



ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM
Bolyai János Katonai Műszaki Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola
Alapítva: 2002. évben – Alapító: Prof. Solymosi József DSc.

RADIOAKTÍV ANYAGOK LÉGKÖRI KIBOCSÁTÁSAINAK ELEMZÉSE

Doktori (Ph. D) értekezés

Készítette: **dr. univ. Sági László**

Tudományos témavezető: **Dr. Vincze Árpád, Ph. D**

Budapest, 2007. április

TARTALOM

1. Bevezetés	5
1.1. A tudományos feladat megfogalmazása	5
1.2. Kutatási célkitűzések	5
1.3. Az értekezés felépítése	6
1.4. Kutatási módszerek	6
1.5. A várható tudományos eredmények és azok felhasználhatósága	7
2. Kibocsátás szabályozás	9
2.1. Az Oktatóreaktor	10
2.1.1. Célkitűzés	10
2.1.2. Alapfeltevések	10
2.1.3. A terjedésszámítás modellje épületközelben	13
2.1.4. Terjedésszámítás modellje távolabbi térrészben	14
2.1.5. Számítási eredmények	14
2.2. A Kutatóreaktor	15
2.2.1. A kritikus lakossági csoport	15
2.2.2. A légköri kibocsátás és terjedés	16
2.2.3. A terjedésszámítási és dózisszámítási modell	16
2.2.4. Meteorológiai adatok	16
2.2.5. Receptorpontok	17
2.2.6. Számítási eredmények	17
2.2.7. Értékelés	18
2.3. Izotóp Intézet Kft.	18
2.3.1. Kiindulási adatok, számítási módszer	18
2.3.2. Számítási eredmények	18
3. A rendkívüli események modellje és adatbázisa	20
3.1. A terjedés- és dózisszámítási modell főbb jellemzői	20
3.2. Légköri terjedési modell	20
3.3. Dózisszámítások védőintézkedés nélkül	20
3.3.1. Külső terhelési útvonalak	21
3.3.2. Belső terhelési útvonalak	21
3.4. Az egészségügyi következmények számítása	21
3.4.1. Korai hatások	21
3.4.2. Késői hatások	22
3.4.3. Kollektív kockázat	23
3.5. Védőintézkedések	23
3.5.1. A védőintézkedés opciói, kritériumai	23
3.5.2. Korai időszak	24
3.5.3. Közbenső és késői időszak	24
3.6. Az ökonómiai hatások becslése	24
3.6.1. Védőintézkedések költségeinek bemenő paraméterei	25
3.6.2. Az egészségügyi költség bemenő paraméterei	26

4.	A tervezési üzemzavarok analízise a Kutatóreaktor és a paksi atomerőmű esetében	27
4.1.	A Kutatóreaktor	27
4.1.1.	<i>A feltételezett üzemzavarok fogalma</i>	27
4.1.2.	<i>Fűtőelem károsodások</i>	27
4.1.3.	<i>Zónaleltár</i>	28
4.1.4.	<i>Épületen belüli terjedésszámítás</i>	28
4.1.5.	<i>Épületközelben számított következmények</i>	29
4.1.6.	<i>Telephelyen kívüli következmények</i>	30
4.1.7.	<i>Értékelés</i>	31
4.2.	Paksi atomerőmű	31
4.2.1.	<i>A tervezési üzemzavarok fogalma</i>	31
4.2.2.	<i>Forrástagok</i>	32
4.2.3.	<i>A determinisztikus analízis kiinduló paraméterei</i>	32
4.2.4.	<i>Következmények becslése</i>	33
5.	A nagy radioaktív kibocsátással járó, súlyos balesetek analízise	36
5.1.	A Kutatóreaktor súlyos balesetének determinisztikus elemzése	36
5.1.1.	<i>A baleseti szcenárió</i>	36
5.1.2.	<i>Kibocsátás számítás</i>	36
5.1.3.	<i>Épületközeli dózisbecslés</i>	37
5.1.4.	<i>Környezeti dózisbecslés</i>	39
5.2.	Paksi atomerőmű (valószínűségi elemzés)	41
5.2.1.	<i>A súlyos baleset</i>	41
5.2.2.	<i>Valószínűségi biztonsági analízis</i>	42
5.2.3.	<i>Forrástagok</i>	42
5.2.4.	<i>Meteorológiai adatgyűjtés</i>	43
5.2.5.	<i>Népességi adatgyűjtés és adatfeltöltés</i>	44
5.2.6.	<i>Mezőgazdasági termelékenységi adatok</i>	45
5.2.7.	<i>Meteorológiai mintavételezés</i>	45
5.2.8.	<i>Feltételes és abszolút valószínűségi eloszlások</i>	46
5.2.9.	<i>Védőintézkedések modellezése</i>	46
5.2.10.	<i>Az eredmények bemutatása a valószínűségi analízis során</i>	47
5.2.11.	<i>A legsúlyosabb esemény analízise különböző mintavételezéssel</i>	47
5.2.12.	<i>A védőintézkedésre vonatkozó megállapítások és a gazdasági hatások becslése</i> ..	55
5.2.13.	<i>Átfogó elemzés</i>	57
5.2.14.	<i>A kritériumok teljesülésének vizsgálata</i>	61
6.	Összegzett következtetések	62
6.1.	A normálüzemi elemzések következtetései	62
6.2.	A következmények analízise tervezési üzemzavarok esetén	62
6.3.	A következmények analízise súlyos balesetek esetén	62
7.	Ajánlások	64
7.1.	Normál üzemre	64
7.2.	Tervezési üzemzavarokra	64
7.3.	Súlyos balesetekre	64
8.	Új tudományos eredmények (tézisek).....	65

9. Hivatkozások, saját publikációk	67
9.1. Hivatkozások	67
9.2. Saját publikációk	70
10. Melléklet. A Kutatóreaktor környezeti kibocsátási modellje és kódrendszere	73
10.1. A környezetbe történő kibocsátás modellje a szellőzés különböző állapotainál	73
10.1.1. Üzemzavari paraméterek	73
10.1.2. Súlyos baleseti paraméterek	79
10.2. A kikerülési modelleket felhasználó kódrendszer	81
11. I. függelék. Forrástag paraméterek.....	82
11.1. Az üzemzavari esetek kiindulási paraméterei.....	82
11.1.1. A Kutatóreaktor	82
11.1.2. A paksi atomerőmű primerköri víz leltára	85
11.1.3. Környezeti kibocsátások.....	86
11.2. Súlyos balesetek kiindulási paraméterei	90
11.2.1. A Paksi atomerőmű zónaleltára.....	90
11.2.2. Névleges teljesítmény baleseti bocsátásai	92
11.2.3. A leállási baleset kibocsátásai.....	96
12. II. függelék. Sugárzási és gazdasági paraméterek.....	97
12.1. Általános cselekvési szintek	97
12.2. Gazdasági paraméterek	97
13. III. függelék. Módszertani összefoglaló	99
14. Köszönetnyilvánítás	101

1. Bevezetés

Nukleáris létesítmények üzemeltetése során kisebb-nagyobb mértékben radioaktív anyagok kerülhetnek ki a környezetbe. Célom volt, hogy megvizsgáljam e légkörbe kibocsátott radioaktív anyagok környezeti hatásait a normál üzemtől kezdve, a tervezési üzemzavarokon keresztül egészen a súlyos baleseti eseményekig. Jelen tanulmányban bemutatom – az általam kidolgozott és a hazai viszonyokra adaptált nemzetközi modellek segítségével végzett elemzéseim eredményeit, bemutatva azokat az Egyetemi Oktatóreaktor (a továbbiakban Oktatóreaktor), a Budapesti Kutatóreaktor (a továbbiakban Kutatóreaktor), illetve a paksi atomerőmű normál üzemére, tervezési üzemzavaraira, valamint a súlyos, az ún. nagy radioaktivitás kibocsátásával járó baleseteire.

Normál üzem esetére vonatkozóan közreműködtem a hazai légköri kibocsátási kritériumok kidolgozásában, majd megvizsgáltam, hogy a hazai nukleáris létesítmények közül az Oktatóreaktor, illetve a Kutatóreaktor hogyan feleltethető meg ezen követelményeknek. A Kutatóreaktor és a paksi atomerőmű feltételezett ún. tervezési üzemzavarainak esetére a dóziskritériummal, a paksi atomerőmű súlyos balesetei esetére pedig a valószínűségi kritériumokkal összevetve mutatom be a környezeti következményeket. Súlyos – nagy radioaktív kibocsátásokat eredményező – baleseti helyzetekre vonatkozóan megvizsgálom a védőintézkedések hatékonyságát. Munkám eredménye egyrészt alkalmazható a hazai nukleáris létesítmények biztonságos üzemeltetése során, valamint a hazai és nemzetközi balesetelhárítási gyakorlatban, másrészt - az "eurokonform" módszerek kidolgozásával és alkalmazásával - az atomreaktorok környezetbiztonságának egyöntetű összevethetőségét is biztosítja térségünkben.

1.1. *A tudományos feladat megfogalmazása*

A hazai nukleáris létesítmények normálüzemi, üzemzavari és súlyos kibocsátásainak esetére vonatkozóan át kell tekinteni a kibocsátásra kerülő radioaktív anyagokat, azokat súlyosságuk alapján, alapos mérlegelés alapján ki kell választani a későbbi elemzésekhez. Amennyiben megfelelő modell nem áll rendelkezésre, ki kell dolgozni egy ún. kibocsátási modellt. Épületközeli terjedés- és dózisszámításokhoz, – tekintve, hogy számítógépi modellek nem állnak rendelkezésre a nemzetközi irodalomban – számításokat kell végezni különböző meteorológiai körülmények esetére és ezeket lehetőség szerint kísérletekkel kell megerősíteni.

A hazai nukleáris létesítmények közeli és távolabbi környezetének, így a hazai lakosság dózisterhelésének becsléséhez szükség van nemzetközi szinten is elfogadott modellek adaptálására és ezek alkalmazására. Fontos feladat a légköri terjedés és ebből származó dózisterhelés modellezése, majd a modellekkel elemzések elvégzése a nukleáris létesítmények különböző (normál, üzemzavari és súlyos baleseti) üzemiállapotainál. A normál üzemiállapotnál elemezni kell a *dózismegszorítás* (a kibocsátási határérték kritérium), az üzemzavari állapotnál a *dóziskritérium*, a súlyos balesetnél pedig az egyéni és társadalmi *kockázati kritériumok* teljesülését. A súlyos baleseti elemzések során vizsgálni kell a sugárzási, egészségügyi, balesetelhárítási és végső soron gazdasági következményeket is.

1.2. *Kutatási célkitűzések*

A normál üzemre vonatkozó kritériumok kidolgozása és ezen kritériumok teljesülésének vizsgálata (Oktatóreaktor, Kutatóreaktor és Izotóp Intézet Kft.).

Az üzemzavari helyzetek kibocsátási modelljének létrehozása és alkalmazásának bemutatása (Kutatóreaktor).

Determinisztikus elemzések. Üzemzavari helyzetekben történő kibocsátásból eredő következmény modelljének teljes körű hazai adaptálása és alkalmazása (Kutatóreaktor és paksi atomerőmű). A becsült sugárzási értékek összevetése a hazai kritériumokkal.

Valószínűségi elemzések. Súlyos baleseti kibocsátások esetén a sugárzási, egészségügyi, balesetelhárítási és gazdasági következmények elemzése. A becsült valószínűségi mutatók nemzetközi kritériumokkal történő összevetése a paksi atomerőműre vonatkozóan.

1.3. Az értekezés felépítése

- A normálüzemi kibocsátások modellezése és elemzések
- A rendkívüli események modellje és adatfeltöltése
- A tervezési üzemzavarok analízise
- A súlyos balesetek analízise
- Összegzett következtetések
- Ajánlások

1.4. Kutatási módszerek

A probléma megoldására az alkalmazott kutatási módszereim több lépésből álltak. Ezen lépések a következők voltak: irodalmazás, adatgyűjtés, nemzetközi együttműködés, modellkészítés, kísérleti munka, elemzés, értékelés és az eredmények bemutatása, elfogadtatása a nemzetközi és a hazai tudományos körökben.

Irodalmazás

A radioaktív anyagok légköri terjedésének modellezése során áttekintettem a hazai és a nemzetközi irodalmat. Megvizsgáltam, hogy a nukleáris létesítmények környezetében a következmények elemzésére milyen modellek állnak rendelkezésre. Ehhez elemeztem a rendelkezésre álló szakmai folyóiratokat, bekapcsolódtam nemzetközi konferenciák munkájába, ezáltal gyarapítva ismereteimet.

Nemzetközi együttműködés

A nemzetközi fejlesztésű terjedési modellek elkészítése során bekapcsolódtam a modellek fejlesztésébe, illetve programok írásába, tesztelésébe majd azok hazai adaptálásába.

Adatgyűjtés

Elemeztem, hogy a környezeti következmények számításához milyen adatokra van szükség és ezek az adatok milyen forrásokból szerezhetők be. A nukleáris létesítmények specifikus adatait az üzemeltetőktől kaptam meg, a környezetre vonatkozó adatokat pedig egyéb forrásokból nyertem ki.

A programok hazai adaptálásához számos (meteorológiai, népességi, termelékenységi) hazai adat begyűjtését végeztem el. Ehhez felhasználtam a létesítmény környezetében rögzített meteorológiai paramétereket, amelyeket a program számára megfelelő formára dolgoztam át. A népességi és a termelési, valamint a fogyasztási adatok begyűjtése és végső formára történő átalakítása hazai, pl. statisztikai kiadványok feldolgozásával történt.

Modellkészítés

Az Európai Unió Bizottsága által létrehozott projekt keretében készült programok létrehozásában, tesztelésében közreműködtem. A kidolgozott modelleket hazai körülményekre adaptáltam, amennyiben nem volt megfelelő modell, akkor matematikai modelleket dolgoztam ki interdiszciplináris módszereket felhasználva.

Kísérleti munka

Tekintve a probléma összetettségét, valamint a helyi specialitásokat az épületközeleli terjedés- és dózisszámításra nem álltak rendelkezésre számítógépi programok. Ugyanakkor általános irányelvek a szakirodalomban léteznek, melyek alkalmazhatóságát szélsatorna kísérletekkel pontosítottam.

Elemzés

Hazai intézetekkel együttműködve számos kiindulási paraméter (forrástag, kibocsátási paraméterek, valószínűségek, scenáriók stb.) és hazai (meteorológiai, népességi, gazdasági stb.) adat ismeretében a kidolgozott modellekkkel, illetve hazai körülményekre adaptált kódokkal elvégeztem a környezeti következmények elemzését. Az elemzések eredményét – a reprodukálhatóság érdekében – a kiindulási adatokkal együtt archiváltam.

Értékelés

Az elemzések eredményeit tanulmányokban foglaltam össze, a környezeti következményeket összevettem a hazai előírásokkal, illetve a nemzetközi ajánlásokkal.

Publikálás

Az eredményeket hazai és nemzetközi folyóiratokban közöltem és nemzetközi konferenciákon mutattam be.

1.5. A várható tudományos eredmények és azok felhasználhatósága

A kidolgozott és megfogalmazott normálüzemi dózis- és kibocsátási kritériumok – nemzetközi egyeztetést [1] és tárcaközi egyeztetést követően – bekerültek a hazai szabályozásba [2]. A szabályozást figyelembe véve elkészültek a hazai nukleáris létesítmények kibocsátási korlátaira vonatkozó tanulmányaim [3-5].

A Kutatóreaktorra végzett elemzések a Budapesti Kutatóreaktor Végleges Biztonsági Jelentésének részét képezik [6]. A környezeti elemzések eredményei a hatóság (Országos Atomenergia Hivatal, OAH) által elfogadott balesetelhárítási tervének eljárásrendjében szerepelnek [7]. Az épületközeleli számítások és az ezt megerősítő kísérletek eredményei hazai folyóiratban [8] és nemzetközi nukleáris balesetelhárítási konferenciákon kerültek bemutatásra [9].

A paksi atomerőmű tervezési üzemzavarainak vizsgálataihoz készült első elemzéseim az AGNES (Advanced General and New Evaluation Safety) projekt [10] tanulmányaiban szerepelnek [11-17]. Az AGNES projekthez szükséges kifolyási adatok a Villamosipari Kutatóintézet (VEIKI) számításain alapulnak [18].

A determinisztikus analíziseim legújabb eredményei [19] a paksi atomerőmű jelenleg érvényes Végleges Biztonsági Jelentésében [20] szerepelnek. A súlyos balesetre vonatkozó – nagy radioaktív kibocsátásokkal járó - elemzéseimmel kapcsolatos eredményeim hozzájárultak a paksi atomerőmű biztonságának értékeléséhez [21]. Az elemzésekben alkalmazott számítógépi kódok [22] a

magyarországi adatbázissal feltöltve alkalmassá váltak a determinisztikus és a valószínűségi analízisek elvégzésére. A kódok folyamatos fejlesztésének köszönhetően azok bemutatásra és egyre inkább alkalmazásra kerülnek számos országban [23].

A valószínűségi biztonsági analízis eredményeimet hazai [24] és nemzetközi fórumokon [25-30] ismertettem.

A valószínűségi analízis eredmények – a súlyos baleseti analízisek eredményei – a közeljövőben elkészülő Országos Balesetelhárítási és Intézkedési Terv (OBEIT) egyik alapját képezik és bekerülnek az elhárítás során alkalmazásra kerülő nemzetközi RODOS [31] program adatbázisába.

2. Kibocsátás szabályozás

2000 novemberében a Környezetvédelmi Minisztérium megbízásából azt a feladatot kaptam, hogy vegyek részt az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről szóló rendelet tudományos megalapozását végző munkacsoportjának szakmai irányításában. A rendelet 2001. év júniusában jelent meg, amelyben javaslataim alapján meghatározódtak a tervezett kibocsátási szintekre vonatkozó irányelvek az egyes kibocsátási módokra, radionuklidokra, illetve radionuklid csoportokra. Ezzel párhuzamosan kerültek kidolgozásra a radioaktív kibocsátásokkal és a környezet ellenőrzésével kapcsolatos követelmények is. A rendelet értelmében a kiemelt létesítményeknél a származtatást úgy kell elvégezni, hogy a kibocsátási határérték betartása, illetve a kibocsátási határérték kritérium teljesülése esetén a lakosság éves sugárterhelése ne haladja meg az adott létesítményre vonatkozó dózismegszorítást. Az Európai Unió jogrendszerével történő harmonizáció megvalósulásaként irányelvként szerepelt, hogy az egységnyi kibocsátás dóziszjárulékát nemzetközileg elfogadott modellek segítségével kell meghatározni, a felhasznált paraméterek értékeit reális közelítéssel kell megállapítani. A rendeletben megtörtént a kibocsátási határérték kritérium megfogalmazása. Egyéb nem kiemelt létesítmények esetén kidolgozásra kerültek a légnemű és folyékony kibocsátások nuklidspecifikus határértékei, melyek a lakosság vonatkoztatási csoportjának – ötszörös biztonsági tényező esetén – 30 μSv éves effektív dózist eredményezné. Kiemelt létesítmények esetén ezen értéket az Országos Tisztifőorvosi Hivatal határozza meg, ebből a dózismegszorításból kiindulva kell származtatni az éves kibocsátási határértéket. Az egyes kiemelt – a tanulmányban szereplő – nukleáris létesítményeknél ezen dózismegszorítások valamennyi (a légnemű és folyékony) kibocsátási útvonalra a következőképpen alakulnak:

- BME Oktatóreaktor : 50 $\mu\text{Sv}/\text{év}$
- Budapest Kutatóreaktor : 50 $\mu\text{Sv}/\text{év}$
- Izotópkutató Intézet Kft: 50 $\mu\text{Sv}/\text{év}$

A következő fejezetben a három kiemelt létesítmény légnemű kibocsátási határértékeinek számításait mutatom be. A hivatkozott tanulmányokban a folyékony kibocsátás határértékeit is kiszámoltam, azonban ez a disszertáció adott keretei miatt a jelen tanulmányban nem kerül kifejtésre. Nemzetközi modellek alkalmazásával – bizonyos kritikus radionuklidokra vonatkozóan (Cs és I izotópok esetén) – részt vettem a paksi atomerőmű egységnyi dóziskonverziós tényezőinek, így közvetetten a létesítmény légnemű kibocsátási határértékeinek kidolgozásában.

Az elemzéseknél a határérték származtatását a következő alapösszefüggés szerint végeztem el:

$$EL_{ij} = \frac{1}{\Gamma} \frac{DL}{DE_{ij}}, \quad (2-1.)$$

ahol:

- EL_{ij} : az i radionuklid, j kibocsátási módra vonatkozó kibocsátási határértéke ($\text{Bq}\cdot\text{év}^{-1}$),
- DL : a tevékenységre vonatkozó dózismegszorítás ($\text{Sv}\cdot\text{év}^{-1}$),
- DE_{ij} : az i radionuklid j kibocsátási módon történő egységnyi kibocsátására eső éves dóziszjáruléka ($\text{Sv}\cdot\text{év}^{-1}/(\text{Bq}\cdot\text{év}^{-1})$),
- Γ : a származtatási folyamat bizonytalanságát figyelembe vevő biztonsági tényező.

A vizsgált létesítmények (Oktatóreaktor, Kutatóreaktor, Izotóp Intézet Kft.) tevékenysége során a következő összefüggés szerinti kibocsátási határérték kritérium (illetve az ún. kivizsgálási határérték kritérium) teljesülését vizsgáltam :

$$\sum_{ij} \frac{R_{ij}}{EL_{ij}} \leq 1, \quad \text{illetve} \quad \sum_{ij} \frac{R_{ij}}{EL_{ij}} \leq 0,3 \quad (2-2.)$$

ahol:

R_{ij} : az i radionuklid j kibocsátási módra vonatkozó éves kibocsátása ($\text{Bq} \cdot \text{év}^{-1}$).

2.1. Az Oktatóreaktor

Az Oktatóreaktor 1971-1980-ig 23 darab, azóta 24 darab szovjet gyártású EK-10-es fűtőelem-szerelvénnyel működik. Az EK-10 anyaga ^{235}U -ra nézve 10%-ban dúsított UO_2 és fém magnézium keveréke, a pálcák és a szerelvények burkolata SAV-1 jelzetű nagytisztaságú alumínium. A tartály is ebből az anyagból van, azonos a Kutatóreaktor korábbi tartályának anyagával. A reaktor könnyűvíz hűtéssel és moderálással, valamint grafit reflektorokkal felszerelt, maximálisan 100 kW hőteljesítménnyel működtethető „uszoda” típusú reaktor. Az épület Budapest XI. kerületében, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem déli területének belső udvarán található. A fűtőelemekben változó számú pálcát helyeztek el, aszerint, hogy hagytak-e ki helyet a 4 darab szabályozó rúdnak (1 kézi szabályozó rúd, 1 automata szabályozó rúd, 2 biztonságvédelmi rúd) A rudak anyaga bórkarbid, kivéve az automata rudat, amely kadmium. A reaktorral elérhető maximális neutronfluxus $2,7 \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$, az urán összes tömege mintegy 29,5 kg.

