján szereplő tárolt növények járulécai 6-7 nagyságrenddel elmaradnak a többi beviteli forráséhoz képest, aminek oka, hogy a levegő aktivitáskoncentrációja már a növekedési szezon 65. napja után nullára csökken, és így mire a 120. napot követően a tárolt növények fogyasztásra kerülnek, már lebomlik bennük a jód.

Az 1. táblázatban található értékek azt is megmondják, hogy ha az egyes beviteli forrásokat teljesen kiküszöbölnénk, akkor milyen mértékű dózist lehetne elkerülni. Ettől függetlenül a következőkben ismertetésre kerülő védőintézkedési hatásvizsgálatok nem értelmetlenek, mert azzal, hogy különböző időpillanatokban bevezetve is szimuláljuk az intézkedéseket, a fenti maximálisan elkerülhető dózisértékekhez képest árnyaltabb képet kapunk a védőintézkedések hatásáról.

#### *A védőintézkedések hatásai*

Az aktivitás bevitelét korlátozó intézkedéseket minden esetben három különböző időpontban bevezetve vizsgáltuk. A három időpontot úgy választottuk meg, hogy a levegő aktivitáskoncentrációjának időbeli alakulásában látható két csúcsérték közül vagy egyik se, vagy csak az egyik, vagy mindkettő beleessen az intézkedésekkel kivédett tartományba. Ennek megfelelően a modellezett forgatókönyvekben az intézkedéseket a légszennyezés észlelésétől számított 3., a 6., valamint a 12. napot követően foganatosítják (vagyis a növekedési szezon 54., 57. és 63. napjától). A különböző védőintézkedéseket és kombinációikat a 2. táblázat tartalmazza. Mivel a tárolt növények összes járuléka 6-7 nagyságrenddel kisebb, mint a többi járulék, nem vizsgáltunk olyan forgatókönyvet, amelyben ezekre a növényekre vonatkozó megszorításokat vezetnék be, mert az így nyerhető elkerülhető dózis elhanyagolható lenne.

2. táblázat. A védőintézkedések forgatókönyvei

<b>Forgatókönyv</b>	
<b>Sorszám</b>	<b>Jellemzői</b>
1	Védőintézkedés nélkül
2	Az állati termékek (hús, tej) fogyasztásának tiltása
3	Az állatok frissnövényfogyasztásának tiltása
4	Az emberek frissnövényfogyasztásának tiltása
5	Az állatok és az emberek frissnövényfogyasztásának tiltása
6	A tej, a hús és a friss növény emberi fogyasztásának tiltása
7	A tejfogyasztás tiltása
8	A húsfogyasztás tiltása

Minden esetben az 1 sorszámú alapeset teljes dóziséhez viszonyítottuk a kapott eredményt. Az egyes forgatókönyvekhez tartozó elkerülhető dózisosok a 3. táblázatban találhatóak (a számértékeket egy értékes jegyre kerekítve adjuk meg).

3. táblázat. A védőintézkedések segítségével elkerülhető dózisok

Forgatókönyv			
Sorszama	Jellemzői	Bevezetés ideje (nap)	Elkerülhető effektív dózis (Sv)
1	Védőintézkedés nélkül	–	0E+00
2_1	Az állati termékek (hús, tej) fogyasztásának tiltása	53-	7E-04
2_2	Az állati termékek (hús, tej) fogyasztásának tiltása	56-	5E-04
2_3	Az állati termékek (hús, tej) fogyasztásának tiltása	62-	3E-04
3_1	Az állatok frissnövényfogy. tiltása	53-	7E-04
3_2	Az állatok frissnövényfogy. tiltása	56-	5E-04
3_3	Az állatok frissnövényfogy. tiltása	62-	2E-04
4_1	Az emberek frissnövényfogy. tiltása	53-	3E-05
4_2	Az emberek frissnövényfogy. tiltása	56-	2E-05
4_3	Az emberek frissnövényfogy. tiltása	62-	9E-06
5_1	Az állatok és az emberek frissnövényfogy. tiltása	53-	7E-04
5_2	Az állatok és az emberek frissnövényfogy. tiltása	56-	5E-04
5_3	Az állatok és az emberek frissnövényfogy. tiltása	62-	2E-04
6_1	A tej, a hús és a friss növény emberi fogy. tiltása	53-	7E-04
6_2	A tej, a hús és a friss növény emberi fogy. tiltása	56-	6E-04
6_3	A tej, a hús és a friss növény emberi fogy. tiltása	62-	3E-04
7_1	A tejfogyasztás tiltása	53-	5E-04
7_2	A tejfogyasztás tiltása	56-	4E-04
7_3	A tejfogyasztás tiltása	62-	2E-04
8_1	A húsfogyasztás tiltása	53-	1E-04
8_2	A húsfogyasztás tiltása	56-	1E-04
8_3	A húsfogyasztás tiltása	62-	9E-05