2.1.1. Célkitűzés

A célkitűzésem volt, hogy a 15/2001. KöM rendelet által előírt származtatott kibocsátási határértékeket meghatározzam a BME Oktatóreaktor tevékenységére vonatkozólag. Az Oktatóreaktor által az ANTSZ OTH felé benyújtott majd jóváhagyott kérelmére a dózismegszorítás $50 \mu\text{Sv}/\text{év}$. A származtatást a rendelet 1. sz. mellékletében foglalt szempontok figyelembevételével végeztem el úgy, hogy a kibocsátási határérték betartása, illetve a kibocsátási határérték kritérium teljesülése esetén a lakosság éves sugárterhelése ne haladja meg a dózismegszorítást. A kibocsátási határértéket minden kibocsátási módra, továbbá minden olyan radionuklidra származtattam, amelyek kibocsátásra kerülhetnek. Az egységnyi kibocsátás dóziszárulékát nemzetközileg elfogadott modellek segítségével határoztam meg. A felhasznált paraméterek értékeit reális közelítéssel állapítottam meg.

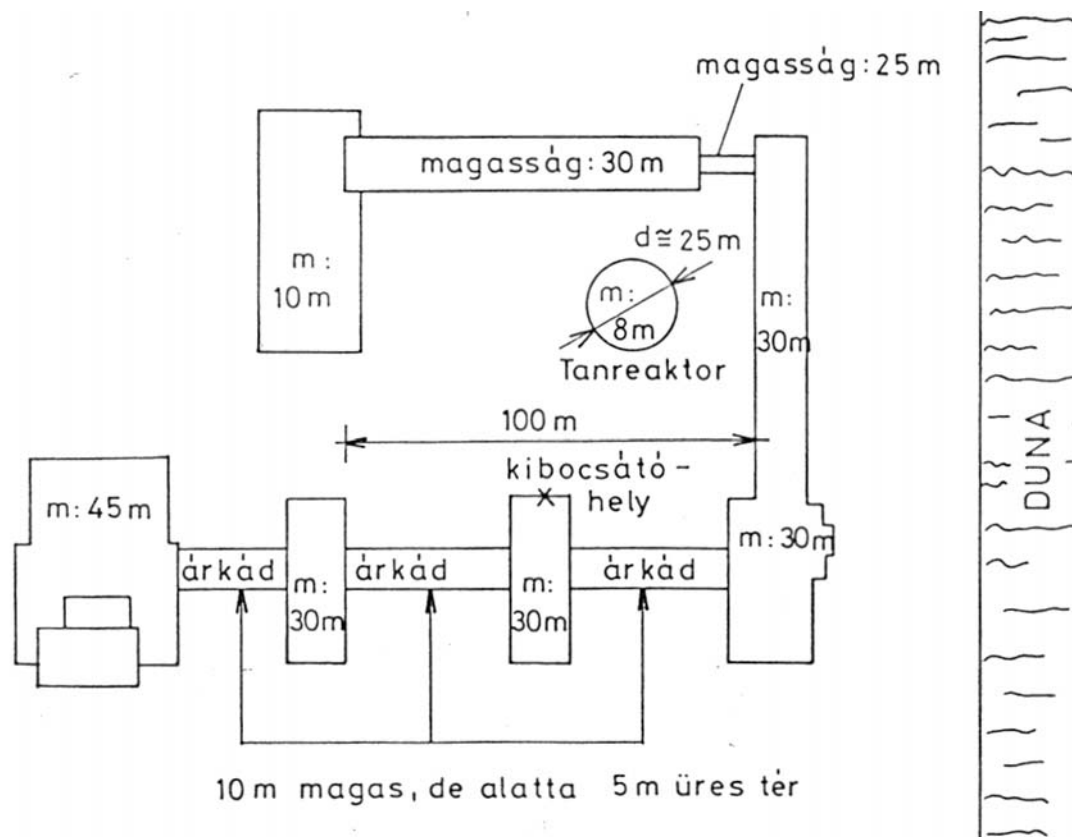
2.1.2. Alapfeltevések

Környezet

Az 2.1.2-1. ábra részletesen mutatja a reaktor környékét a körülvevő épületek közelítőleges magasság adataival együtt, míg a 2.1.2-2. ábrán az Oktatóreaktor tágabb környezete is látszik.

Kibocsátási adatok

A kibocsátási pont a T épület tetején levő kémény. A kémény magassága az épület tetejétől 5 m így a kibocsátási magasság 35 m. A szellőztető levegőben Ar-41 nemesgáz található. A reaktor évente 1000 órát üzemel, amelyből a 100 kW-os üzem 50 óra. Az átlagos légforgalom $1,1\text{E}+04 \text{ m}^3/\text{h}$. Az Ar-41 kibocsátás csak 100 kW-os üzemnél számottevő.



2.1.2-1. ábra. Az Oktatóreaktor körülvevő épületegyüttes [32]

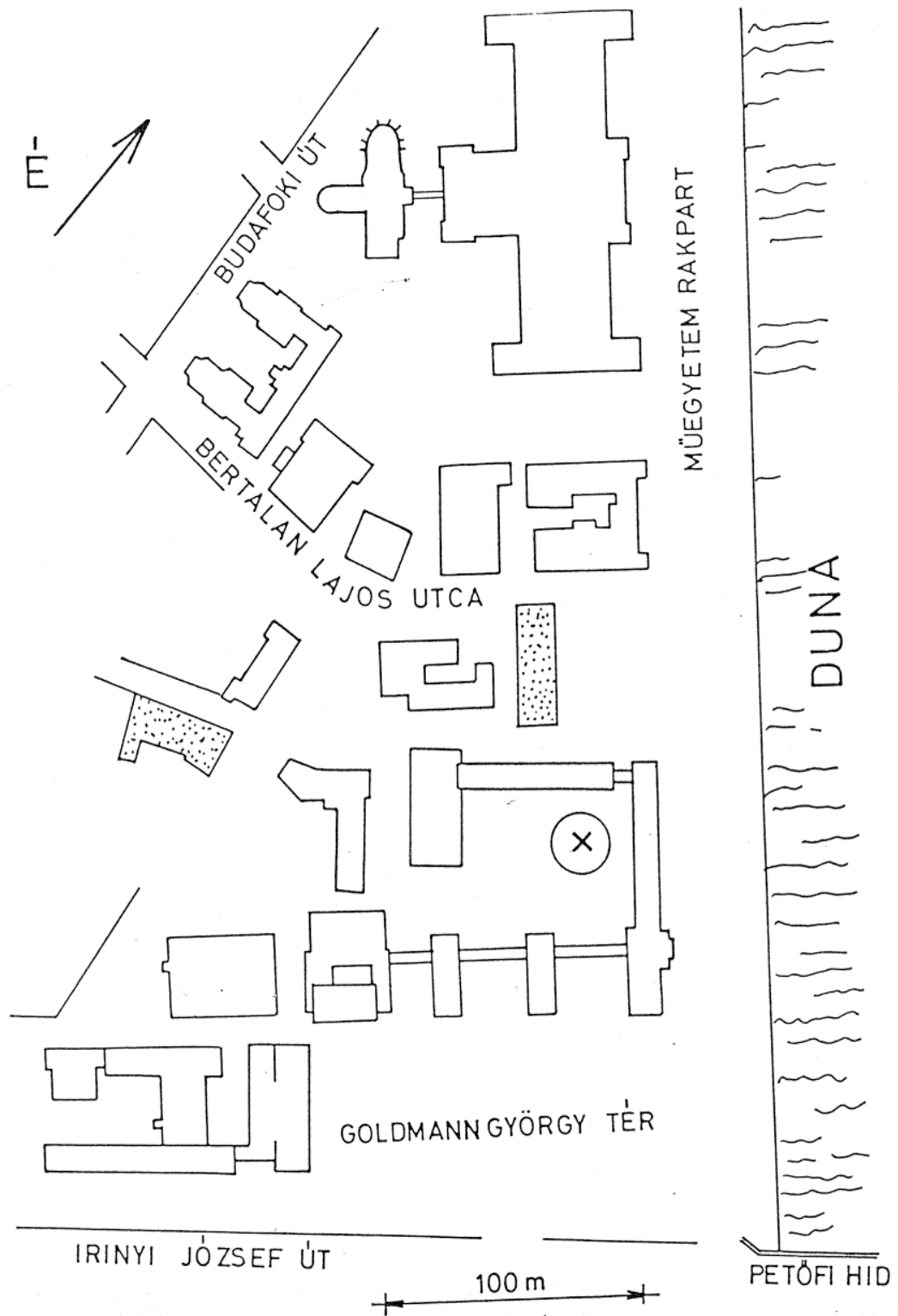
Receptorpontok

A kibocsátási ponttal közel azonos magasságú épületek perturbáló hatása miatt az épületek közötti térrészben tartózkodók dózisterhelésének becslésére a szokásos terjedési modellek közvetlenül nem alkalmazhatóak. A legesszímistább esetben feltehetjük, hogy a Budapesten leggyakoribb északnyugati szél a csóvát befújja a reaktor körüli térrészbe, amely 30 m magas épületekkel van körülveve. A kibocsátási pont 50 méteres környezetében (a "T" épület előtti térrészben) tartózkodók képezhetik az egyik kritikus csoportot.

Tekintve, hogy az egyetem telephelyét igen sűrűn lakott területek veszik körül, így kiszámoltam a dózisokat a kibocsátási ponttól 300 m-re tartózkodókra vonatkozólag is. Ezen csoport képezte a másik kritikus csoportot.

Meteorológiai adatok

A terjedésszámításokhoz felhasználtam a Meteorológiai Intézetben 1901 – 1950 között mért adatokon alapuló szélirány-gyakoriság eloszlás adatait [32]. A gyakoriság adatokat égtájanként a 2.1.2-1. táblázatban foglaltam össze.



2.1.2-2. ábra. Az Oktatóreaktor távolabbi környezete [32]

2.1.2-1. táblázat. Az Oktatóreaktor környezeti számításainál felhasznált szélirány adatok [32]

Égtáj	Gyakoriság [%]	Korrigált gyakoriság [%]
É	10,2	12,88
ÉK	7,9	9,97
K	5,0	6,31
DK	7,5	9,47
D	6,5	8,21
DNY	6,3	7,95
NY	10,3	13,01
ÉNY	25,5	32,20
Hiány	20,8	-

*A hiányt a relatív gyakoriságok arányában szétosztva az egyes égtájak szerint. A szélesebbesség átlaga: 2,3 m.

2.1.3. A terjedésszámítás modellje épületközelben

A talajszinten kialakuló koncentráció becslésére a turbulenciát is figyelembevevő modell [33] került alkalmazásra. E szerint a tetőn való kibocsátáskor akkor kerül be a radioaktív anyag az épület légkörébe, ha:

$$(H-H_b)/(|X_s|+H_b/10)<0,1 \quad (2.1.3-1)$$

ahol H – a kibocsátási magasság a talajszint felett (m)
H_b – az épület magassága (m)
X_s – a forrás távolság az épület szélmenti élétől (m)

A radioaktív anyag koncentrációja a recirkulációs tartományban a következő összefüggés alapján számítható [34-36]:

$$\chi_w=B(T_r/\lambda_r) \quad (2.1.3-2.)$$

ahol:

- χ_w – az ún. normalizált koncentráció = $Cu_b \cdot A/Q$
- C – az aktuális koncentráció (Bq/m³)
- u_b – szélesebbesség az épület magasságában (m/s)
- A – az épület keresztmetszete (m²)
- Q – kibocsátási sebesség (Bq/s)
- B – egy alakfaktor, tipikusan ~0,5
- T_r – normált tartózkodási idő a leáramlási tartományban = $u_b \tau / H_b$
- τ – a tényleges tartózkodási idő (s)
- λ_r – a normalizált áramlási hossz = L_r / H_b
- L_r – a tényleges áramlási hossz (m)

Az előző összefüggésben szereplő két fontosabb paraméter értékei szélsőtorna kísérletek alapján [36] a következőképpen számíthatóak:

$$\lambda_r = \frac{1,8(W_b / H_b)}{(H_l / H_b)^{0,3} * (1 + 0,24 * W_b / H_b)} \quad (2.1.3-3.)$$

$$T_r = \frac{11(W_b / H_b)^{1,5}}{1 + 0,6(W_b / H_b)^{1,5}} \quad (2.1.3-4.)$$

ahol: W_b – az épület szélessége (m)
 H_l – az épület hosszúsága (m).
 A recirkulációs tartomány maximális értéke [37] alapján

$$L_{max} = 0,6 * H_b + 1,1 * W_b \quad (2.1.3-5.)$$

2.1.4. Terjedésszámítás modellje távolabbi térrészben

Az egyetem körüli lakosság dózisterhelésének becsléséhez a terjedésszámításokat egy nemzetközileg elfogadott modelleket tartalmazó programcsomag (PC-CREAM (Consequences of Releases to the Environment Assessment Methodology) [38]) felhasználásával végeztem el. Ezen modell a kibocsátási ponttól 300 méterre jó közelítéssel számolja a terjedést és a dózisokat. Az Európai Közösség támogatásával elkészült programcsomagban alkalmazott modell leírásokat részletesen a [39] referenciában találjuk meg. A program terjedésszámító modulja (PLUME) az ismert Gauss-eloszláson alapuló csóvamodellt alkalmazza, folyamatos kibocsátást feltételezve. Az átlagos levegőaktivitás-koncentrációból a program a külső gamma dózist számolja ki a kibocsátási ponttól legalább 300 m-re elhelyezkedő receptor pontokon tartózkodókra vonatkozóan.

2.1.5. Számítási eredmények

Eredmények épületközelben

A terjedésszámítás főbb kiindulási paraméterei a következők voltak:

H_b	– (épületmagasság) :	30 m
H_l	– (épülethosszúság):	40 m
W_b	– (épületszélesség) :	20 m
H	– (kibocsátási magasság) :	35 m
u_b	– szélesség :	2,3 m/s
A	– az épület keresztmetszete :	600 m ²
Q	– kibocsátási sebesség :	1Bq/s

Ezekkel:

λ_r	– (a normalizált áramlási hossz) számolt értéke: 0,952.
T_r	– (a normált tartózkodási idő) a leáramlási tartományban: 4,51.
L_{max}	– (a recirkulációs tartomány) maximális értéke: 40 m.
L_r	– (a tényleges áramlási hossz): 28,5 m.
τ	– (a tényleges tartózkodási idő): 58,8 s
χ_w	– (az ún. normalizált koncentráció): 2,36.
C	– (az aktuális koncentráció): 1,71E-03 (Bq/m ³).

Az Ar-41 dóziskonverziós tényezője: $1.3E-14$ (Gy/s) / (Bq/m³).

Igy 1 Bq/s kibocsátási sebességnél a számított dózisteljesítmény: $1,48E-16$ Sv/s.

A fenti eredmények felhasználásával – a teljes ott tartózkodást számítva - az évi 50 μ Sv-es dózisterheléshez (a dózismegszorításhoz) a számított évi Ar-41 kibocsátás : $2,25E+12$ Bq.

Eredmények a távolabbi körzetben

A kibocsátási ponttól 300 m-re (Egry József utcában) tanuló általános iskolás gyermekek dózisértékét a PC-CREAM programrendszer felhasználásával becsültem meg. A programcsomag Assessor nevű modulját alkalmaztam, amely szektorátlagolt modell segítségével határozza meg a kibocsátott radioaktív anyag hígulását a környezetben. A program a meteorológiai adatokat külön fájlból olvassa be. A Pasquill/Smith/Hokser- és a Doury-féle sémák közül választhatunk, esetünkben a meteorológia mindig a Pasquill/Smith/Hokser-séma szerint volt megadva, mely szélesség és stabilitási kategóriákat alkalmaz.

100 TBq/év Ar-41 kibocsátást feltételezve a kibocsátási ponttól 300 méterre tartózkodó általános iskolásra vonatkozóan a becsült effektív dózis : $3,2E-06$ Sv. Ezen értékből számoltam ki az dózismegszorításhoz tartozó kibocsátási korlátot.

Az évi 50 μ Sv-es dózisterheléshez az Ar-41 számított évi kibocsátás korlátja: $1,5E+15$ Bq.

Értékelés

Az épületközeli és a távolabbi körzetre számolt eredményeket összevetve megállapíthatjuk, hogy a kibocsátási korlátokat a kibocsátási pont környezetében tartózkodó egyetemi hallgatóságra kapott jóval szigorúbb származtatott érték – tehát a $2,25E+12$ Bq/év fogja megszabni. Az Oktatóreaktor évi tervezett Ar-41 kibocsátása $1,0E+11$ Bq/év. Az Oktatóreaktor tervezett kibocsátását összevetve a kibocsátási határértékekkel megállapíthatjuk, hogy a tervezett kibocsátások a származtatott kibocsátási szintek alatt maradnak. A 2-2. egyenlőtlenségekbe helyettesítve (a légköri és vízi kibocsátás) nuklidonként a tervezett és a kibocsátási határértékeit – valamennyi terhelési útvonalat figyelembe véve – a tört értéke $0,045$, (vagyis $\ll 1$), így a kibocsátási határérték kritérium is messzemenően teljesül és a kibocsátási kivizsgálási kritérium értékét ($0,3$) sem érjük el.

A kibocsátási határérték betartása, illetve a kibocsátási határérték kritérium teljesülése biztosítja, hogy sem az egyetemi hallgatóság, sem a lakosság éves sugárterhelése nem haladja meg a dózismegszorítást.

2.2. A Kutatóreaktor

A Kutatóreaktor VVR-M10 típusú, könnyűvízzel moderált és hűtött, berilliummal reflektált termikus reaktor 10 MW hőteljesítménnyel. Fűtőanyaga nagy dúsítású (36%), alumínium mátrixba foglalt fémurán, vagy UO_2 . A reaktor a KFKI telephelyén, Budapest határán belül, a város nyugati részén, a XII. kerületben helyezkedik el.

2.2.1. A kritikus lakossági csoport

A légköri terhelés szempontjából a környező lakosság alábbi vonatkoztatási csoportjai a meghatározóak:

- a kibocsátási pontoktól 1000 m-re ÉÉK irányban fekvő Csillebérci Szabadidő és Ifjúsági Központ (egykori Úttörőváros) lakói,
- az 1000 m-re KÉK irányban fekvő üdülőtelep lakossága,
- a 3000 m-re fekvő lakótelep lakói.

Számításaimat mindhárom lakossági és azon belül mindhárom (csecsemő, gyermek, felnőtt) korcsoportra elvégeztem, majd kiválasztottam a sugárterhelés szempontjából legérzékenyebb csoportot. Az expozíciónál teljes idejű ott tartózkodást vettem figyelembe.

2.2.2. A légtörési kibocsátás és terjedés

A Kutatóreaktor normálüzemi működése során kizárólag nemesgázok kerülnek kibocsátásra a reaktor 80 m magas kéményén. A kémény effektív magasságát (az effektív kéménymagasság a kiáramló levegő tehetetlensége révén és a felhajtóerő miatt nagyobb a geometriai kéménymagasságnál) számításaimban 100 m-re vettem fel. A számításaimban 1 éves folyamatos kibocsátást tételeztem fel. Az üzemi tapasztalatok alapján az alábbi nemesgázok kibocsátásával kell számolnunk:

- Ar-41
- Kr-85m
- Kr-87
- Kr-88
- Xe-133
- Xe-135

2.2.3. A terjedésszámítási és dózisszámítási modell

A terjedésszámításokhoz a KöM rendeletnek megfelelően nemzetközileg elfogadott modelleket tartalmazó programcsomagot (PC-CREAM [38]) alkalmaztam. Az Európai Közösség támogatásában elkészült programcsomagban alkalmazott modell leírásokat részletesen a [39] referenciában találjuk meg. A program terjedésszámító modulja (PLUME) az ismert Gauss-eloszláson alapuló csóvamodellt alkalmazza folyamatos kibocsátást feltételezve. Az átlagos levegőaktivitás koncentrációból a főprogram (ASSESSOR) a talajszennyezettség révén létrejövő dózist és a külső gamma csóvadózist számolja ki a kibocsátási ponthoz viszonyított tetszőleges receptor pontokon elhelyezkedő különböző korú (csecsemő, gyermek, felnőtt) csoportokra. A program a domborzati viszonyokat nem veszi figyelembe, de a talajérdesség kellő megválasztásával a számolt eredmények 30 %-on belüli jó becslést eredményeznek [39].

2.2.4. Meteorológiai adatok

A telephelyen folynak szélirány és szélesség regisztrációk, azonban stabilitási kategória meghatározás nélkül. Mivel azonban a program szélirány-szektoronként és kategóriánként kéri a gyakoriságokat így a Pakson mért kategória eloszlásokat Budapestre vonatkozó (a Meteorológiai Intézetben 50 év alatt mért) irányeloszlásokra átnormálva kapott kategória szerinti eloszlásokat használtam fel (2.2.4-1. táblázat).

2.2.4-1. táblázat. Szélirány gyakoriságok (%) a telephelyen

Égtáj	Stabilitási (Pasquill) kategória					
	A	B	C	D	E	F
É	0,16	0,19	0,40	1,58	1,26	0,54
ÉÉK	0,05	0,13	0,36	0,97	1,76	0,79
ÉK	0,04	0,18	0,45	1,25	1,03	0,50
KÉK	0,35	0,58	0,55	1,42	0,97	0,62
K	0,88	0,46	0,49	2,03	1,26	1,01
KDK	0,57	1,01	0,97	2,27	1,30	0,75
DK	0,10	0,39	3,79	6,94	1,97	2,01
DDK	0,11	0,11	0,97	7,43	5,64	2,66
D	0,05	0,0	0,0	0,99	1,58	0,60
DDNy	0,05	0,02	0,42	3,64	2,26	2,26
DNy	0,01	0,14	0,43	1,45	1,49	0,59
NyDNy	0,06	0,17	0,45	0,09	1,69	2,78
Ny	0,27	0,27	0,61	0,85	1,13	0,78
NyÉNy	0,40	0,26	0,35	0,46	0,35	0,58
Ény	0,35	0,30	0,57	0,67	0,46	0,39
ÉENy	1,01	0,27	1,25	2,31	2,23	0,64

2.2.5. Receptorpontok

A reaktor környezetében ÉÉK és DK közötti irányban található lakottabb terület.

- I. Csillebérci Szabadidő és Ifjúsági Központ (az egykori Úttörőváros) lakosai. Távolság: 1000 m; irány: ÉÉK.
- II. KFKI lakótelep lakosai. Távolság: 3000 m; irány: ÉK
- III. Az üdülőtelep lakosai. Távolság: 1000 m; irány: KÉK

2.2.6. Számítási eredmények

A reaktorkéményen kibocsátott nemesgázok a vizsgált receptorpontokon kizárólag külső gamma és béta sugárterhelést hoznak létre azonos mértékben mindhárom korcsoportban. A 2.2.6-1. táblázat a 100 TBq/év kibocsátás esetén becsült dózisterheléseket mutatja teljes időkitöltés esetén.

2.2.6-1. táblázat. 100 TBq/év kibocsátást feltételező dózisterhelések [$\mu\text{Sv}/\text{év}$]

Radionuklid	Receptorpont		
	I. Csillebérci Szabadidő Központ	II. KFKI lakótelep	III. Az üdülőtelep
Ar-41	1,1E-01	3,0E-02	1,4E-01
Kr-85m	1,4E-02	4,1E-03	1,8E-02
Kr-87	6,6E-02	1,8E-02	8,4E-02
Kr-88	1,6E-01	4,4E-02	2,0E-01
Xe-133	2,6E-03	9,0E-04	3,7E-03
Xe-135	2,2E-02	6,3E-03	2,8E-02

2.2.7. Értékelés

Az előzőekhez hasonló megfontolásokkal a kibocsátási határérték megállapításánál az üdülőtelep lakosainak dózisterhelését vettem figyelembe. Az 50 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ dózismegszorítást alkalmazva a tervezett kibocsátások és a $\Gamma=5$ -ös biztonsági tényező mellett a származtatott kibocsátási határértékek a 2.2.7-1. táblázat szerint alakulnak.

2.2.7-1. táblázat. A Kutatóreaktor tervezett kibocsátásai és kibocsátási határértékei

Radionuklid	Tervezett kibocsátások	Kibocsátási határérték [Bq/év]
Ar-41	7,1E+13	7,1E+15
Kr-85m	5,5E+14	5,5E+16
Kr-87	1,1E+14	1,1E+16
Kr-88	5,0E+13	5,0E+15
Xe-133	2,7E+15	2,7E+17
Xe-135	3,5E+14	3,5E+16

A tervezett kibocsátásokat összevetve a kibocsátási határértékekkel megállapíthatjuk, hogy a kibocsátások messze a származtatott kibocsátási szintek alatt maradnak. A kibocsátási határérték kritérium - a folyékony kibocsátást is figyelembe véve - ($0,15 \ll 1$), is messzemenően teljesül és a kibocsátási kivizsgálási kritérium értékét (0,3) sem érjük el.

A kibocsátási határérték betartása, illetve a kibocsátási határérték kritérium teljesülése biztosítja, hogy a lakosság éves sugárterhelése nem haladja meg a dózismegszorítást.

2.3. Izotóp Intézet Kft.

A KFKI telephely területén az Izotóp Intézet Kft XVII. épületében „A” szintű laboratóriumaiban nagy aktivitású nyitott radioaktív készítmények előállítása, feldolgozása, zárt sugárforrások gyártása történik.

A ^{131}I és ^{125}I gyártása: gyártási ciklusonként a feldolgozott anyag aktivitása : 10^{11} - 10^{12} Bq.

A ^{14}C feldolgozása $4 \cdot 10^{11}$ Bq. (Trícium feldolgozás 2006-ban nem volt).

2.3.1. Kiindulási adatok, számítási módszer

A kritikus lakossági csoport, a terjedés és dózisszámítási modell, a meteorológiai adatok és a receptorpontok megegyeznek a 2.2. fejezetben szereplőkkel. A kibocsátási magasság jelen esetben – radionuklidoktól függően 17 m, ún. kis magasságú kibocsátás (az épület tetején levő kéményen), illetve nagy magasságú kibocsátás a Kutatóreaktorhoz hasonlóan a reaktorkéményen, 100 m-es effektív magasságban.

2.3.2. Számítási eredmények

Kis magasságú kibocsátás

Az Izotóp Intézet Kft. az izotópgyártás során a tríciumot, illetve a ^{14}C izotópot a laborépület kéményén, 17 m magasságban bocsátja ki. A PC CREAM program és a helyi meteorológiai adatok felhasználásával becsültem a 100 TBq/év kibocsátás esetén a három különböző korcsoportra

vonatkozó dózisterheléseket ugyancsak három receptor pontban. Az eredményeket a 2.3.2-1. táblázat mutatja be.

2.3.2-1. táblázat. 100 TBq/év kibocsátást feltételező dózisterhelések [$\mu\text{Sv}/\text{év}$]

Radio-nuklidok	I. Csillebérci Szabadidő Központ			II. KFKI lakótelep			III. Az üdülőtelep		
	Csecsemő	Gyermek	Felnőtt	Csecsemő	Gyermek	Felnőtt	Csecsemő	Gyermek	Felnőtt
H-3	0,81	0,85	0,99	0,2	0,2	0,24	0,96	1	1,2
C-14	100	99	110	25	24	26	120	120	130

A 2.3.2-1. táblázatból látható, hogy a dózisterhelés szempontjából *legérintettebb csoport az üdülőtelep felnőtt lakossága.*

Az 50 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ dózismegszorítást alkalmazva ($\Gamma=5$ biztonsági tényező mellett) a származtatott kibocsátási határértékek és (tervezett értékek) a következők:

H-3 esetén: 8,33E+14 Bq/év (a tervezett érték: 8,3E+12 Bq/év)
 C-14 esetén: 7,69E+12 Bq/év (a tervezett érték: 4,0E+11 Bq/év)

Nagy magasságú kibocsátás

Az Izotóp Intézet Kft. izotópgyártása során jóízotópokat (I-125 és I-131) bocsát ki a reaktorkéményén 80 méter magasságban. A PC CREAM program segítségével és a helyi adatok alapján megbecsültem a várható dózisterheléseket három különböző korcsoportnál és a három receptorpontban 100 TBq/év kibocsátást feltételezve (2.3.2-2. táblázatban).

2.3.2-2. táblázat. 100 TBq/év kibocsátást feltételező dózisterhelések [$\mu\text{Sv}/\text{év}$]

Jód-izotópok	I. Csillebérci Szabadidő és Ifjúsági Központ			II. KFKI lakótelep			III. Az üdülőtelep		
	Csecsemő	Gyermek	Felnőtt	Csecsemő	Gyermek	Felnőtt	Csecsemő	Gyermek	Felnőtt
I-125	76	-	65	57	-	49	202	-	170
I-131	240	130	95	180	97	72	640	340	250

Az előzőekhez hasonló megfontolásokkal a kibocsátási határérték megállapításánál az üdülőtelepen élő 1 éves korú csecsemők dózist vettem figyelembe. Az 50 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ dózismegszorítást alkalmazva ($\Gamma=5$ -ös biztonsági tényező mellett) a származtatott kibocsátási határértékek a következők:

– I-125 esetén: 4,95E+12Bq/év (a tervezett érték: 4,9E+10 Bq/év)
 – I-131 esetén: 1,56E+12Bq/év (a tervezett érték: 5,0E+10 Bq/év)

Értékelés

A tervezett kibocsátásokat összevetve a kibocsátási határértékekkel megállapíthatjuk, hogy a tervezett kibocsátások egy-két nagyságrenddel a származtatott kibocsátási szintek alatt maradnak. A kibocsátási határérték kritérium ($0,13 \ll 1$), is messzemenően teljesül és a kibocsátási vizsgálati kritérium értékét (0,3) sem érjük el.

A kibocsátási határérték betartása, illetve a kibocsátási határérték kritérium teljesülése biztosítja, hogy a lakosság éves sugárterhelése nem haladja meg a dózismegszorítást.

3. A rendkívüli események modellje és adatbázisa

3.1. A terjedés- és dózisszámítási modell főbb jellemzői

Az Európai Közösségek Bizottsága a MARIA (Methods for Assessing the Radiological Impact of Accident) projekt keretében tűzte ki célul egy új programrendszer kidolgozásának megvalósítását, hogy ezáltal az erőművek biztonságának megítélése Európában – a környezetbiztonságot illetően – azonos eszközzel, egyöntetűen történjen. Ezen eszköz a COSYMA (Code System for Maria) programrendszer, amelynek legújabb változatát (PC COSYMA Version 2.1) az Európai Bizottság 1996-ben bocsátotta ki [22]. A kód fejlesztésében, tesztelésében és magyarországi adaptálásában (meteorológiai, népességi, mezőgazdasági termelékenység adatokkal történő feltöltésében) vettem részt. Ezt a programcsomagot alkalmaztam a Kutatóreaktor és a paksi atomerőmű tervezési üzemzavarainak és súlyos baleseteinek elemzése során.

3.2. Léggöri terjedési modell

A PC COSYMA programcsomag ún. szektorátlagolt, függőleges irányban a Gauss-eloszláson alapuló csóvamodellt alkalmazza, amely lehetővé teszi a szélirány, a szélsébség, a stabilitási kategória, csapadék intenzitás óránkénti változtathatóságát. A modell feltételezi, hogy a csóvát befolyásoló feltételek a trajektória mentén megegyeznek a meteorológiai állomáson mért állapotokkal. A kibocsátást óránkénti kibocsátási fázisok (összesen hat) sorozatával modellezhetjük.

Három opció valósítható meg:

- A kibocsátott anyag valamennyi fázisban a kibocsátás pillanatában fennálló szélirányban halad tovább. (Ez a többfázisú kibocsátások esetében pesszimista becslést eredményez a következményeket illetően, amennyiben ez folyamatosan a kritikus lakosság irányába történik. Ezzel a feltételezéssel éltem determinisztikus elemzéseim során).
- A több fázisban történő kibocsátásnál az anyag a fázisok kezdeti órájuknak megfelelő irányban haladnak.
- A kibocsátott anyagok óránként követik a szélirányváltozást (Ezt az opciót alkalmaztam valószínűségi elemzéseimben).

Determinisztikus analízis esetén a kiindulási stabilitási paraméter lehet a kibocsátási pont környezetében leggyakoribb (Paks esetében Pasquill D) kategória, amely egyben a kritikus lakossági csoportra vonatkozóan (Csámpa pusztai lakossága) a maximális dózist is jelenti. Valószínűségi elemzésnél egy teljes évre vonatkozó meteorológiai adatsorból kiindulva – a megfelelő mintavételi eljárással – a kiválasztott szekvenciákra (maximum 144) végzünk elemzéseket. A kiválasztott szekvenciák gyakorisága fogja meghatározni a környezetben a sugárzási, egészségügyi és gazdasági következmények valószínűségét.

3.3. Dózisszámítások védőintézkedés nélkül

Az üzemzavari vagy baleseti kibocsátást követően a lakosság egyedeit a levegő, illetve talajszennyezettségnek köszönhetően érheti dózisterhelés. Elemzések során a következő terhelési útvonalakat vettem figyelembe:

- külső gamma-sugárzás a radioaktív csóvától (felhődózis),
- a belégzéstől származó belső dózisterhelés (inhalációs dózis),

- a bőrön kiüledett béta-sugárzók dózisa (bőrdózis),
- külső gamma-sugárzás a talajra történő kiüledéstől (talajdózis),
- az élelmiszer fogyasztásból eredő sugárterhelés (táplálkozási dózis).

A kibocsátási ponthoz közeli térségben – feltételezve, hogy kizárólagosan a helyben termelt élelmiszereket fogyasztják, – az egyéni dózisek felülbecslését eredményezi.

3.3.1. Külső terhelési útvonalak

A csóva külső gamma-sugárzásától származó terhelést a levegőaktivitás koncentráció időintegrál és a félvégtelen dóziskonverziós tényezők [40] szorzatával kapjuk. Hasonló módon kapjuk a talajtól származó dózisterhelést, felhasználva az egységnyi kiüledéstől származó dóziskonverziós tényezőket [41]. A bőrdózisnál az egységnyi kiüledés dózistényezőjén [42] túl ismernünk kell a bőrfelületre történő üledési sebességet (amely a talajra történő üledésből egy szorzófaktorral adódik), valamint a bőrfelület nagyságát és fedettségét.

A dóziskonverziós tényezőkre vonatkozóan az alkalmazott kódok (PC CREAM és PC COSYMA) mind a folyamatos mind az egyedi kibocsátásoknál az ún. félvégtelen dóziskonverziós tényezőket alkalmazzák. Ez levegőben elnyelt gamma dózisteljesítmény aktivitáskoncentráció konverziós tényezője az energia egyensúly elv alapján a félvégtelen tér hatására lett kiszámítva. Az egyik legfontosabb radionuklid I-131 esetére pl. : $8,19 \cdot 10^{-7} \text{ Gy év}^{-1} / \text{Bq m}^{-3}$. Tekintve, hogy egy balesetnél az expozíció időtartama általában jóval rövidebb, mint az esetlegesen egy hosszabb időre eloszlott, de volumenében azonos folyamatos kibocsátásnál, ezt a hatást a 3.1.4. pontban leírtaknak megfelelően vesszük figyelembe.

3.3.2. Belső terhelési útvonalak

A belső terhelés becslésénél a radioaktív csóva belélegzéséből, valamint a talajra történő kiüledésből származó komponenseket kell figyelembe venni. A számításakor figyelembe kell venni a korosztálynak megfelelő légzési sebességet az egységnyi aktivitás belélegzéséből származó konverziós tényezőket, a talajnál pedig a reszuszpenziós tényező paramétereit.

A táplálékláncon keresztüli dózisterhelés számításánál az alkalmazott modellben feltételeztük, hogy a helyben megtermelt javak elfogyasztásra kerülnek, ami a kollektív dózisek felülbecsléséhez vezet a kibocsátási pont környezetében. Az analízis során alkalmazott modellek mind az egységnyi inhalációs és lenyelési tényezőket, mind a tápláléklánc modell egyéb paramétereit illetően tartalmazzák az ICRP legújabb ajánlásaiban [43] szereplő értékeket is.

3.4. Az egészségügyi következmények számítása

3.4.1. Korai hatások

A korai egészségügyi hatások – ún. determinisztikus következmények becslésénél – az alábbi függvényt alkalmazzuk:

$$R = 1 - e^{-H} \quad (3.4.1-1.)$$

ahol :

$$H = \ln 2 \left(\frac{D}{D_{50}} \right)^s \quad (3.4.1-2.)$$

amelyben :

- D : dózis egy meghatározott időperiódusban,
- D_{50} : az ún. félhalálos dózis,
- S : a függvény alakját meghatározó paraméter.

Az elszennvedett dózisok – a korai dózishatásokat illetően – kisebb dózisteljesítmények esetén jóval kevésbé ártalmasak, mint nagyobb dózisteljesítmény esetén. Ezt a tényt figyelembe véve az (3.4.1-2.) egyenletben szereplő D/D_{50} értéket a következővel helyettesítjük:

$$\frac{D}{D_{50}} = \sum \frac{D^i}{D_{50}^i} \quad (3.4.1-3.)$$

ahol D^i : a dózis egy adott időperiódusban

D_{50}^i : az adott időperiódusban kapott dózishoz tartozó félhalálos dózis

Az előbbieken leírt modell azt tételezi fel, hogy bármilyen kicsi is a dózis, annak korai hatásra vonatkozólag is van kockázata. Tapasztalatok szerint azonban egy bizonyos dózisküszöb alatt korai hatások nem figyelhetők meg. Ezt úgy érthetjük el, hogy a kockázatot nullának vesszük, amennyiben ez az érték egy meghatározott érték (pl. 1%) alatt van.

A modellben a D_{50} értéke a dózisteljesítmény (vagy dózisiráta) függvénye, ez a következőképpen fejezhető ki:

$$D_{50}^i = D_{\infty} + \frac{D_0}{DR^i} \quad (3.4.1-4.)$$

ahol: D_{∞} : félhalálos dózis magas dózisteljesítményeknél

DR^i : dózisteljesítmény átlaga a vizsgált időperiódusban

D_0 : paraméter

Az egyenlet második tagja írja le a D_{50} értékének a dózisteljesítmény csökkenésével történő növekedését. Az analízisekben alkalmazott paraméterértékek [22] a 3.4.1-1. táblázatban találhatóak.

A szervek különbözőképpen érzékenyek a nagy és kis lineáris energiaátadású tényezőjű (LET) besugárzásokra. Ezt vesszük figyelembe a relatív biológiai hatásossági tényezővel (RBE). A táblázatban jelzettnek megfelelően különböző RBE értékeket használunk a különböző szervek esetén. Bizonyos esetekben (bőr) az RBE értéke lehet zérus is, pl. alfa-sugárzás esetén.

A különböző szervek besugárzása esetén a halálos események kockázatát úgy kombináljuk, hogy a teljes kockázat ne haladja meg az egységnyit. A korai megbetegedések számított kockázata tartalmazza a megbetegedések kombinált kockázatát, de nem tartalmazza a korai elhalálozást.

3.4.2. Késői hatások

A késői vagy más néven sztochasztikus hatások becslése során a halállal és a nem halállal végződő rákos megbetegedéseket és az utódoknál várható, öröklődő hatásokat számoljuk ki. A dózis és a kockázat között lineáris összefüggést tételezünk fel dózisküszöb nélkül. Ez utóbbi – kis dózisok esetén – várhatóan felülbecslést eredményez a népesség körében bekövetkező következményeket illetően. A számítások során az adott rákos megbetegedéstől függően alkalmazott (additív és multiplikatív modell) kockázati tényezői az ICRP [44] kiadványából valók.

3.4.1-1. táblázat. A korai hatások elemzésénél feltételezett paraméterek

Szervdózis		Hatás	Alak S	Paraméterek a D ₅₀ kiszámításához		Integrálási idő (nap)	RBE*
Külső terhelés	Belső terhelés			D _∞ [Gy]	D ₀ [Gy ² /óra]		
Elhalálozás							
Tüdő	Tüdő	Tüdő szindróma	7,0	10,0	30,0	1, 7, 30, 365	7,0
Vörös csontvelő	Vörös csont- velő	Hematológiai szindróma	6,0	4,5	0,1	1, 7, 30	2,0
Maradékok	-	Gasztrointest szindróma	10,0	15,0	0,0	1, 7	-
Petefészek	Méh	Koraszülés	3,0	1,5	0,0	1, 30	20,0
Megbetegedés							
Tüdő	Tüdő	Tüdőfunkció károsodás	7,0	5,0	15,0	1, 7, 30, 365	7,0
Pajzs- mirigy	Pajzs- mirigy	Pajzsmirigy tútermelés	1,3	60,0	30,0	1, 7, 30	0,0
Bőr	-	Bőrégés	5,0	20,0	5,0	1, 7, 30	0,0
Szem	-	Szemhályog	5,0	3,0	0,01	1, 7, 30	0,0
Petefészek	Méh	Utód retardáció	1,0	1,5	0,0	1, 30	20,0

* alfa-sugárzók esetén

3.4.3. Kollektív kockázat

A kollektív kockázat számításánál először kiszámoljuk valamennyi rácsponton (szegmensen) a várható kockázatot, majd ezeket összeszorozzuk az adott rácsponton élők számával, majd összegezzük valamennyi rácspontra. Ez alól kivételt jelent a táplálékláncon keresztüli kollektív dózis becslése, itt ugyanis feltételeztem, hogy az adott rácsponton megtermelt javak a helyszínen elfogyasztásra is kerülnek. Ezen kollektív dózisokat szorozva a kockázati tényezőkkel kapjuk meg a táplálékláncon keresztüli egészségügyi hatások kockázatát. A késői egészségügyi hatások becslésénél – az ICRP ajánlásainak megfelelően - nem a kollektív dózisok szolgálták alapul, hanem az egyes szerveket ért szervdózisok, figyelembe véve az egyes szervek egységnyi dózisaikhoz tartozó - az ICRP által ajánlott kockázati tényezőket.

3.5. Védőintézkedések

3.5.1. A védőintézkedés opciói, kritériumai

Az elemzéseim során – a paksi atomerőmű súlyos baleseteinek elemzésénél – feltételeztem, hogy a nemzetközi ajánlásokban [45] és a hazai előírásokban [Az egészségügyi miniszter 16/2000 (VI. 8) EÜM rendelete] szereplő intézkedéseket időben elrendelik és azokat sikerrel végre is hajtják. Az egyik legsúlyosabb esetben megvizsgáltam, hogy ennek elmaradása esetén milyen

környezeti következmények várhatók. A tervezési üzemzavarok esetén védőintézkedésekkel nem számoltam, mivel ezen eseményeknek úgy kell lezajlaniuk, hogy intézkedések bevezetése ne legyen indokolt. Ezen intézkedések és intézkedési szintek a következőekben kerülnek ismertetésre.

3.5.2. Korai időszak

Elzárástól

Az általános, optimált beavatkozási szint elzárástól 10 mSv elkerülhető dózis, 2 napnál nem hosszabb időtartam alatt. A hatóságok kisebb beavatkozási dózisszinteknél is javasolhatják az elzárástól rövidebb időtartamra, vagy a további védelmi tevékenységek, például kitelepítés elősegítésére.

Kimenektől

Az általános, optimált beavatkozási szint a kimenektől 50 mSv elkerülhető dózis nem több, mint 1 hetes időtartam alatt. A hatóságok kisebb elkerülhető dózisszintnél is kezdeményezhetik a kitelepítést rövidebb időtartamra, vagy ha a kitelepítés gyorsan és könnyen megvalósítható (pl. kis létszámú embercsoportok esetében). Magasabb beavatkozási dózisszintek válhatnak indokolttá, ha a kimenektől nehéz lenne, pl. ha nagy létszámú a népesség, vagy ha nincsenek megfelelő szállítóeszközök.

Jódprofilaxis

Az általános, optimált beavatkozási szint jódprofilaxisra: 100 mGy elkerülhető, a pajzsmirigyben a radiojódoktól eredő lekötött elnyelt dózis.

3.5.3. Közbenes és késői időszak

Táplálkozási tilalom

Az élelmiszerek fogyasztásának tilalmára a nemzetközi és hazai előírásokban szereplő általános cselekvési szinteket (II. függelék 12-1. táblázat adatait) alkalmaztam.