Látható, hogy azokban az esetekben, amikor intézkedéscsomagról van szó, vagyis több beavatkozás együttes hatását szimuláltuk, az elkerülhető dózis közel megegyezik az egyes intézkedések különálló elkerülhető dózisaik összegével minden beavatkozási időpontra.

A 4. táblázatban az elkerülhető dózis alapján sorrendbe raktuk az egyes forgatókönyveket. Itt csak az önállóan tekinthető beavatkozási lépések eredményei szerepelnek, mert az előzőek alapján tetszőleges kombináció hatása előállítható ezekből. Látható a sorrend alapján, hogy az intézkedések hatásossága szempontjából elsődleges, hogy azok bevezetése minél korábbi időpontban történjen meg. Másodsorban a legnagyobb elkerülhető dózist akkor tudjuk elérni, ha a tejjel bevitt aktivitásmennyiséget korlátozzuk. Ez történhet úgy, hogy az állatokba bejutó jódmennyiséget csökkentjük a frissnövény legelésének tiltásával, vagy úgy, hogy az emberek tejfogyasztását állítjuk le. Ezzel az eredménnyel lényegében visszakaptuk azt a sorrendet, amit a védőintézkedések nélküli eset dózissjárulékai alapján várni lehetett.

4. táblázat. A védőintézkedések összehasonlítása

<b>Forgatókönyv</b>			
<b>Sorszám</b>	<b>Jellemzői</b>	<b>Bevezetés ideje (nap)</b>	<b>Elkerülhető effektív dózis (Sv)</b>
3_1	Az állatok frissnövényfogyasztásának tiltása	53-	7E-04
7_1	A tejfogyasztás tiltása	53-	5E-04
3_2	Az állatok frissnövényfogyasztásának tiltása	56-	5E-04
7_2	A tejfogyasztás tiltása	56-	4E-04
3_3	Az állatok frissnövényfogyasztásának tiltása	62-	2E-04
7_3	A tejfogyasztás tiltása	62-	2E-04
8_1	A húsfogyasztás tiltása	53-	1E-04
8_2	A húsfogyasztás tiltása	56-	1E-04
8_3	A húsfogyasztás tiltása	62-	9E-05
4_1	Az emberek frissnövényfogyasztásának tiltása	53-	3E-05
4_2	Az emberek frissnövényfogyasztásának tiltása	56-	2E-05
4_3	Az emberek frissnövényfogyasztásának tiltása	62-	9E-06

A különböző forgatókönyvekre elvégzett számolásokból azonban többletinformációt is kapunk. Az elkerülhető dózisok fenti, az időbeliséget is figyelembe vevő sorrendje lehetőséget ad arra, hogy ha adott az intézkedés bevezetési időpontja (pl. lehető leggyorsabb reagálás), akkor a számítások eredményéből ismert nyerhető kockázatcsökkentés és a bevezetés nehézségeinek mérlegelése mellett az optimális forgatókönyvet meg lehet választani (az élelmiszereket érintő intézkedések tekintetében). Vagy egy olyan esetben, ahol az intézkedés fajtája van megkötve (pl. gazdasági okokból) meg lehet mondani, hogy milyen gyorsan kell cselekedni egy adott kockázatcsökkentés eléréséhez, és ezt lehet összevetni az adott gyorsaságú beavatkozáshoz szükséges áldozatok mértékével.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Radionuclide Release into the Environment: Assessment of Doses to Man, ICRP Publication 29, Oxford, New York, Frankfurt, 1979, Annals of the ICRP, Volume 2 No. 2
- [2] A Központi Fizikai Kutató Intézet Sugárvédelmi Főosztályának mérései a csernobili atomerőmű balesetének következtében létrejött sugárzási helyzetről (1986. április 28 – június 12), Előzetes beszámoló, szerk. Deme Sándor, Láng Edit, Budapest, 1986
- [3] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiations and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115, Vienna, 1996