Ideiglenes áttelepítés

Az általános, optimált beavatkozási szint ideiglenes áttelepítés kezdeményezésére 30 mSv effektív dózis egy hónap alatt, az ideiglenes áttelepítés megszüntetésére 10 mSv egy hónap alatt. Ha az egy hónap alatt felhalmozott dózis várhatóan egy vagy két év alatt nem csökken a fenti érték alá, akkor végleges (hazatérés reménye nélküli) áttelepítéssel kell számolni. Ugyancsak állandó áttelepítéssel kell számolni, ha az élettartamra előre jelzett effektív dózis meghaladja az 1 Sv értéket.

3.6. Az ökonómiai hatások becslése

Egy baleset szennyezettségi, sugárzási és egészségügyi, valamint balesetelhárítási következményeit egységesen fejezhetjük ki a gazdasági mutatókkal. Elemzéseim során egy súlyos esetben becsültem azokat az egészségügyi költségeket, amelyeket a sugárterhelés váltott ki a népesség körében, valamint azon költségeket, amelyeket a védőintézkedések életbeléptetése jelent a társadalomnak. A COSYMA kódot – megfelelő adatbázissal való feltöltés után – alkalmaztam a nukleáris balesetek gazdasági következményeinek becslésére is. Ily módon lehetővé vált a balesetben érintett – elsősorban az erőmű környezetében élő – lakosság egészségkárosodásából eredő költségeinek figyelembevétele, illetve azon költségek számítása, amelyet védőintézkedés

megtételére fordítottunk, hogy ezen előbbi költségeket lecsökkentsük. A védőintézkedések elrendelésénél a nemzetközi ajánlásokkal összhangban lévő hazai előírásokat vettem alapul. A következőkben e legfontosabb tényezőket tekintjük át. Az egyes tételekhez tartozó, euróban kifejezett összegeket a II. függelék 12-2. fejezetében foglaltam össze.

3.6.1. Védőintézkedések költségeinek bemenő paraméterei

Kimenekítés

A balesetet követő gyors kimenekítés (evakuálás) költségének becslése során az alábbi komponenseket vettem figyelembe:

- a kimenekítés szállítási költségeit a szennyezett területről,
- a szállásköltségeket az evakuáltak részére,
- a keresetkiesést a kimenekítés ideje alatt az egy főre jutó bruttó hazai termékben kifejezve.

Áttelepítés

A balesetet követően egy későbbi időpontban végrehajtott áttelepítés költségeinek számításánál az alábbi tényezőket használtam fel:

- az áttelepítés szállítási költségeit a szennyezett területről (ez lényegesen eltér az kimenekítésnél feltüntetett értéktől, tekintve, hogy ilyenkor több személyes dolog is elszállításra kerül;
- szállásköltségeket az áttelepítettek részére;
- keresetkiesést az áttelepítés alatt, illetve az ezt követően előre meghatározott időtartamig (feltételeztük, hogy a gazdaság eredeti szintre történő helyreállítását követően az érintettek meghatározott időn belül új munkahelyet találtak és állandó lakáshoz jutottak);
- az áttelepítésből eredő tőkevesztést és a tőkehozadék elmaradását, amely költségkiesést illetően az alábbiakban nyilvánul meg:
 - a lakóhely elvesztésében,
 - a nem lakáscélú létesítmények elvesztésében,
 - a tartós fogyasztási cikkek elvesztésében,
 - a termőterület-kiesésben.

Dekontaminálás

A természetes lemosódásnak, illetve a dekontaminálásnak köszönhetően a talajdózis olyan előre meghatározott szintre csökkenthető, amelynél az érintettek visszaköltözése az előírásoknak megfelelően lehetséges. A dekontaminálás időpontjára vonatkozóan feltételeztem, hogy a műveletet nem közvetlenül a balesetet követően, hanem a visszaköltöztetést megelőzően hajtják végre.

A táplálkozási tilalom

Az étkezési korlátozás, illetve az ebből eredő költségkiesés az alábbi területeket érinti:

Tejtermelés

A balesetet követően a hatósági előírásoknak megfelelően a tejfogyasztás korlátozásával kell számolnunk. Ezen tétel költségkiesésénél a bruttó hazai termékhez a tej literenkénti hozzájárulás-csökkenéséből eredő veszteségeket vettem figyelembe. A balesetet követő első évben ezen érték lényegesen nagyobb, tekintve, hogy ilyenkor a baleset előtti befektetés (pl. trágyázás) is veszendőbe

megy. A mezőgazdasági termelékenységénél azon területek tejtermelési rátáját (liter/év/km²) használtam, ahol a területen megtermelt terményeket kifejezetten a tehénállomány táplálására fordítják.

Állatállomány, növénytermesztés

Ezen veszteség becslésénél is az adott állatállomány, illetve növénytermesztés bruttó hazai termékhez történő hozzájárulásából kellett kiindulnunk. A baleset előtti ráfordítás (pl. takarmányozás, trágyázás) az első év veszteségeit lényegesen megnöveli. A szennyezett állatok megsemmisítési költségeinél nullát tételeztem fel, abból kiindulva, hogy az állatok a kontamináció adott szintre történő csökkenéséig nem kerülnek levágásra. Hasonlóan nullát tételeztem fel a szennyezett növények megsemmisítési költségére vonatkozóan is.

3.6.2. Az egészségügyi költség bemenő paraméterei

Az előírásoknak megfelelő korai és késői védőintézkedések eredményeképpen az akut egészségügyi hatások szinte nullára redukálhatók, addig a krónikus rendellenességek a sztochasztikus jellegüknél fogva megjelennek és jelentős anyagi költségeket okozhatnak. A kórházi, illetve az otthoni kezelés költségeit betegségenként a II. függelék 12-2. fejezetében sorolom fel. A költségek becslésénél figyelembe vettem a nemzeti termék csökkenését is a munkából való kiesés eredményeképpen. Az adatbankot az Országos Onkológiai Intézet statisztikai adatainak felhasználásával töltöttem fel, összevetve azt a EU Németországra elfogadott értékeivel.

4. A tervezési üzemzavarok analízise a Kutatóreaktor és a paksi atomerőmű esetében

4.1. A Kutatóreaktor

Ebben a fejezetben a Kutatóreaktor tervezési üzemzavarainak kibocsátását és ennek környezeti következményeit kísérhetjük figyelemmel. A feltételezett üzemzavarok fogalmának tisztázását követően, a kiindulási adatok birtokában három különböző fokozatú fűtőelem károsodással ismerkedhetünk meg. Majd lépésről lépésre végigkövethetjük a radioaktív anyagok útját, melynek során a radioaktív anyagok a fűtőelemből kikerülve bejutnak a primer vízbe, majd onnan a víztér feletti részbe, onnan pedig a szellőzési állapottól függően a reaktorcsarnokon és a kéményen (illetve nyílászárón) keresztül a környezetbe. A kidolgozott modell részletes leírása és bemutatása a Mellékletben történik, a modellel kapott kiinduló forrástagokat pedig a Függelékben találjuk.

4.1.1. A feltételezett üzemzavarok fogalma

Feltételezett üzemzavarok a Kutatóreaktor élete során valószínűleg egyáltalán nem lépnek fel, de a biztonsági rendszerek megfelelő tervezésével biztosítani kell, hogy a Kutatóreaktor még azok esetleges fellépése esetén se jelentsen számottevő veszélyt a környezetre és a személyzetre. A feltételezett üzemzavaroknál tehát a fűtőelemek jelentős mértékű károsodását kell kizárni. Ennek előfeltétele a fűtőelemburkolat hőmérsékletének 500°C alatti értéken tartása, ugyanis ezen érték felett a burkolat a hasadóanyagot tartalmazó résszel intenzív kémiai reakcióba lép, ami megengedhetetlen mértékű károsodáshoz vezet. (Hasonló célokat szolgál cirkónium-burkolatú atomerőművi fűtőelemekre az 1200°C burkolathőmérséklet korlát). A Kutatóreaktor esetében egy fűtőelem különböző mértékű meghibásodása sorolható ezen fentebb említett feltételezett üzemzavarok kategóriájába.

4.1.2. Fűtőelem károsodások

FK1

Az FK1 kategóriájú esetben, a károsodást erősen felülbecslő modell szerint 34 cm^2 összfelületű lyukadással fűtőelem meghibásodás jön létre. Azt a legrosszabb esetet vizsgáltam, amikor a károsodás után $t_0 = 200\text{ h}$ időtartamig folyik a hasadóanyag- és hasadvány kioldódás a primerkörüi vízbe. A fűtőelem meghibásodáskor fellépő kioldódási sebességet erre az erősen konzervatív esetre $10^{-5}\text{ cm}^3/\text{h}$ -nak vettük [46, 47].

FK2

Az FK2 esetben egy fűtőelem megolvadásával számoltam $t_0 = 0,1\text{ h}$ alatt, úgy, hogy az olvadás a vízfelszín alatt történik. Amint azt a biztonsági analízis bizonyítja, ez a helyzet nagyon kis valószínűséggel fordulhat elő, de a sugárzási következmények elemzését célszerű volt elvégezni.

FK3

Az FK3 esetben ugyancsak egy fűtőelem megolvadásával számoltam $t_0 = 0,1\text{ h}$ alatt, úgy, hogy az olvadás a szárazra került zónában játszódik le. Az FK3 kategóriába tartozó folyamatok

esetén a megolvadt fűtőelem-lemezből a teljes nemesgáz-tartalom, a jódizotópok, továbbá az egyéb illékony radioaktív anyagok 100%-a azonnal a gőztérbe kerül.

4.1.3. Zónaleltár

A fűtőelemek hasadvány aktivitás tartalmát a [48] adatainak felhasználásával számoltam ki és azokat súlyosságuk alapján, alapos mérlegelés alapján (kibocsátott energia, felezési idő, terhelési útvonal, stb.) választottam ki a későbbi elemzésekhez, melyeket a I. függelék 11.1.1-1. táblázatában foglaltam össze. A fűtőelem megolvadásakor valamennyi illékony hasadvány kilépését feltételeztem.

4.1.4. Épületen belüli terjedésszámítás

A hasadvány termékek reaktorcsarnok légterébe kerülésének modellje

A reaktorcsarnok légterében a hasadványok összaktivitásának $x(t)$ időbeli változását a következő tényezők szabják meg:

Hasadvány szivárgás a reaktorfedél alól

Az egységnyi idő alatt a víztér fölé kikerülő aktivitás [Bq/h] időbeli változását egy $A(t)$ függvény írja le, amelynek meghatározásában egy adott üzemzavarnál számos tényező játszik szerepet (a fűtőelem sérülés mértéke, a primer hűtőkör turbulens áramlása, a hasadványok kölcsönhatása a tartályban stb.). A víztér feletti elszívás mértéke, a fedél tömítetlensége, illetve a csarnokban uralkodó nyomásviszonyok (szellőzési állapot) szabják meg a reaktorfedél alól a csarnok légterébe kerülő hasadványok összaktivitását, amely egy adott időpillanatban: $\varepsilon A(t)$, ahol ε a reaktorfedél fölé, a csarnokba történő szivárgás együtthatója, amely a szellőzési állapottól függő paraméter.

Radioaktív bomlás

A hasadványok a sérült fűtőelemből kikerülve bomlásállandójuknak (λ) megfelelően radioaktív bomlást szenvednek a pillanatnyi összaktivitás arányában [$\lambda x(t)$].

Kiüledés

A reaktorcsarnok légterébe kibocsátott radioaktív anyag összaktivitása csökken a padlózatra és a falra történő "kiüledés" következtében is. A bonyolult kémiai és fizikai kölcsönhatást modellező üledési sebesség (k) értékei a szakirodalomból állnak rendelkezésünkre. Az egységnyi felületre óránként kiüledő aktivitás arányos a pillanatnyi aktivitás koncentrációval: $k \cdot x(t)/V$, ahol V a csarnok térfogata.

Kibocsátás

A reaktorcsarnok szellőzésének különböző működési állapotainál az állapotnak megfelelő légcseres sebesség (θ) értékekkel kell számolnunk. Figyelembe kell vennünk továbbá a szellőző rendszerbe épített különféle (aeroszol és jód) szűrő szűrési hatásfokát is (1.1 Melléklet). Ezek alapján a reaktorcsarnok légterében egyenletes koncentrációt feltételezve (tökéletes keveredés) a hasadványok összaktivitásának időbeli változását a következő differenciálegyenlet írja le:

$$dx(t)/dt = \varepsilon A(t) - \lambda x(t) - kFx(t)/V - \theta x(t)/V \quad (4.1.4-1.)$$

összevonva:

$$\begin{aligned} dx(t)/dt &= \varepsilon A(t) - Kx(t), & (4.1.4-2.) \\ \text{ahol } K &= \lambda + kF/V + \theta/V \end{aligned}$$

- $x(t)$ – a hasadvány termékek összaktivitása a csarnok légterében t időpillanatban [Bq],
 V – a reaktorcsarnok térfogata [m^3],
 ε – a reaktorfedél alól a csarnokba kerülő hasadványok hányada adott szellőzési állapotnál,
 $A(t)$ – a reaktor primer víz felszínéről a fedél alá jutó hasadványok kibocsátási sebessége [Bq/h]
 k – ülepedési sebesség [m/h]
 θ – légcseres sebesség [m^3/h] (természetes + szellőzés)
 λ – bomlásállandó [h^{-1}]
 F – a reaktorcsarnok felszíne [m^2].

A differenciálegyenlet megoldása nagymértékben egyszerűsödik, ha feltételezzük, hogy a hasadványok kibocsátási sebessége állandó, tehát $A(t) = \text{konstans}$. Ilyen esetben az egyenlet megoldása a vízből történő kikerülés időtartamára ($t < t_0$):

$$\text{összaktivitásra } x(t) = \varepsilon A/K (1 - e^{-Kt}), \quad (1)$$

$$\text{koncentrációra } y(t) = \varepsilon A/KV (1 - e^{-Kt}). \quad (2)$$

A vízből történő kikerülés befejeződését követően ($t > t_0$):

$$\text{összaktivitásra } x(t) = \varepsilon A/K (e^{Kt_0} - 1) e^{-Kt} \quad (3)$$

$$\text{koncentrációra } y(t) = \varepsilon A/KV (e^{Kt_0} - 1) e^{-Kt}. \quad (4)$$

Ezen összefüggéseket felhasználva bemutatom a környezetbe történő kibocsátás modelljét a szellőzés különböző állapotainál a Melléklet 10.1. fejezetében, valamint a kikerülési modelleket felhasználó kódrendszert a Melléklet 10.2. fejezetében. Az egyes szellőzési állapotokat, fontosabb geometriai és szellőzési paramétereket sematikus ábrákon illusztrálom (10.1.1/1-4 ábra).

4.1.5. Épületközelben számított következmények

Forrástag meghatározás

A Melléklet 10.1. fejezetében leírt modellek és a Melléklet 10.2. fejezetében leírt kódrendszer segítségével becsültem a környezetbe távozó nuklidspecifikus aktivitásokat. Ezeket a mennyiségeket a Függelék 11.1.1-1. táblázatában foglaltam össze. Az aktivitásterjedéshez, illetve a dózisbecslések számításához a 4. szellőzési állapot (természetes szellőzés) adatait használtam fel.

Dóziskövetkezmények becslése

A dóziskövetkezményeket a Függelék 11.1.1-2...11.1.1-5. táblázataiban bemutatott kibocsátásokat felhasználva becsültem meg. A rendelkezésünkre álló számítógépi kódok (PC CREAM, PC COSYMA stb.) az épület közvetlen közelében nem írják le megfelelő pontossággal a radioaktív anyagok terjedését a környezetben. A kódok ilyen irányú hiányosságát pótolva irodalmi adatok alapján – a 2.1.3. fejezetben leírt összefüggéseket felhasználva – tanulmányoztam az épületek perturbáló hatását a Kutatóreaktor környezetében.

Az épület geometriai paramétereit leegyszerűsítve, különböző szélirányokat feltételezve határoztam meg az ún. recirkulációs tartományt, illetve abban a koncentráció növekedését. A reaktorépület körül elhelyezett (a 5.1.3-1. ábrán bemutatott) négy gamma-szonda (10, 11, 7 és 15-ös gamma-szonda) helyén becsültem a várható aktivitáskoncentrációkat és a detektorok jelzését a három különböző fűtőelem károsodás esetén. A várható dózisteljesítményeket és a dózisteljesítmény-növekedési tartományt a 4.1.5-1. táblázatban foglaltam össze. A kibocsátásnál a 4.

szellőzési állapotból indultam ki, tehát amikor a kibocsátás a természetes szellőzéssel – az épület nyílászáróján keresztül – jut ki a környezetbe. A kéményen történő kibocsátásnál az épülethez közeli tartományokban szignifikáns dózisznövekmény nem jelentkezik [49].

A 5.1.3. fejezetben a bemutatott kísérletekkel megerősített, egységnyi kibocsátásra vonatkozó detektorjelzés kísérleti meghatározását, amely ezen eredményeket megerősítette. Ezen eredmények – melyek bekerültek a Kutatóreaktor Balesetelhárítási Tervébe [7] jól alkalmazható az üzemzavar súlyosságának gyors megítéléséhez.

4.1.5-1. táblázat. A Kutatóreaktor körüli detektorok jelzéseinek becslése különböző fűtőelem károsodásnál

Fűtőelem károsodási eset	Dózisteljesítmény az adott széliránynál és szondánál				Dózis-teljesítmény tartomány
	DK 10-es szonda	DNy 11-es szonda	ÉK 7-es szonda	ÉNy 15-es szonda	
FK1	22 nGy/h	72 nGy/h	46 nGy/h	65 nGy/h	22-72 nGy/h
FK2	4,2 mGy/h	13,3 mGy/h	8,4 mGy/h	12,1 mGy/h	4-13 mGy/h
FK3	15,2 mGy/h	49 mGy/h	31 mGy/h	44 mGy/h	15-49 mGy/h

4.1.6. Telephelyen kívüli következmények

Forrástag

A Melléklet 10.1. fejezetében leírt modell és a Melléklet 10.2. fejezetében leírt kódrendszer segítségével kiszámoltam a környezetbe a reaktorkéményen (illetve 4. szellőzési állapotban a nyílászárón) kikerülő nuklidspecifikus aktivitásokat (Függelék 11.1-2....11.1-5. táblázat). A távozó aktivitásokról a következőket mondhatjuk: a távozó aktivitás a 3. szellőzési állapotban a legkisebb (recirkulációs szellőzési állapot). Ehhez legközelebb álló értékek mutatkoznak meg a 4. szellőzési állapotban (természetes szellőzési állapot), itt azonban az alacsony kibocsátási magasság (8,5 m) miatt a környezeti hatások az épület környezetében fokozottabbak, így a recirkulációs állapot üzemeltetése valóban indokolható. Míg az adott nuklidcsoporton belül – az egy fűtőelem leltárához viszonyított kibocsátási százalék meghatározásában – kizárólag a bomlásállandó a meghatározó, addig a nuklidcsoportok között egyéb tényezők, a szűrési határfok, az ülepedési sebesség különbözősége érvényesül.

Dózisbecslés

A környezeti dózist az esemény egész időtartama alatt a kéményen és az épület nyílászáróin keresztül kiszivárgó radioaktív anyagokra számítottam. A lakosság egyedeinél nem tételeztem fel semmilyen védelmet.

A PC COSYMA program alkalmazásával a Kutatóreaktor három különböző fűtőelem károsodásánál, különböző szellőzési állapotok feltételezésével a dózisok a megjelölt referenciapontban (1 km-re a kibocsátási ponttól a csóvatengelyben) a 4.1.6/1-2. táblázat szerint alakultak. A dózisbecsléseknél a felhő, a talaj és az inhalációs terhelési útvonalakat vettem figyelembe.

4.1.6-1. táblázat. A környezetben fellépő maximális sugárterhelés három különböző fűtőelem károsodásnál (effektív dózis Sv-ben 7 napra 1 km-re a kibocsátási ponttól)

Fűtőelem károsodás	Szellőzési állapot			
	1. normál szellőzés	2. üzemzavari szellőzés	3. recirkulációs szellőzés	4. természetes szellőzés
FK1	3,2 E-08	3,2 E-08	2,4 E-09	5,8 E-09
FK2	8,8 E-06	8,9 E-06	6,6 E-07	6,7 E-07
FK3	8,9 E-06	9,0 E-06	6,7 E-07	1,2 E-06

4.1.6-2. táblázat. A környezetben fellépő maximális sugárterhelése három különböző fűtőelem károsodásnál (50 évre lekötött pajzsmirigy dózis Sv-ben 1 km-re a kibocsátási ponttól)

Fűtőelem károsodás	Szellőzési állapot			
	1. normál szellőzés	2. üzemzavari szellőzés	3. recirkulációs szellőzés	4. természetes szellőzés
FK1	5,8E-08	5,1E-08	3,5E-09	8,1E-08
FK2	1,1E-05	1,1E-05	7,7E-07	2,1E-06
FK3	1,4E-05	1,3E-05	9,1E-07	1,5E-05

4.1.7. Értékelés

Fontos irányelv, hogy a tervezési üzemzavaroknak úgy kell végbemenni, hogy a környezetben sürgős védőintézkedések bevezetésére ne legyen szükség. Amint a 4.1.6/1-2. táblázatokból látható a korai védőintézkedésekre vonatkozó korlátokat (a 16/2000.EüM rendelet szerint meghatározott – *elkerülhető dózisban megfogalmazott* – értékeket: elzárkózásra 10 mSv/2 nap, a kimenékitésre 50 mSv/hét és jódprofilaxisra 100 mGy lekötött elnyelt dózist) a kritikus lakosságra vonatkoztatott csoportra egy esetben sem érjük el.

4.2. Paksi atomerőmű

4.2.1. A tervezési üzemzavarok fogalma

Kis valószínűséggel ugyan, de bekövetkezhet olyan esemény az erőmű élettartama során, mely olyan okokból (pl. belső anyaghiba miatti csőtörés, természeti katasztrófa stb.) származik, amelyet az állandó ellenőrzések ellenére sem zárhatunk ki [50]. Olyan rendszerekre van szükség, amelyek segítségével a várható helyzet kezelhető. Erre szolgálnak a biztonsági rendszerek, amelyeket úgy kell megtervezni, hogy automatikusan induljanak, és az emberi beavatkozást csak egy bizonyos idő múltán – amikor a körülmények már pontosan ismertek és áttekinthetőek – szabad megengedni. Ezen üzemzavarok esetén ezek a rendszerek megőrzik az aktív zóna épségét. A radioaktív anyagok kibocsátása így a megfelelő szintre szorítható még a legrosszabb várható, a tervezésnél figyelembe

vett üzemzavar esetében is. Ezen eseményekkel már az erőmű tervezése során foglalkoztak [51] és azóta számos projekt keretében [20] újraelemeztem a várható következményeket. Szokásos elnevezés a *tervezési üzemzavar* (Design Basis Accident, DBA, illetve a szakirodalomban használatos még a *posztulált üzemzavar* (Postulated Accident, PA) fogalom is.

4.2.2. Forrástagok

A paksi atomerőmű Végleges Biztonsági Jelentés [20] 15. fejezetének elkészítése során célul tűztük ki az üzemzavar következtében előálló aktivitáskibocsátások és azok környezeti következményeinek elemzését. Főrendszerbeli meghibásodások esetén a kibocsátások alapjául szolgáló anyagmozgások termohidraulikai számításai a TRASS riportokban található [52]. A bypass esetek következményeinek becslése korábban az [53] tanulmányban került meghatározásra, melyek későbbiekben a spiking figyelembevételével egészültek ki [20]. *Alrendszerbeli* meghibásodások esetén a kibocsátási adatokat az ERŐTERV korábbi számításait [54] felhasználva végeztem el, melyek a [55] elemzésben kerültek bemutatásra. *Főrendszerbeli* meghibásodások esetén a vizsgált konténment folyamatok a következő primerköri csőtöréses üzemzavarokkal kezdődnek, (a felsorolásnál feltüntettem a kifolyás-számításokat tárgyaló TRASS reportok [52] kódszámait is):

1. NÁ 73 mm-es 1 sz. víztisztító vezeték törése az 5. hurokban 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével (Kód: 73a2r)
2. NÁ 90 mm-es összekötő vezeték törése a TK és a biztonsági szelep között 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével. (Kód: 90tka2)
3. NÁ 90 mm-es TK befecskendező vezeték törése 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével. (Kód: 90cca2)
4. NÁ 111 mm-es NNY ZÜHR vezeték törése az 5. hurokban 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével. (Kód: 111a2)
5. NÁ 233 mm-es KNY ZÜHR vezeték törése a 4. hurokban 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével. (Kód: 233a2)
6. NÁ277 jelű töréses üzemzavar (Kód: 277a2)
7. NÁ 492 mm hidegági vezeték törése a 4. hurokban 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével és maximális ZÜHR konfiguráció alkalmazásával. (Kód: 492a2)
8. NÁ 492 mm hidegági vezeték törése a 4. hurokban 108% teljesítményen, teljes feszültségkiesés feltételezésével. A TN és UH szellőző rendszerek hermetizáló szerelvényei 5 s késleltetéssel zárnak. (Kód: 492a2TNUH5)
9. NÁ 492 mm melegági vezeték törése a 4. hurokban 108% teljesítményen, 2 sprinkler rendszer működésével (Kód: 492am)
10. Nyomástartó szelepnyitás

4.2.3. A determinisztikus analízis kiinduló paraméterei

Meteorológia

Az elemzések elkészítésénél az erőmű környezetében uralkodó meteorológiai viszonyokat tételeztem fel (amely egyébként a kritikus lakossági csoport szempontjából maximális dózisterhelést eredményezett). A becsléseknél semleges – Paks környezetében uralkodó (Pasquill D) - stabilitási kategóriát, kis intenzitású csapadékot, továbbá a kritikus lakosság irányába tartó szélirányt tételeztem fel.

A kritikus lakossági csoport

A kritikus lakossági csoport megállapításához léteznek nemzetközi ajánlások [56, 44, 45] és a különböző országok gyakorlatában általában közös jellemzőnek tekinthető, hogy egy olyan korösszetétele, fogyasztása, vagy egyéb sajátosságai következtében legnagyobb sugárterhelésnek kitett csoport tagjait veszik alapul, akik a létesítmény körüli településen élnek.

A légköri úton kikerülő aktivitástól eredő terhelés esetén kritikus csoportnak az erőmű déli bejáratával szemben levő kis település (Csámpa puszta) zömében felnőttekből álló lakosságát választottam. Konzervatívan feltételezhetjük, hogy a szélirány az üzemzavart követően olyan irányú, hogy a település éppen a csóvatengelybe esik.

Terhelési útvonalak

Az előző pontban meghatározott meteorológiai paraméterek felhasználásával meghatározott terjedésszámításnál az alábbi terhelési útvonalakat vettem figyelembe:

Korai dózis számításánál (1 hetes expozíciót feltételezve): Felhő dózis
Talajdózis
Inhalációs dózis

Késői dózis számításánál (50 évi expozíciót feltételezve): Felhő dózis
Talajdózis
Inhalációs dózis
Táplálkozási dózis*

*Táplálkozási dózis: a számítások a PC COSYMA programban szereplő ún. ECOSYS táplálkozási modell adatainak felhasználásával történtek. Ebben a lenyelési dóziskonverziós tényezőket az ICRP 56, 67, és 69-es publikációjából vették át.

Receptor pontok: 1 km –re a kibocsátási ponttól (Csámpa község)
3 km-re a kibocsátási ponttól (az egészségügyi védőzóna határán)

4.2.4. Következmények becslése

Kiindulási adatok

Számításim eredményét későbbi táblázatainkban a felnőtt lakosságra mutatom be. Programunk felnőtt lakosságra vonatkozó adatokat számol, ez korai dózisok vonatkozásában az egy éves gyermekekre vonatkozóan mind az effektív, mind a pajzsmirigy dózis szempontjából kissé (mintegy 10-20%)-kal magasabb. (Ezt figyelembe véve, a számított dózisonak a beavatkozási szint 80% -a alatt kell maradnia, azaz a COSYMA programmal 7 napra számított értéknek effektív dózis esetében 8 mSv, lekötött elnyelt pajzsmirigy dózis esetében pedig 80 mGy alatt kell maradnia.)

Értékek értelmezése az elemzésekben:

- A *maximális* dózisterhelés becslésénél a csóvatengelyben becsült értékekkel számoltam 7 napi tartózkodást feltételezve.
- Az *átlagértékek* becslésénél a valamennyi 1 km-re számolt térszektorra számított értékek átlagértéke szerepel 7 napra, illetve 50 évre.

Korai és késői hatások elemzése

Főrendszer meghibásodások (konténmenten belüli és by-pass esetek)

A I. függelék 11.1.3-1....11.1.3-3. táblázatokban szereplő kibocsátásokból eredő dózisbecsléseket a 4.2.4-1. és a 4.2.4-2. táblázatokban tüntettem fel. Az átlagértékek mellett zárójelben feltüntettem a csóvatengelyben számolt maximális effektív dózisértékeket is.

4.2.4-1. táblázat. Dózisbecslések adatai az erőműtől 1 km-re vonatkozóan

A törés kódja	Korai effektív dózis átlag (maximum) [Sv]				Késői lekötött effektív dózis átlag [Sv]	
	Száras idő		Esős idő		Száras idő	Esős idő
73a2	1,8E-07	(3,5E-06)	6,6E-07	(1,3E-05)	9,1E-06	1,3E-04
90cca2	6,4E-08	(1,2E-06)	2,3E-07	(4,4E-06)	3,1E-06	1,6E-05
90tka2	2,9E-07	(5,5E-06)	1,07E-06	(2,6E-05)	1,1E-05	2,3E-04
111a2	3,3E-08	(6,3E-07)	1,8E-07	(2,2E-06)	1,6E-06	2,4E-05
233a2	1,4E-07	(2,7E-06)	4,1E-08	(7,6E-07)	2,8E-05	1,9E-06
277a2	1,3E-07	(2,5E-06)	4,7E-07	(8,9E-06)	6,3E-06	9,4E-05
492a2	1,4E-07	(2,6E-06)	5,0E-07	(9,2E-06)	6,3E-06	9,8E-05
492a2TNUH5	7,2E-07	(1,3E-05)	2,5E-06	(4,7E-05)	3,1E-05	4,7E-04
492ma	8,9E-07	(1,7E-05)	3,1E-06	(6,0E-05)	4,2E-05	6,2E-04
Nyomástartó szelepnnyitás	1,0E-10	(2,0E-09)	3,7E-10	(7,0E-09)	4,9E-09	7,2E-08

4.2.4-2. táblázat. Dózisbecslések adatai az erőműtől 1 km-re vonatkozóan

Meghibásodás	Korai effektív dózis átlag (maximum) [Sv]				Késői lekötött effektív dózis átlag [Sv]	
	Száras idő		Esős idő		Száras idő	Esős idő
3 csőtöréses esemény	7,0E-6	(9,5E-5)	9,5E-6	(1,3E-4)	6,8E-4	4,0E-3
Kollektorfedél felnyílás	7,2E-6	(9,8E-5)	9,9E-6	(1,3E-4)	7,0E-4	4,1E-3

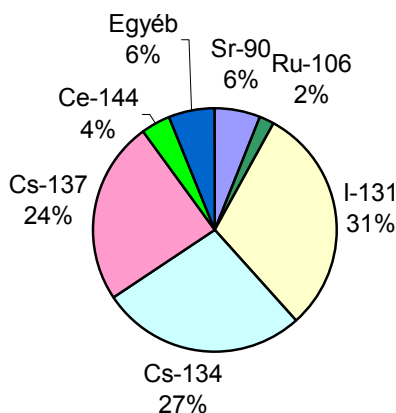
A lekötött elnyelt pajzsmirigy dózis a csóvatengelyben kollektorfedél felnyílásos esetben, (amelynél a jódkibocsátás a legnagyobb – 2,975E+13 Bq): 2,2 E-03 Sv.

Értékelés és a kritériumok teljesülésének vizsgálata

A magyar szabályozás üzemzavarok esetére nem rögzíti le a dóziskorlátokat. A következmények súlyosságának becsléséhez szükség volt ún. kritériumok felállítására. Ugyanakkor léteznek a nemzetközi ajánlásokban [45] és a hazai szabályozásokban [57] intézkedési szintek a különböző sürgős beavatkozásokra vonatkozóan. Javaslatom szerint – melyet a hatóság korábbi tanulmányokban [58, 52] már tudomásul vett – egy nukleáris létesítmény tervezési vagy posztulált üzemzavarának úgy kell lezajlania, hogy ennek eredményeképpen (a sugárterhelésnek leginkább kitett) kritikus lakosság körében se kelljen védőintézkedést elrendelni.

A főrendszerbeli meghibásodások esetén a 7 napra vonatkozó ún. korai dózisok terhelési útvonalankénti megoszlása nagy csőtöréses (492a2TNUH5, csapadékos idő) esetben a következő: felhődózis 2%, talajdózis 76%, inhalációs dózis 22%. A kibocsátásra került 39 radionuklid dózisterhelési járuléka a következőképpen alakulnak: Zr-95 – 9%, Ru-103 – 5%, Ru-106 – 4%, Te-132 – 10%, I-131 – 20%, I-133 – 12%, I-135 – 6%, Ba-140 – 19%, La-140 – 6%, Ce-144 – 2%, egyebek – 11%.

Az 50 évre vonatkozó ún. késői dózisok terhelési útvonalankénti megoszlása ugyanezen esetben a következő: talajdózis – 3%, inhalációs dózis – 0%, táplálkozásból eredő dózis – 97%. A táplálkozásból eredő dózisterhelés nuklidonkénti megoszlása: Sr-90 – 6%, Ru-106 – 2%, I-131 – 30%, Cs-134 – 27%, Cs-137 – 24%, Ce-144 – 4%, egyebek – 6% (4.2.4-1. ábra). A teljes dózisterhelésért és a fogyasztási dózisterhelésért is zömében három radionuklid, a I-131, a Cs-134 és a Cs-137 a felelős.



4.2.4-1. ábra. A táplálkozásból eredő dózisterhelés nuklidonkénti megoszlása

A sugárzási következményeket összefoglaló táblázatok alapján a következőket állapíthatjuk meg:

Főrendszerbeli meghibásodások esetén – a korai védőintézkedésekre vonatkozó korlátokat (a 16/2000. EüM rendelet szerint [57] meghatározott – *elkerülhető dózisban megfogalmazott* – értékeket elzárkózásra 10 mSv/2 nap, a kimenekítésre 50 mSv/hét és jódprofilaxisra 100 mGy lekötött elnyelt dózist) egy esetben sem érjük el.

Alrendszerbeli meghibásodások esetén hasonló következtetéseket vonhatunk le, ezek eredményeit a Végleges Biztonsági Jelentés 15. fejezetében [20] foglaltam össze.

5. A nagy radioaktív kibocsátással járó, súlyos balesetek analízise

5.1. A Kutatóreaktor súlyos balesetének determinisztikus elemzése

Az atomerőművekkel ellentétben kutatóreaktorok súlyos balesetének elemzésére a nemzetközi ajánlások determinisztikus elemzést javasolnak. Épületközele és a reaktortól távolabbi környezetben különböző modelleket alkalmaztam a következmények meghatározására. A reaktor végleges biztonsági jelentésében [6] szereplő baleseti elemzés a legsúlyosabb végállapotra vonatkozik, amelyet teljes zónaolvadásnak, vagy TZO végállapotnak nevezünk.

5.1.1. A baleseti szcenárió

Ha valamilyen súlyos külső hatás következtében a nyomóoldali NA 400 csővezeték eltörik, akkor ezt követően mintegy 30 másodperccel a zóna szárazra kerül. Feltételezve, hogy a víz utánpótlását a súlyos külső hatás szintén megakadályozza, a fűtőelemek hőmérséklete 2°C/s sebességgel nő, mindaddig, amíg kb. 5 perc alatt eléri az olvadáspontot (650°C). Az olvadáspontot elérve a fűtőelemek további 5-10 perc alatt megolvadnak és lecsepegnek (cseppméret: $\varnothing 6 \text{ mm}$) részben a zónarácsra, részben a tölcséren keresztül a sérült vezeték könyökrészébe, amelyet percekben belül átolvaszt és továbbcsepeg a tartály alatti rozsdamentes acélból készült tálcába. A keletkező hőt (a becsült teljesítmény a 10. percben 200 kW) részben a tálcában lévő mintegy 6 m^3 víz, részben a természetes cirkuláció és a beton hővezetése viszi el. A víz a hasadványok bomlása által termelt hő hatására várhatóan 1 hétig marad forrásban. Az elpárolgó víz mennyisége legfeljebb 6 m^3 , azonban a hideg beton felületen történő lecsapódás és visszafolyás miatt valószínűleg jóval kevesebb, tehát a becslés konzervatív.

Az olvadt állapotú fűtőelemekből a megszilárdulásig a radioaktív nemesgázok 100%-a, az illékony jódizotópok 4%-a, a tellúr és cézium 2%-a, a ruténium 1%-a, míg a nem illékony izotópok 0,02%-a lép ki a reaktor betonárnyékolásán belüli légtérbe. A folyamat időtartama 0,1 óra. A kavitációs korrózió következtében a megolvadt, majd megszilárdult gömbök felülete korrodeálódik a forrásban lévő vízben. Az oldódási sebesség $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ mm/nap}$ pH = 6-7 esetén. Egy heti korróziót figyelembe véve a teljes olvadt zóna (220 kg) 1%-a, azaz 2,2 kg, illetve az ennek megfelelő hasadvány mennyiség oldódik fel. A légtérbe az oldatba ment jódizotópok 100%-a gőz, míg a többi illékony és nem illékony izotóp 1%-a aeroszol formában távozik. A folyamat egyenletes sebességgel 1 hétig tart.

5.1.2. Kibocsátás számítás

Elemzéseimet a teljes zónaolvadás mindkét fázisára (a csepegési és a kavitációs fázisra) is elvégeztem. A feltételezések szerint valamennyi ablak betörik a csarnok két oldalfalán ($2 \cdot 63 \text{ m}^2$ felület), a levegő kiáramlási sebessége pedig 2 m/s. A távozó levegő aktivitáskoncentrációja a csarnokra jellemző pillanatnyi aktivitáskoncentrációjának fele (50%-os keveredés). Ezeknek a meg gondolásoknak megfelelően $2,26 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ effektív légcserevel számoltam 8,5 m-es kibocsátási magasság feltételezésével. A szivárgási hányad $\varepsilon = 1$. Az alkalmazott modell leírása a Melléklet 10.1. fejezetben található. A következő paramétereket használtam a baleseti számítások során.

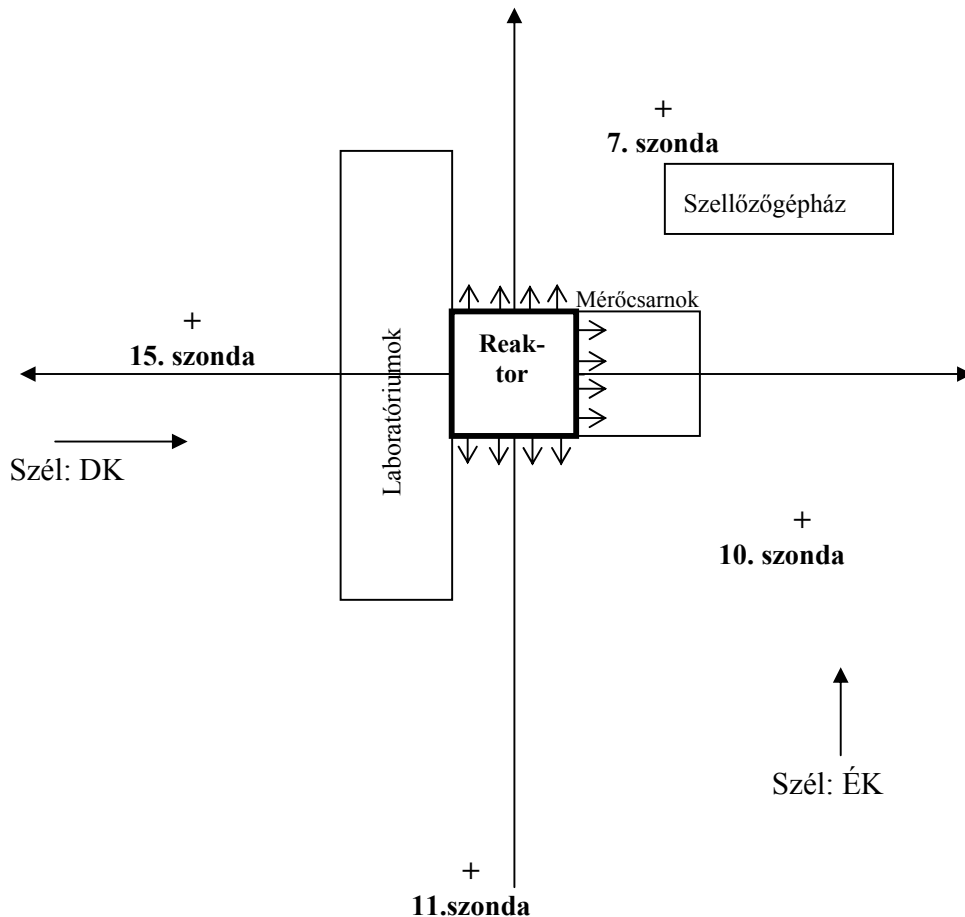
Csepegési fázis : a folyamat feltételezés szerint 0,1 óráig tart. Az öblítési befejeződése 0,5 óra.

Kavitációs fázis : a folyamat feltételezés szerint 150 óráig tart. Az öblítési befejeződése 150,5 óra.

5.1.3. Épületközeli dózisbecslés

Az épület nyílászáróin kikerülő aktivitásokat a Melléklet 10.1. fejezetében leírt modellek és a Melléklet 10.2. fejezetében leírt kódrendszer segítségével számoltam ki. A kódrendszer alkalmazása során a Függelék 10.1.1-3. táblázatban rögzített kikerülési ($A(t)$) paramétereket használtam fel [46, 47]. A kiszámolt távozó aktivitások ismeretében (Függelék 11.1.1-2....11.1.1-5. táblázat) a 2.1.3. fejezetben leírt összefüggéseket felhasználva tanulmányoztam az épületek perturbáló hatását a reaktor környezetében.

Az épület geometriai paramétereit leegyszerűsítve, különböző szélirányokat feltételezve határoztam meg az ún. recirkulációs tartományt, illetve abban a koncentráció növekedését. A reaktorépület körül elhelyezett, az 5.1.3-1. ábrán bemutatott négy gamma-szonda (10,11,7 és 15-ös gamma-szonda) helyén megbecsültem a várható aktivitáskoncentrációkat és a detektorok jelzését teljes zónaolvadás esetén. A várható dózisteljesítményeket és a dózisznövekedési tartományt az 5.1.3-1. táblázatban foglaltam össze. A kibocsátásnál értelemszerűen a 5. szellőzési állapotból (Melléklet 10.1.2-1. ábra) indultam ki, tehát amikor a kibocsátott aktivitás gyors lefolyású, ún. haváriaszerű kitoréssel – az épület kitört nyílászáróján keresztül – jut ki a környezetbe.



5.1.3-1. ábra. A modellezésnél használt épületek és detektorok elhelyezési vázlatja

5.1.3-1. táblázat. Teljes zónaolvadás esetén becsült dózisteljesítmények a Kutatóreaktor körüli pontokban

TZO fázis	Szélirány				Dózis- teljesítmény tartomány
	DK 10-es szonda	DNY 11-es szonda	ÉK 7-es szonda	ÉNY 15-ös szonda	
Csepegési	0,67 Gy/h	2,17 Gy/h	1,38 Gy/h	1,98 Gy/h	0,7-2,2 Gy/h
Kavitációs	21 μ Gy/h	68 μ Gy/h	43 μ Gy/h	62 μ Gy/h	20-70 μ Gy/h

Az alkalmazható módszer előnye, hogy lényegében csak a szélesebbesség ismeretére van szükség, maga a szélirány a detektorjelzés arányokból becsülhető. Hátrányként megemlítendő, hogy a kibocsátás és a dózisteljesítmények közötti összefüggést csak idealizált irodalmi adatok alapján határoztam meg. A módszer pontosításához feltétlenül szükség volt szélcsatornás modellkísérletekre, ezek célja a tényleges épületalak esetén, különböző szélirányoknál fellépő koncentrációmezők meghatározása.

Receptorpontok

A modellezésnél használt épületek és detektorok elhelyezési vázлата és a DK-i és ÉK-i szél iránya az 5.1.3-1. ábrán látható.

Szélcsatorna kísérletek

A radioaktív anyagok heves, haváriaszerű kitörése esetén a következmények elemzésére a Műszaki Egyetem Áramlástan Tanszékén a reaktorépület együttesének 1:250-es modelljét megépítve, olajköd szimulációval és lézersíkossal vizsgálta a szennyezőanyag eloszlását a reaktorépület környezetében. A közvetlen környezetben a szélcsatorna kísérletek eredményeképpen [9] az 5.1.3-2. táblázatban szereplő dózisteljesítmény konverziós értékekkel kell számolnunk a reaktor épületének környezetében elhelyezett detektorok helyén:

5.1.3-2. táblázat. Szélcsatorna kísérletek alapján meghatározott dóziskonverziós tényezők délkeleti és északkeleti szélirány esetén

A szonda sorszám	Dóziskonverziós tényező [Gy/Bq], ha a szélirány	
	délkeleti	északkeleti
7	1,8E-18	6,5E-18
10	8,3E-18	1,5E-19
11	3,4E-19	8,4E-20
15	0	5,0E-19

Értékelés

Végző soron – a reaktor igen kis valószínűséggel bekövetkező súlyos baleseteinél – becsültem a reaktorépület közvetlen környezetében elhelyezett gamma-sugárzás monitorok várható jelzéseit különböző kibocsátás, szélirány és szélesebbesség kombinációknál. E számítások egy esetleges

balesetnél alapját képezhetik a gamma-sugárzás monitorok alapján végzett forrástag becslésnek. A gamma-sugárzás dózisteljesítménye alapján a kibocsátási sebességet, a teljes kibocsátás tartama alatti dózis alapján pedig a teljes kibocsátást lehet megbecsülni. A szélcsatorna kísérletek segítségével a kezdeti diszperziós (σ_y és σ_z) paramétereket is meghatároztam, melyek a nagyobb távolságban fellépő koncentrációk pontosabb becslésére adtak lehetőséget. Az eredmények jól felhasználhatóak a menekülési útvonalak és gyülekezési helyek kiválasztására, így azok beépültek a Kutatóreaktor Balesetelhárítási és Intézkedési Tervébe [7].

5.1.4. Környezeti dózisbecslés

Kiindulási adatok

Forrástag, meteorológia viszonyok, receptorpont

Az épület nyílászáróin kikerülő aktivitásokat a Melléklet 10.1. fejezetében leírt modellek és a Melléklet 10.2. fejezetében leírt kódrendszer segítségével számoltam ki. A kiszámolt távozó aktivitások ismeretében (Függelék 11.1.1-2...11.1.1-5. táblázat) a környezeti következmények determinisztikus analízisét a PC COSYMA programcsomaggal [22] végeztem el. Az elemzések során átlagos meteorológiai viszonyokat tételeztem fel (Pasquill D stabilitási kategória, csapadékmentes idő), a σ -paraméterek és az ülepedési paraméterek esetén elfogadtam a programcsomag által ajánlott értékeket. A számításokat 5 távolságra, 16 szektorra, így összesen 80 szektor-szegmensre végeztem el. Az árnyékolási tényezőknél szabadban való állandó tartózkodást tételeztem fel.

Dózisterhelési útvonalak:

A dózisszámításoknál a következő terhelési útvonalakat vettem figyelembe:

- felhődózis (a csóva átvonulásának teljes időtartamáig)
- talajdózis (a baleset bekövetkezésétől számított 1 hétig)
- inhalációs dózis (a csóva átvonulása alatt + reszuszpenzióból eredően)

A kritikus lakossági csoportnak az üdülőkörzet övezetében élő felnőtt lakosságot tekintettem a kibocsátási ponttól 1 km-re.

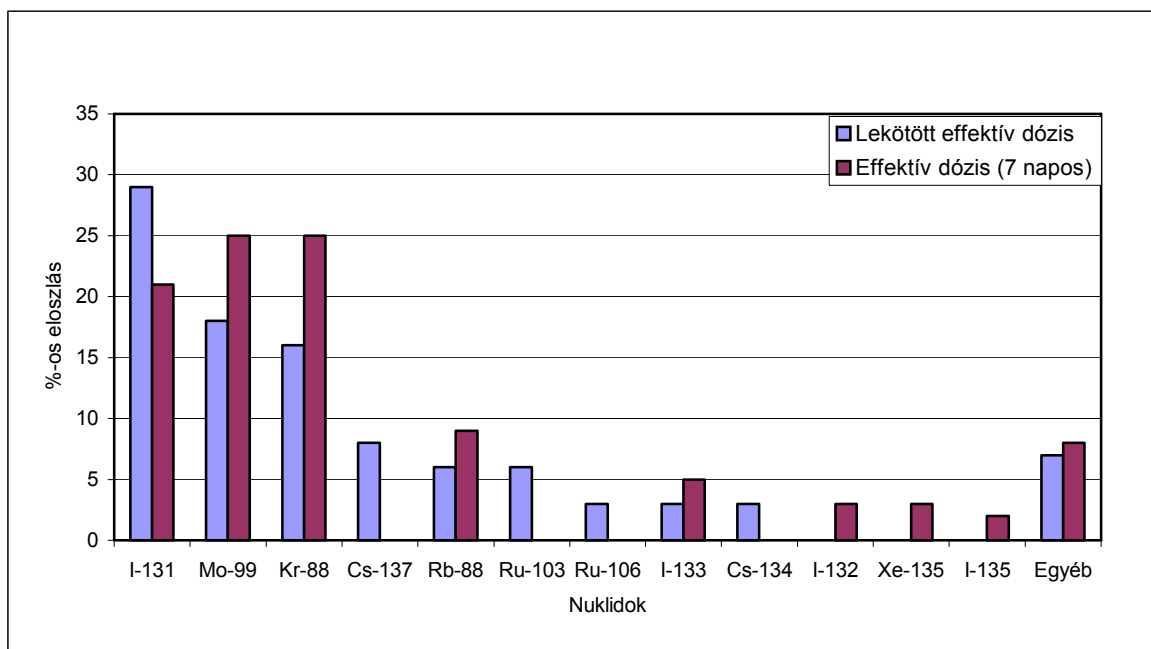
A számolt dózisok és értékelés

Az előző fejezetben leírt paraméterekkel meghatároztam a kritikus lakosság dózisterhelését 1 heti, illetve 50 éves expozíciót figyelembe véve. A járulékokat külön-külön meghatároztam a teljes zónaolvadás mindkét fázisára, tehát a csöpögési és a kavitációs szakaszban kibocsátott aktivitásra. A becsült dózisokat a csóvatengelyben mutatja az 5.1.4-2. ábra a reaktortól való távolság függvényében. A kritikus lakossági csoportra (1 km-re a reaktortól) a 7 napos expozíciót követő effektív dózis 19 mSv , a pajzsmirigy dózis 71 mGy. (Az 1km-es körgyűrűre átlagolt effektív dózis 1,3 mSv, a pajzsmirigy dózis 4,7 mGy). Az 5.1.4-1. ábra a 7 napos (átlag) effektív és lekötött effektív dózis nuklidonkénti megoszlását adja meg 1 km-en.

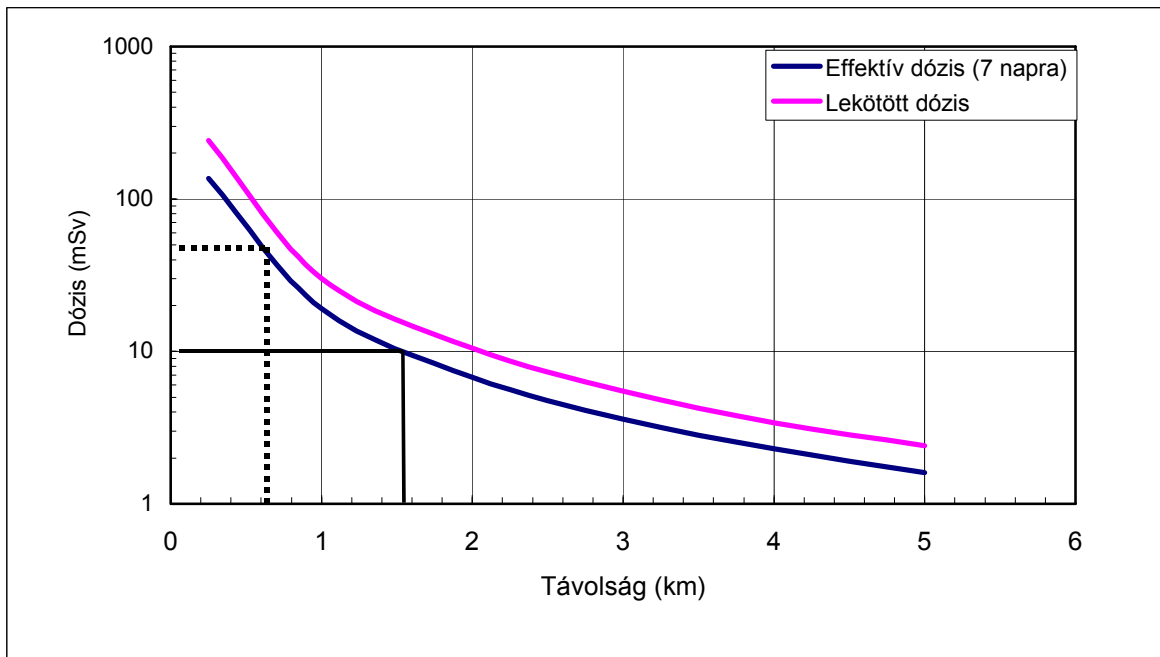
A 50 éves expozíció esetén az ún. lekötött effektív dózis 30 mSv a lekötött pajzsmirigy dózis 131 mGy. (Az átlagértékek: a lekötött effektív dózis 2 mSv, a lekötött pajzsmirigy dózis 8,6 mGy).

5.1.4-1. táblázat. Az egyes szervek 7 napos átlagdózisainak terhelési útvonalankénti megoszlása 1 km-en

Szerv	Dózis [Sv]	Terhelési útvonal		
		Felhő	Talaj	Inhaláció.
Tüdő	1,87E-02	27	11	61
Pajzsmirigy	3,37E-02	17	7	77
Szemlencse	7,65E-03	71	29	0
Ivarszerv	6,07E-03	68	30	2
Effektív	1,03E-02	47	19	34
Csontvelő	6,65E-03	69	29	2
Gyomor-bél	1,22E-02	36	15	49



5.1.4-1. ábra. A 7 napos effektív és lekötött effektív átlagdózis nuklidonkénti %-os megoszlása 1 km-en



5.1.4-2. ábra. Az effektív és lekötött effektív dózisok a távolság függvényében (csóvatengelyi adatok)

Értékelés

Az 5.1.4-1. táblázatban látjuk az egyes szervek 7 napos (átlag)dózisainak terhelési útvonalankénti megoszlása 1 km-en. Az effektív dózis fele a radioaktív csóva külső sugárzásából származik, egyharmada pedig ennek inhalációjából. Ebben a táblázatban tüntetjük fel – ugyancsak terhelési útvonalanként – az egyes szervekre vonatkozó dóziszjárulékokat. Az 5.1.4-1. ábrán a nuklidonkénti járulékokat láthatjuk a korai és a késői dózisok vonatkozásában. A domináns radionuklidok a I-131, a Mo-99 és a Kr-88 . A Cs és a Ru izotópoknak járulékaik zömében csak a lekötött effektív dózisok esetében jelentősek.

A 5.1.4-2. ábrán láthatjuk az effektív és lekötött effektív dózisok távolság függvényében történő változását (csóvatengelyi adatok). Az ábrán szaggatottal bejelöltük a 10, illetve 50 mSv-hez tartozó távolságokat (1500 m, illetve 600 m). Ugyanakkor az átlagértékek nem érik el a 2 mSv értéket, így nagyon valószínűsíthető, hogy korai védőintézkedés (kimenekítés, jódprofilaxis elrendelése) megtétele az intézet határain kívül sem válna szükségessé még ebben a legsúlyosabb baleseti helyzetben sem. A számítások eredményei beépültek a Budapesti Kutatóreaktor Balesetelhárítási és Intézkedési tervébe [7].

5.2. Paksi atomerőmű (valószínűségi elemzés)

5.2.1. A súlyos baleset

Az atomerőmű blokkjaiban igen kis valószínűséggel bekövetkezhetnek olyan események, amelyekre a blokkok nincsenek méretezve. Ezen események egy része következtében azok a korlátozások, amelyeket a tervezéstől megkövetelnek az üzemzavarok következményei tekintetében, nem teljesülnek. Ilyen esetben beszélünk súlyos balesetről. A zónasérülés nem feltétlenül jár együtt

nagy radioaktív kibocsátással. Ehhez további gátaknak kell sérülnie, ez a feltétel tovább csökkenti a súlyos környezeti következmények valószínűségét. A paksi atomerőmű biztonságának értékelése nagy radioaktív kibocsátások szempontjából c. projekt 2. szintű elemzései [59] azt mutatták, hogy a zónasérüléssel járó esetek kevesebb, mint 1%-a vezet az ún. hermetizálatlan konténment végállapotba. Míg a tervezési baleseteknél a nemzetközi gyakorlatnak megfelelően [60] determinisztikus elemzéseket végeztünk (4.2.1. fejezetet), addig súlyos balesetek esetén valószínűségi analízist végzünk és ezek eredményeit valószínűségi kritériumokkal vetjük össze.

5.2.2. Valószínűségi biztonsági analízis

Az első átfogó valószínűségi biztonsági elemzés módszereit 1975-ben fektették le atomerőművekre [61]. A módszerek és a technikai eszközök fejlődésével a valószínűségi biztonsági elemzés manapság az erőművek biztonságának megítélésének legfontosabb eszközévé vált. A nemzetközi gyakorlatban a valószínűségi biztonsági elemzés három szintre tagolódik:

Első szint (PSA – Level 1): A zónasérülés gyakoriságának meghatározása. (A zónakárosodásra vezető erőművi meghibásodások meghatározása.)

Második szint (PSA – Level 2): Konténment sérüléssel járó állapotok gyakoriságának meghatározása. (Az első szint eredményeivel kibocsátási gyakoriságok határozhatók meg.)

Harmadik szint (PSA – Level 3): Környezeti következmények meghatározása. (A második szint eredményeinek felhasználásával - forrástagok és az ehhez tartozó valószínűségek ismeretében - a lakossági kockázat határozható meg.)

Ebben a fejezetben a hármas szintű valószínűségi biztonsági analízis (PSA Level 3) paksi atomerőműre vonatkozó elemzéseinek eredményeit mutatom be. Munkám során felhasználtam a 2. szintű elemzések eredményeit [62], vagyis a konténment sérülést, illetve a hermetikus teret megkerülő ún. bypass folyamatok során kikerülő nuklidspecifikus aktivitásokat és az egyes kibocsátásokhoz tartozó gyakoriság értékeket. A forrástag, vagyis a kibocsátott radioaktív anyagok mennyisége és fajtája önmagában még nem határozza meg a környezeti következményeket, az egyéni és a kollektív kockázatot. A radioaktív anyagok környezetben történő diszperzióját és ennek következtében a várható károsító hatásukat a meteorológiai viszonyok nagymértékben meghatározzák. Nagyszámú – az erőmű körüli állapotokra jellemző – meteorológiai állapotra vonatkozóan el kellett készíteni a sugárzási, egészségügyi, gazdasági és egyéb elemzéseket. A következmények valószínűségének meghatározásában adott következményt kiváltó meteorológiai állapot gyakorisága játszik döntő szerepet.

5.2.3. Forrástagok

"A paksi atomerőmű biztonságának értékelése nagy radioaktív kibocsátások szempontjából" c. projekt [63] keretében a valószínűségi biztonsági elemzések ún. második szintjén (PSA – Level 2) történt meg az erőmű *névleges* teljesítményű üzemben fellépő belső eredetű, valamint a tűz és belső elárasztás kezdeti eseményekből és a *leállítás alatt* feltételezett belső eseményekből származó súlyos baleseti folyamatok elemzése. A vizsgált, zónasérülésre vezető baleseti állapotok közül azon igen kis valószínűséggel bekövetkező zónasérüléssel járó események környezeti hatását elemeztem, amelyeknél a baleseti esemény hermetizálatlan konténment állapotra vezet. Az összesen 15 konténment állapotra vonatkozó nuklidspecifikus aktivitásokat a I. függelék 11.2.2. fejezetben foglaltam össze. Ebben szerepelnek az egyes események bekövetkezésének valószínűségi értékei. A 15 hermetizálatlan konténment esetből összesen 9 esetben találunk nullától eltérő értéket. Jelen tanulmány ezen esetek környezeti következményeinek elemzésére terjed ki.

Az egyes szcenáriókhoz tartozó kibocsátási magasságot és a kibocsátott Cs-137 mennyiségét – mely radionuklid meghatározó a következményeket illetően - a névleges teljesítményből induló balesetekre, illetve leállási balesetekre az 5.2.3-1. és az 5.2.3-2. táblázat mutatja be.

5.2.3-1. táblázat. Névleges teljesítményből induló balesetek kibocsátási adatai 13 szcenárióra

No.	Kibocsátási magasság	Cs-137 kibocsátás [Bq]
1.	14 m	$1,40 \cdot 10^{17}$
2.	44 m	$4,75 \cdot 10^{16}$
3.	46 m	$2,28 \cdot 10^{16}$
4.	43,5 m	$3,80 \cdot 10^{14}$
5.	46 m	$9,60 \cdot 10^{14}$
6.	1 m	$4,40 \cdot 10^{14}$
7.	46 m	$1,67 \cdot 10^{15}$
8.	43,5 m	$7,98 \cdot 10^{13}$
9.	46 m	$4,75 \cdot 10^{13}$
10.	1 m	$5,13 \cdot 10^{13}$
11.	43,5 m	$4,75 \cdot 10^{14}$
12.	43,5 m	$1,25 \cdot 10^{13}$
13.	43,5 m	$6,08 \cdot 10^{12}$

5.2.3-2. táblázat. Leállási balesetek kibocsátási adatai két szcenárióra

No.	Kibocsátási magasság	Cs-137 kibocsátás [Bq]
14.	44	$2,04 \cdot 10^{16}$
15.	44	$3,32 \cdot 10^{16}$

5.2.4. Meteorológiai adatgyűjtés

A valószínűségi elemzésekhez szükség volt egy teljes évre vonatkozó adatbázisra, vagyis egy teljes év 8760 órájának adataira, azaz a stabilitási kategóriára (Pasquill kategóriában), szélirányra és szélsébségre, valamint a csapadékra jellemző adatokra.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat óránként mér Pakson meteorológiai adatokat, amelyekből a terjedésszámításokhoz szükséges mennyiségek számíthatók. A Szolgálattól egy teljes – Paks környékére jellemző – évre (1988-ra) vonatkozó hiánytalan óránkénti adatokat szereztem be, melynek szerkezete a következő volt:

- szélirány: (amerről a szél fúj, 16 szektorra osztva a teljes kört),
- szélsébség (km/óra),
- összes felhőzet (nyolcad egységben),
- óránkénti csapadékmennyiség (mm).

A Pasquill féle stabilitási kategória a Voght [64] által közölt táblázat alapján határozható meg a szélsébség, a felhőzet és a számított napmagasság értékekből. A napmagasság meghatározása a

Bencze, Major és Mészáros könyvében [65] ajánlott módszerrel végezhető el. Az eljárás fontosabb összefüggései a következők:

Ha h_0 a napmagasság (radiánban), akkor

$$\sinh_0 = \sin\phi \sin\delta_0 + \cos\phi \cos\delta_0 \cos\omega_0,$$

ahol ϕ a földrajzi szélesség,
 δ_0 a deklináció és
 ω_0 az ún. óraszög.

A δ_0 deklináció az alábbi egyenlet alapján számítható:

$$\delta_0 = 0,006918 - 0,39912 \cos u + 0,07025 \sin u - 0,006758 \cos 2u +$$

$$+ 0,00907 \sin 2u - 0,002697 \cos 3u + 0,00148 \sin 3u,$$

ahol $u = (2\pi/365)n_n$,

itt n_n az ún. napszám, melynek értéke [0-364], tehát január elsején 0.

Az ω_0 óraszög értéke délben nulla és óránként 15 fokot megy előre. Az ω_0 értékét korrigálni kell, mert a nap előbb jár mint az óránk. Ez az ún. időegyenlítés: ha az óra szerinti idő t , akkor ω_0 számításakor " $t + \tau$ "-t kell figyelembe vennünk, ahol

$$\tau (\text{perc}) = 4(\text{perc/fok}) [(\lambda - \lambda_z) + \Delta t_e (180^\circ/\pi)].$$

Itt λ a földrajzi hosszúság (fok), $\lambda = 15^\circ$ a zónaközép hosszúság és

$$\Delta t_e (\text{radián}) = 0,000075 + 0,001868 \cos u - 0,032077 \sin u -$$

$$- 0,014618 \cos 2u - 0,040849 \sin 2u.$$

Az Országos Meteorológiai Szolgálattól kapott adatokból, a vázolt összefüggések, valamint egyszerű (konverziós) számítások alapján, a szükséges meteorológiai adatfájlt összeállítottam. A teljes adatfájl 8760 sort tartalmaz az 1988-as év valamennyi órájának megfelelően.

5.2.5. Népszétségi adatgyűjtés és adatfeltöltés

A PC COSYMA által használt koordinátarendszer a CEA (Commissariat a l'Energie Atomique) által az egész Európai Közösségre kidolgozott alaprács rendszer. Egy rácselemet szélességi és hosszúsági övek szerint úgy definiáltak, hogy a rácselemek egyenlő területűek legyenek. Míg a hosszúsági övek szerinti rácsosztás növekménye állandó, addig a szélességi rácsosztás változó, így biztosítva a rácscok területének egyenlőségét, amely az első lépésben 10^4 km^2 . Az eredeti rácselemeket a CEA tovább finomította, növelve az eredeti felbontást százszorosára és így létrejöttek a 10^2 km^2 -es területi elemek. Ezen elemek hosszúsági övek szerinti léptéke $0,15^\circ$, a szélességi öv növekménye pedig a területek azonosságát biztosítja. A Magyarországot érintő szélességi és a hosszúsági övek által definiált finomított rácselemekhez tartozó népszétségi adatokat a népszámlálási adatok [66] alapján határoztam meg. Az országon kívüli területeken átlagos európai sűrűségi adatokat alkalmaztam.

Ezek az adatok bekerültek a PC COSYMA program európai népszétségi adatbázisába is. Elkészíthető a fentebb említettél még százszor kisebb rácselemből álló hálózat, azaz 1 km^2 -es területű adatbázis, amely az erőmű közvetlen környezetében élők pontosabb közelítését eredményezi. Itt valamennyi elem hosszúsági öv szerinti növekménye $0,015^\circ$, a szélességi öv növekmény az előzőekben rögzítettek tizedrésze.

5.2.6. Mezőgazdasági termelékenységi adatok

Az egész országra kiterjedően 10² km²-es rácselemekre, (megyei adatokon alapuló) statisztikai adatok [66] felhasználásával elkészítettem a mezőgazdasági termelést jellemző adatbázist a tápláléklánc alábbi fontos elemeire:

- Állatállomány (szarvasmarha + sertés + juh)
- Marhahús (kg/év)
- Marhamáj (kg/év)
- A termőterület aránya a teljes területhez (%)
- Az összes gabonatermelés (kg/év)
- Leveles zöldségek (kg/év)
- Juhhús (kg/év)
- Gyökeres zöldségek (kg/év)
- Juhmáj (kg/év)
- Tejtermelés (l)
- Tejpor termelés (kg/év)
- Burgonya és cukorrépa (kg/év)

A PC COSYMA program számításai során későbbiekben abból a konzervatív megközelítésből indulunk ki, hogy a helyben megtermelt javak ott helyben elfogyasztásra is kerülnek.

A fogyasztási adatok esetén az egyes élelmiszer csoportokra az ECOSYS (a németországi táplálkozási szokásokat modellező program) adatbázisát vettem alapul. Ezeket összevettem a [67] tanulmányban szereplő adatokkal (lásd 5.2.6-1. táblázat).

5.2.6-1. táblázat. A németországi és a hazai táplálkozási fogyasztási adatok összevetése

Élelmiszer termékek	ECOSYS [PC COSYMA] [kg/év]	Magyarországi [kg/év]
Tej és tejtermékek	115	136
Marhahús	25	5
Sertéshús	50	27
Gabonatermékek	95	88
Burgonya	70	66
Leveles zöldségek	20	29
Nem leveles zöldségek	25	37
Gyökeres zöldségek	15	22

5.2.7. Meteorológiai mintavételezés

Az egy évre vonatkozó meteorológiai adatfájl képezte egyik fontos alapját elemzéseimnek. Az adafájl 8760 sorból áll, amelynek egy sora (egy szekvenciája) tartalmazza az év adott órájára vonatkozóan a szélesség, szélirány, stabilitási kategória és csapadéokra vonatkozó információkat. Analíziseim során összesen több mint száz meteorológiai szekvenciát választottam ki, melyet két különböző mintavételezési eljárással végeztem. Megvizsgáltam, hogy a meteorológiai mintavételezés milyen hatást gyakorol a következményekre.

Ciklikus és súlyozott mintavételezés

A *ciklikus mintavételezés* során valamennyi szekvenciához azonos gyakoriságot rendelünk. A súlyos következményeket eredményező szekvenciák viszonylag ritkábban fordulnak elő. Amennyiben a ciklikus mintavételezéskor ilyen ritkán bekövetkező, de súlyos következményeket eredményező szekvenciák következményeit a kevésbé súlyos következményeket eredményező szekvenciákhoz hasonló gyakorisággal vesszük figyelembe felülbecslést végzünk. Ennek igazolására összehasonlítást végeztem a kétféle mintavételezési eljárást illetően, majd a realisabb (ún. best estimate) eljárással folytattam az elemzéseket. A ciklikus mintavételezés során a 8760 meteorológiai adatmezőből szisztematikusan választunk ki szekvenciákat, mégpedig úgy, hogy az elemzések száma – a számítógépi kapacitáskorlátok miatt - ne haladja meg a 144-et. Így az egyes szekvenciák közötti minimális óraszám eltérés 61 lehet. A reprezentatív mintavételezés érdekében ezen óraszám nem lehet a 24 többszöröse, ellenkező esetben a kibocsátás következményeit azonos napszakban elemeznénk, ami helytelen következtetések levonását vonná maga után.

Az ún. *súlyozott mintavételes* eljárás egy kifinomultabb mintavételezési módszer. Az eljárás kikényszerítheti, hogy valamennyi körülményt figyelembe vegyünk, és nem rendelünk ezekhez azonos előfordulási valószínűségeket. Ezen eljárás során a meteorológiai adatfájl várhatóan azonos következményeket eredményező szekvenciáit csoportokba soroljuk. Ezek után a szekvenciák véletlenszerűen kerülnek kiválasztásra az egyes csoportokból, amelyekhez egy valószínűséget rendelünk hozzá, figyelembe véve az egyes csoportba tartozó szekvenciák számát és az egyes csoportból kiválasztott szekvenciák számát.

A mintavételezési eljárás három lépésből áll. Az első lépésben azonosítjuk a légköri körülmények csoportjait úgy, hogy csoporton belül bármely órában történik a kibocsátás az közel azonos következményeket eredményezzen. A második lépésben a meteorológiai adatfájl valamennyi szekvenciáját hozzárendeljük egy csoporthoz. A harmadik lépésben kiválasztunk egy vagy több órát (szekvenciát) valamennyi csoportból, amelyiknél feltételezzük, hogy a baleset elkezdődik, majd a kiválasztott órához hozzárendelünk egy valószínűséget a csoport valószínűsége és csoportból mintavételezett órák száma alapján. Jelen tanulmányban összehasonlítjuk a két mintavételi eljárást és az elemzéseket a realisabb eljárással végezzük el az átfogó elemzések során.

5.2.8. Feltételes és abszolút valószínűségi eloszlások

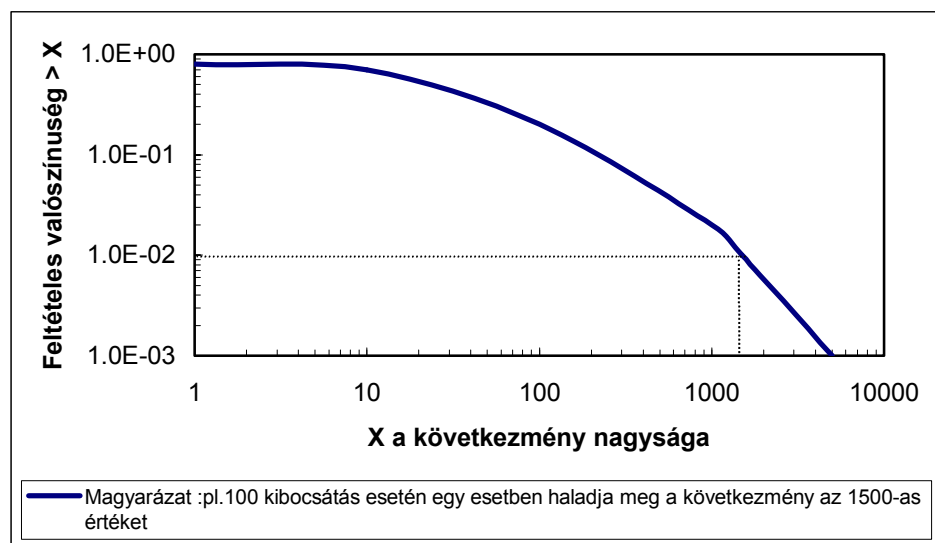
Az egyes forrástagokra végzett elemzések következményeinek valószínűsége a felhasznált 144 meteorológiai szekvencia gyakoriságából additíven tevődik össze. Ezen valószínűségek ún. feltételes valószínűségek, ugyanis feltételezzük, hogy a „forrástag” biztosan kibocsátásra kerül. A 2-es szintű elemzésekből ugyanakkor rendelkezésünkre áll az adott „forrástag”, vagy más néven kibocsátási kategória gyakorisága. Ezen két valószínűségi mutató szorzatából megadható a következmények adott forrástaghoz tartozó valószínűsége, melyeket – a forrástagok teljes spektrumára – összegezve megkapjuk az egészségügyi, gazdasági, intézkedési stb. következmények abszolút valószínűségeit.

5.2.9. Védőintézkedések modellezése

A súlyos balesetek elemzéseinél feltételeztük, hogy a nemzetközi ajánlásokban [45] és a hazai előírásokban [57] szereplő intézkedéseket időben elrendelik és azokat sikerrel végre is hajtják.

5.2.10. Az eredmények bemutatása a valószínűségi analízis során

A következmények bemutatásánál hagyományosan az ún. komplementer kumulatív eloszlásfüggvényt (angolul : **C**omplementary **C**umulative **D**istribution **F**unction, rövidítése: CCDF) szokás alkalmazni. (A szeizmológusok meghaladási valószínűséget mondanak hasonló esetben). A függvényérték egy pontja megadja annak valószínűségét, hogy a következmény egy adott értékkel egyenlő vagy azt meghaladó. A következmény gyakoriságát a hozzátartozó meteorológiai szekvencia gyakorisága fogja meghatározni és mivel az összes meteorológiai kategória eloszlását 1-re normáltam, így végső soron relatív gyakoriság eloszlást kapunk. Ezen relatív gyakoriságokat – matematikailag nem teljesen helyesen – valószínűségi értékeknek tekintjük. A CCDF függvény szemléltetése látható az 5.2.10-1. ábrán.



5.2.10-1. ábra. A kumulatív eloszlásfüggvény (CCDF) szemléltetése

Ezen (CCDF) függvénnyel együtt szokás még használni a várható értéket és a különböző ún. percentil (vagy helyesebben kvantilis) értékeket is. A várható (vagy átlagérték) a CCDF függvény integrálja és gyakran használják a kockázat összefoglaló mértékeként. A különböző mértékű percentilek (50, 90, 95, 99) könnyen származtathatóak a CCDF függvényből. A p percentilhez tartozó következményt (C_p -t) meghaladó (P) valószínűséget a következőképpen származtathatjuk:

$$P_{(C>C_p)} = 1-p/100$$

Az 50 percentil az ún. medián érték, és ezen kívül – következményenként - szokás még meghatározni a zérus következmény bekövetkezésének valószínűségét is. A tanulmány következő részében ezeket a fogalmakat használom az eredmények bemutatása során.

5.2.11. A legsúlyosabb esemény analízise különböző mintavételezéssel

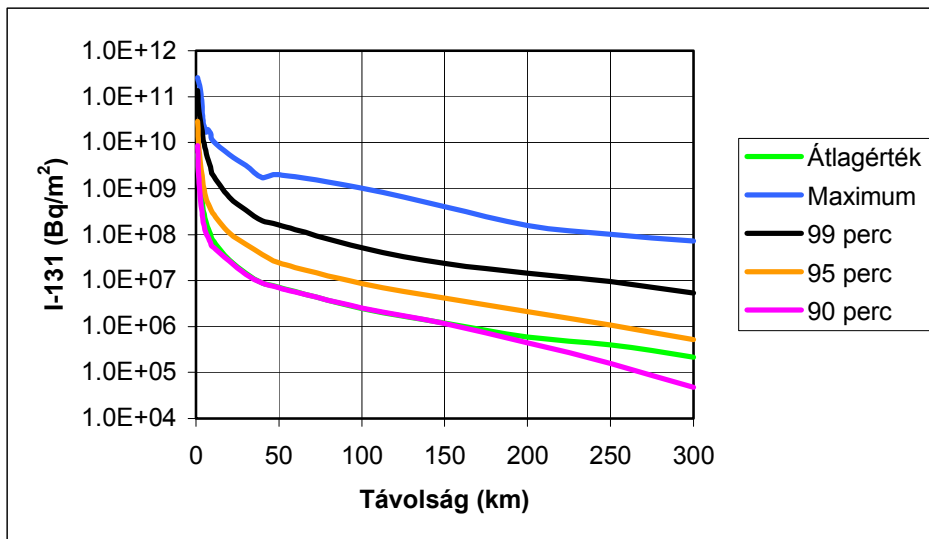
A Függelék 11.2.2. pontjának első táblázatában szereplő forrástag (nagy nyomású reaktor-tartály törés esetének) felhasználásával részleteiben megvizsgáltam, hogy a legsúlyosabb (irreálisan súlyos, de szerencsére rendkívül ritka gyakoriságú) esetben mekkora a korai és késői hatások egészségügyi kockázata a ciklikus és a réteges mintavételezést alkalmazva. Ugyancsak megvizsgáltam, hogy milyen a hatása a védőintézkedések életbeléptetésének. A

védőintézkedéseknél feltételeztem, hogy azokat időben és a nemzetközi ajánlások [45] és a hazai szabályozás [57] szerint megfelelően végrehajtják.

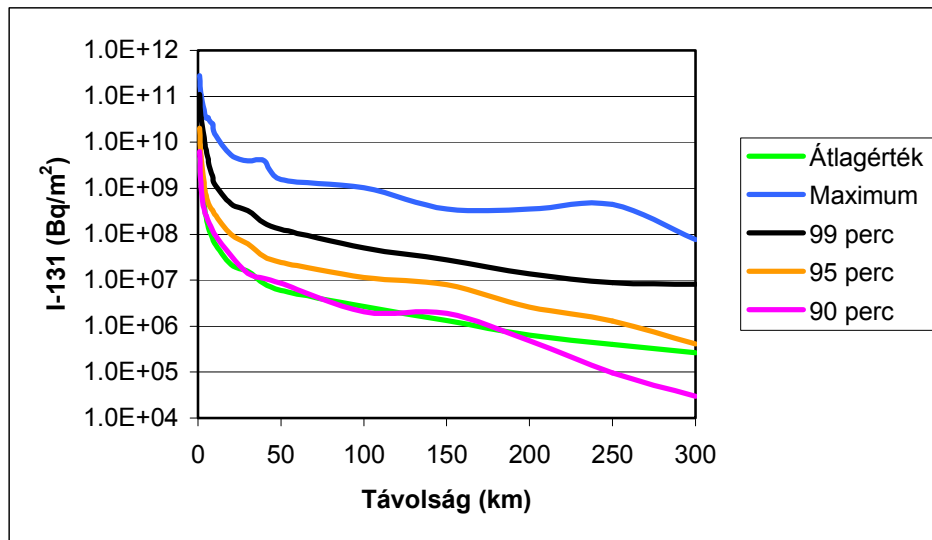
A számításoknál először – két különböző (ciklikus és súlyozott) meteorológiai mintavételezéssel – a levegőszennyezettséget, majd a talajfelületi szennyezettséget számoltam ki. Ezt követően a megfelelő dóziskonverziós tényezőkkel a várható dózismennyiségeket és az ebből adódó kockázati tényezőket, egészségügyi hatásokat határoztam meg az egyes szektorokban.

Szennyezettség becslése különböző mintavételi eljárással

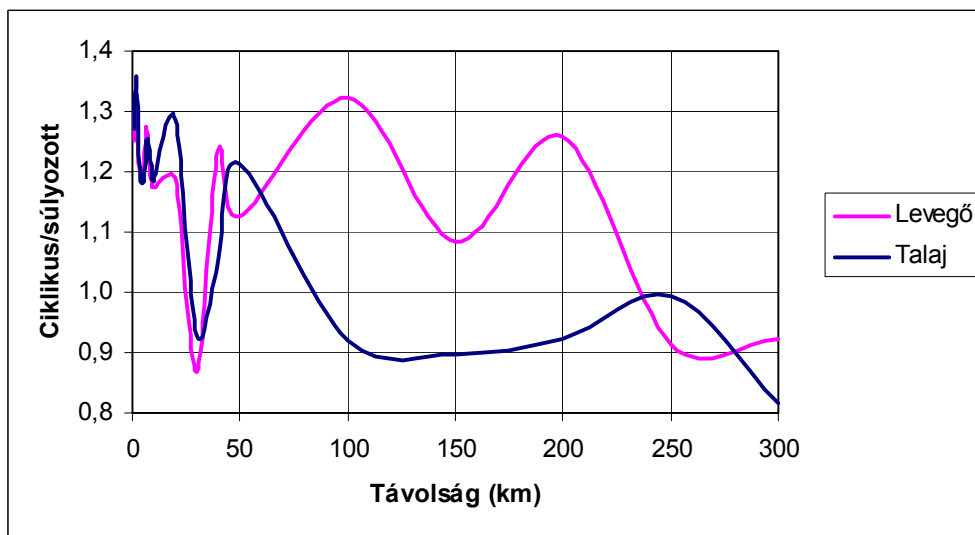
A két különböző mintavételi eljárással elvégeztem a levegő I-131 aktivitáskoncentráció (Bq/m^3) és a talajszennyezettség (Bq/m^2) a távolság becslését az erőműtől különböző távolságokra. A I-131-re vonatkozó becsült talajszennyezettség alakulását – két különböző mintavételi eljárást alkalmazva - a 5.2.11-1. és 5.2.11-2. ábrákon mutatom be.



5.2.11-1. ábra. A talaj I-131 szennyezettség becslése ciklikus mintavételezéssel az erőmű legsúlyosabb balesetét feltételezve (perc – percentil)



5.2.11-2. ábra. A talaj I-131 szennyezettség becslése súlyozott mintavételezéssel az erőmű legsúlyosabb balesetét feltételezve (perc – percentil)



5.2.11-3. ábra. A levegő és a talaj I-131 szennyezettségének összevetése ciklikus és súlyozott mintavételezéssel.

A 5.2.11-3. ábrán jól láthattuk, hogy mekkora eltérés származhat a mintavételezési eljárások különbözőségéből. A ciklikus mintavételezés esetén a levegőszennyezettséget illetően az erőmű 240 km-es körzetében felülbecslést végzünk, a talajszennyezettséget 60 km-ig felülbecsüljük, ezt követően pedig alulbecslést végzünk. Ez különböző mértékben érezteti hatását a dózisokat illetően.

Korai hatások elemzése

A korai következmények becslésénél a következő útvonalakon történő dózisterheléseket számoltam ki a kritikus lakossági csoportra és az erőműtől különböző távolságokra:

- Felhődózis: A radioaktív csóvától származó külső gamma-dózis 7 napra.

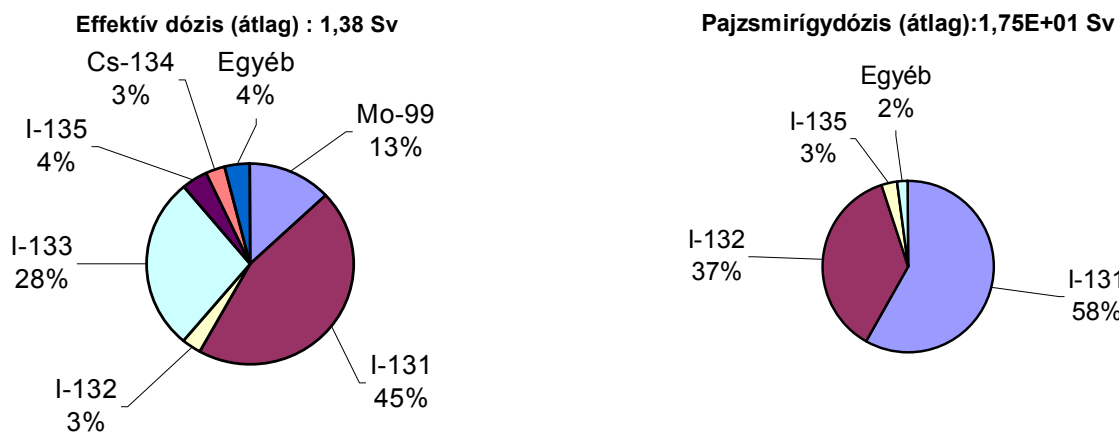
- Talajdózis: a kiülepedett radioaktív anyagoktól származó külső dózis 7 napra.
- Inhalációs dózis: a 7 nap alatt belélegzett radionuklidoktól eredő lekötött dózis.
- Bőrdózis: a bőrfelületre, illetve ruhára kiülepedett radioaktív anyagoktól származó béta-dózis.

A szennyezettség adatokból számított korai (effektív) dózisokra kapott eredményeket a 5.2.11-1. táblázatban mutatom be védőintézkedés nélkül és védőintézkedések (elzárkóztatás, kimenekítés, jódprofilaxis) figyelembe vételével. A dózisterhelés becslése valamennyi terhelési útvonaltól (felhőtől, talajtól és az inhalációtól) származó dóziszárulék figyelembe vételével készült 7 napos expozíciós időt feltételezve. A táblázatban az átlagértékek mellett zárójelben feltüntettem a maximális értékeket is, mely a legkedvezőtlenebb meteorológiai viszonyok eredményeképpen állhatna elő.

5.2.11-1. táblázat. Korai (7 napos) átlagos és maximális dózisos becslési adatai kétféle mintavételezéssel, védőintézkedéssel és anélkül

Távolság [km]	Effektív dózisos védőintézkedés nélkül [Sv]		Effektív dózisos védőintézkedéssel [Sv]	
	Ciklikus mintavételezéssel	Súlyozott mintavételezéssel	Ciklikus mintavételezéssel	Súlyozott mintavételezéssel
1	1,72E+00 (87,2)	1,30E+00 (104)	6,18E-04 (9,85E-03)	5,51E-04 (1,00E-02)
5	1,05E-01 (9,1)	8,60E-02 (9,1)	3,74E-04 (9,51E-03)	3,04E-04 (9,48E-03)
10	2,87E-02 (3)	2,40E-02 (2,9)	2,94E-04 (5,74E-03)	2,92E-04 (7,33E-03)
50	2,10E-03 (0,26)	1,80E-03 (0,31)	2,53E-04 (6,14E-03)	2,41E-04 (6,81E-03)
100	7,90E-04 (0,17)	6,60E-04 (0,14)	2,20E-04 (6,86E-03)	1,88E-04 (6,87E-03)
300	8,60E-05 (0,025)	9,50E-05 (0,0,12)	5,72E-05 (5,83E-03)	5,85E-05 (5,81E-03)

A korai effektív - és pajzsmirigy dózisos átlagértékeinek nuklidonkénti hozzájárulása a 5.2.11-4. ábra szerint alakul.



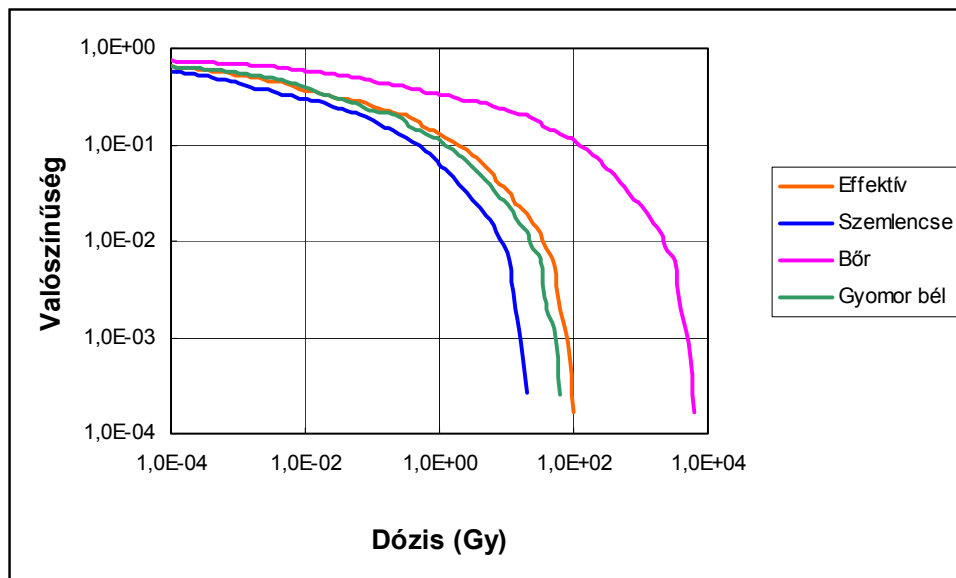
5.2.11-4. ábra A korai dózisos nuklidonkénti megoszlása 1km-re a kibocsátási ponttól

A korai dózisos szervenkénti %-os megoszlása terhelési útvonalanként – 1 km távolságban – a 5.2.11-2. táblázatban szerepelnek.

5.2.11-2. táblázat. A korai dózisok szervenkénti %-os megoszlása terhelési útvonalanként

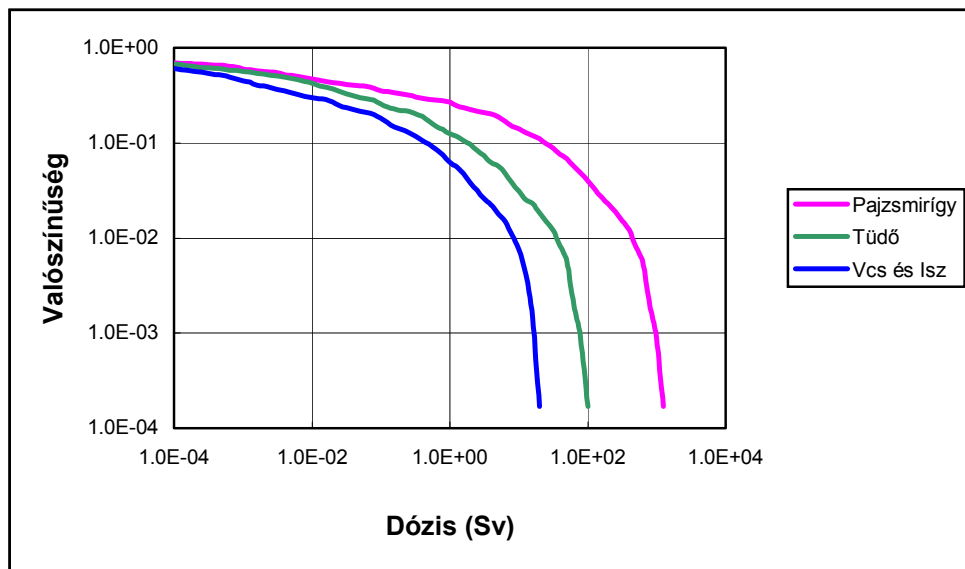
Szerv	Dózis [Sv]	Felhő	Talaj	Inhaláció	Reszuszpenzió	Bőr
Tüdő	1,37E+00	1	20	79	0	0
Pajzsmirigy	1,75E+01	0	2	98	0	0
Szemlencse	3,21E-01	7	93	0	0	0
Ivarszervek	3,07E-01	5	82	13	0	0
Csontvelő	3,26E-01	6	81	13	0	0
Gyomor	9,06E-01	2	27	71	0	0
Effektív	1,38E+00	1	19	80	0	0

1 km távolságban a szervenkénti dózisok valószínűségi (CCDF) görbéit mutatja be a 5.2.11-5a. és 5.2.11-b. ábra.



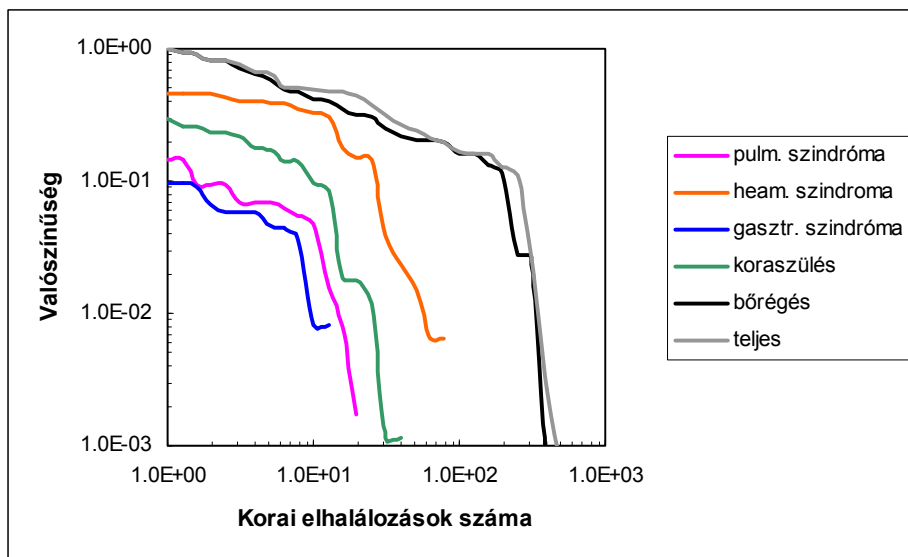
5.2.11-5a. ábra. A 7 napos expozíciót követően a szemlencse, a bőr, a gyomor-bél és effektív dózisainak (feltételes) valószínűségi (CCDF) értékei

A 5.2.11-5a. ábrán ugyan a bőrdózis súlytényezője 0,01, ugyanakkor ez a tényező nem az azonos gyakoriságnál (ill. valószínűségi értéknél) tükröződik



5.2.11-5b. ábra. A 7 napos expozíciót követően a pajzsmirigy, a tüdő, a vörös csontvelő és az ivarszervek (Vcs és Isz jelölés) dózisainak (feltételes) valószínűségi (CCDF) értékei

A korai egészségügyi *következmények* (védőintézkedések nélküli esetben) a 5.2.11-6. ábra szerint alakulnak. Védőintézkedések sikeres végrehajtása esetén a determinisztikus következmények zérusra redukálódnak.



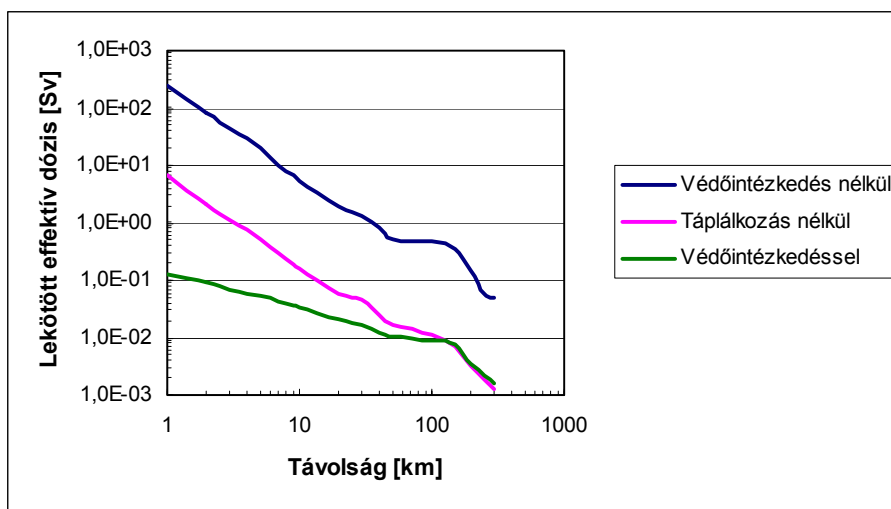
5.2.11-6. ábra. A determinisztikus károsodásból eredő korai halál (feltételes) valószínűségi (CCDF) értékei a szervenkénti hozzájárulások bemutatásával.

A késői hatások elemzése

A késői következmények becslésénél a következő útvonalakon történő dózisterheléseket számoltam ki a kritikus lakossági csoportra és az erőtől különböző távolságokra (5.2.11.-7.ábra) :

- Talajdózis: a kiülepedett radioaktív anyagoktól származó dózis 50 évre .
- Inhalációs dózis: a belélegzett radionuklidoktól eredő lekötött dózis.
- Bórdózis: a bőrfelületre kiülepedésből származó béta dózis.
- Táplálékláncon keresztüli dózisok (a helyben termelt javak elfogyasztásából).

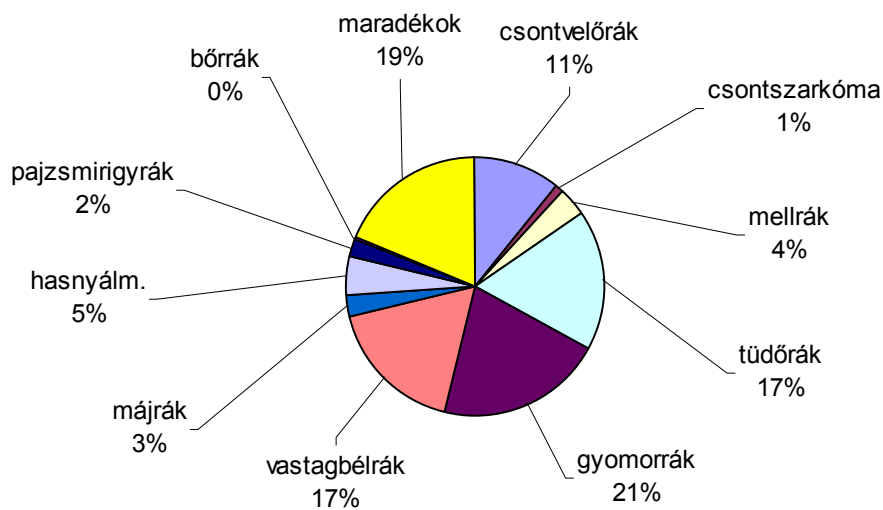
Az ábrából jól látható milyen jelentősége van a védőintézkedéseknek, illetve milyen jelentős a járuléka a táplálkozási láncon keresztüli dózisterhelésnek.



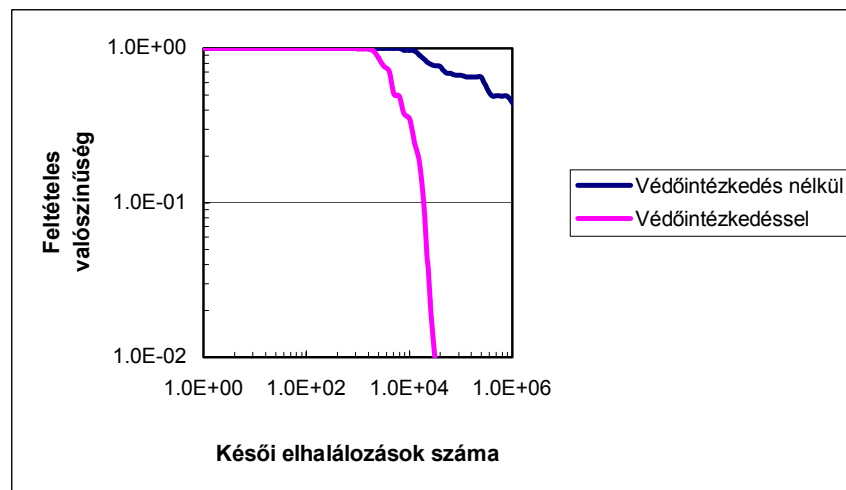
5.2.11-7. ábra. A lekötött effektív dózis változása a távolság függvényében (késői védőintézkedéssel és anélkül, valamint a táplálkozási lánc hozzájárulása nélkül)

Késői (stochasztikus) egészségügyi hatások védőintézkedéssel és anélkül

A számítások során figyelembe vett – halára vezető – megbetegedések %-os megoszlását az 1. kibocsátási kategória esetén a 5.2.11-8. és 5.2.11-9. ábra mutatja be. Az átlagos elhalálozások számát a magyarországi népességi adatok felhasználásával és az adott térszektorokban tartózkodók által elszennvedett dózisainak figyelembe vételével becsültem meg. A dózisok számításánál a védőintézkedések időben történő elrendelését és azok maradéktalan végrehajtását vettem figyelembe. A viszonylag alacsony dózisokhoz tartozó alacsony kockázati tényezők ellenére – a stochasztikus küszöb hiányának köszönhetően - a nagyszámú érintett lakosság körében a késői elhalálozás (a rákos daganatokból származó elhalálozások) várható értéke ezen igen súlyos baleseti helyzetben átlagosan megközelítheti a 8500 főt. (Amennyiben pl. 20 mSv-es lekötött effektív dózisküszöböt alkalmaznánk ezen szám néhány száz főre redukálna.)



5.2.11-8. ábra. A stochasztikus károsodások (halálesetek) számának százalékos megoszlása (%)



5.2.11-9. ábra. A késői elhalálozások számának valószínűségi (CCDF) eloszlási függvénye feltételes valószínűségi mutatókkal kifejezve (dózisküszöb feltételezése nélkül)

5.2.12. A védőintézkedésre vonatkozó megállapítások és a gazdasági hatások becslése

A súlyos balesetek esetén valamennyi kibocsátási kategóriára vonatkozóan becslést végeztem arra nézve, hogy a hazai népesség, illetve az ország területe milyen mértékben lenne érintett az intézkedési kritériumok betartása esetén. Az eredményeket a 15. kibocsátási kategória (átrakás előtt zónaolvadásos baleset, $3,14E-06$ /reaktorév gyakoriságú esemény, lásd az I. függelék 11.2.2. fejezet) kibocsátási adatait felhasználva mutatom be. Az elemzések során megvizsgáltam, hogy korai és késői sikeres védőintézkedések esetén a népesség és az ország területe milyen mértékben lenne érintve. Elemzést végeztem a gazdasági következményeket illetően is, összehasonlítottam a védőintézkedések elmaradása esetén az egészségügyi költségeket a védőintézkedések költségeivel. A becsléseknél felhasználtam a Függelék 12.2.táblázatában felsorolt – az Európai Unió által javasolt – kiindulási adatokat, amelyeket hazai körülményekre adaptáltam.

A korai védőintézkedésben érintett lakosság szám és terület nagyság várható értéke a 5.2.12-1. táblázat szerint alakul.

5.2.12-1. táblázat. A korai védőintézkedésben érintettek száma és az ebben érintett átlagos terület

Érintettség	Védőintézkedés		
	Elzárkóztatás	Kimenekítés	Jódprofilaxis
Érintett népesség (fő)	6,96E+04	6,76E+03	3,33E+04
Érintett terület (km ²)	6,18E+02	8,24E+00	4,53E+02

A késői védőintézkedések során szükségessé válik a táplálkozás korlátozása az ország területén. Az ország területét és az egyes élelmiszereket ez átlagosan a következőképpen érintheti (lásd 5.2.12-2. táblázat):

5.2.12-2. táblázat. A késői védőintézkedések (fogyasztási korlátozás) során érintett élelmiszer mennyiségek és az ebben érintett terület nagysága (km²)

Érintettség	A késői védőintézkedésben érintett élelmiszerek						
	Tej	Tej-termékek	Marhahús	Sertéshús	Leveles zöldség	Gyökéres zöldség	Gabona termékek
Élelmiszer mennyiség (kg, illetve liter)	9,40E+07	4,63E+07	1,98E+07	7,91E+08	4,25E+08	2,31E+09	6,73E+09
Érintett terület-nagyság (km ²)	4,65E+04		3,50E+04	6,70E+04	9,97E+04	2,15E+05	6,11E+04

Összevetve a gazdasági következményeket védőintézkedések végrehajtása és elmaradása esetén a költségek a 5.2.12-3. táblázat szerint alakulnak.

5.2.12-3. táblázat. A gazdasági következményeinek becslése a 15. kibocsátási kategória (átrakás előtti zónasérülés esetén, euróban kifejezve)

Intézkedés	Költségfajták		
	Teljes	A védőintézkedés költsége	Egészségügyi költségek
Védőintézkedés feltételezésével	5,67E+09	5,23E+09	4,46E+08
Védőintézkedés elmaradása esetén	4,82E+10	-	4,82E+10

A védőintézkedések költségei magukba foglalják (3.6.1. fejezetben felsorolt költségeket, azaz a kimenekítés, áttelepítés költségeit (keresetkiesést, szállítás és szállás költségeket, tőkevesztéséget

stb.), az étkezési tilalomból eredő veszteségeket (tejtermelés, élőállat, növénytermesztés stb.). A teljes költségekhez hozzájárul még a termőterület értékvesztése, valamint a stochasztikus károsodásból származó megbetegedések ($5,672E+03$ megbetegedésből $3,349E+03$ haláleset) várható kiadásai (kórházi kezelés, stb.).

A védőintézkedések elmaradása esetén a várható költség közel egy nagyságrenddel haladja meg a védőintézkedések költségeit, mely a stochasztikus megbetegedések igen nagy számából ($5,9E+05$ megbetegedésből $3,625E+05$ haláleset) adódik. Az előbbieket összevetve az egy emberélet megmentése fordított összeg várható értéke: $1,581E+04$ Euró (~4 millió Ft). A súlyos balesetekre teljes spektrumára vonatkozó számítások eredményei részletesen a [63, 68] hivatkozásában található.

5.2.13. Átfogó elemzés

A Függelék 11.2. pontjában szereplő – nullától eltérő gyakoriságú – valamennyi baleseti forrástagra (kibocsátási kategóriára) elvégezve az elemzéseket átfogó képet alkothatunk az erőmű környezeti hatásáról súlyos baleseti helyzetekre vonatkozóan. A kapott abszolút valószínűségi mutatók ezek után összevethetőek a kritériumértékekkel. Összesen kilenc kibocsátási kategória determinisztikus és stochasztikus károsodásából származó egészségügyi hatását vizsgálva megbecsültem az akut és krónikus halálesetek számának várható értékét, az egyes ún. percentilekhez (p) tartozó értékeket (azaz a megvizsgált meteorológiai esetek hány százalékában (1-p) lesz a következmény egy adott vagy ezt meghaladó értékű. Ezen kívül meghatároztam mekkora a nulla számosságú egészségügyi következmény (haláleset) valószínűsége és mekkora a kibocsátási kategóriához tartozó esetek száma akut és krónikus halálesetekre vonatkozólag (lásd az 5.2.13-1. és 5.2.13-2. táblázatot).

5.2.13-1. táblázat. Az egyes kibocsátási kategóriákhoz tartozó egészségügyi következmények becslése (a zárójelben akut hatások esetén a korai védőintézkedések elmulasztásával becsült értéket látjuk)

Kibocsátási kategória és gyakorisága /reaktorév	Hatás akut és krónikus halálestet	Az elhalálozások száma (N)					Egyéb értékek	
		Várható érték [E]	A p. percentilhez tartozó érték				P(N<1)	Maximum
			p=50	p=90	p=95	p=99		
1 – 6,83 10 ⁻⁸	Akut	0 (57)	0 (10)	0 (263)	0 (263)	0 (398)	1 (0)	0 (1459)
	Krónikus	8,5E+03	5,1E+03	1,7E+04	2,1E+04	2,9E+04	0	3,6E+04
3 – 3,98 10 ⁻⁶	Akut	0 (9)	0 (1)	0 (32)	0 (74)	0 (76)	1 (0)	0 (76)
	Krónikus	2,9E+03	2,1E+03	5,6E+03	7,4E+03	2,0E+04	0	2,4E+04
6 – 1,49 10 ⁻⁵	Akut	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	0 (0)
	Krónikus	2,0E+02	2,2E+02	4,1E+02	4,5E+02	5,4E+02	0	7,5E+02
7 – 1,01 10 ⁻⁶	Akut	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0,99)	0 (1)
	Krónikus	4,4E+02	2,8E+02	8,9E+02	1,2E+03	2,1E+03	0	2,7E+03
8 – 4,95 10 ⁻⁸	Akut	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0,99)	0 (1)
	Krónikus	1,1E+02	1,1E+02	2,3E+02	2,9E+02	4,2E+02	0	5,8E+02
12 – 8,51 10 ⁻⁶	Akut	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0,99)	0 (1)
	Krónikus	1,7E+01	4,3E+01	1,2E+02	1,6E+02	1,7E+02	2,4E-02	1,9E+02
13 – 6,65 10 ⁻⁶	Akut	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0,99)	0 (1)
	Krónikus	2,5E+01	1,1E+01	8,3E+01	1,1E+02	1,1E+02	3,0 E-01	1,1E+02
14 – 8,51 10 ⁻⁶	Akut	0 (3)	0 (0)	0 (12)	0 (23)	0 (28)	1 (0,53)	0 (28)
	Krónikus	3,3E+03	1,8E+03	7,7E+03	8,5E+03	2,3E+04	0	3,9E+04
15 – 3,14 10 ⁻⁶	Akut	0 (18)	0 (1)	0 (51)	0 (125)	0 (125)	1 (0,33)	0 (125)
	Krónikus	3,4E+03	1,8E+03	7,7E+03	8,5E+03	2,3E+04	0	3,9E+04

5.2.13-2. táblázat. A következmények reaktorévenkénti várható értéke

Következmény védőintézkedés	Várható érték	Hozzájárulás kibocsátási kategóriánként									
		1	3	6	7	8	12	13	14	15	
Akut halálestet	1,2E-4	3,9E-6	3,6E-5	0	0	0	0	0	0	2,5E-5	5,7E-5
Krónikus halálestet	5,6E-2	5,8E-4	1,2E-2	3,03	4,4E-4	5,4E-6	4,8E-4	1,7E-4	2,8E-2	1,1E-2	
Elzárkóztatás	Létszám	1,3E+0	6,1E-2	4,5E-1	1,1E-2	3,8E-3	6,7E-6	2,4E-5	1,7E-5	5,9E-1	2,2E-1
	Terület (km ²)	1,2E-2	6,4E-4	4,6E-3	1,3E-4	4,9E-5	1,8E-7	1,3E-6	6,9E-7	5,2E-3	1,9E-3
Kimekítés	Létszám	1,4E-1	1,3E-2	4,9E-2	8,1E-4	6,7E-4	5,9E-7	0	0	5,8E-2	2,1E-2
	Terület (km ²)	1,7E-3	1,4E-4	5,5E-4	2,8E-5	7,3E-6	2,3E-8	0	0	7,0E-4	2,6E-4
Jód-profilaxis	Létszám	6,7E-1	5,3E-2	2,3E-1	9,6E-3	2,5E-3	2,3E-6	1,7E-5	9,4E-6	2,8E-1	1,1E-1
	Terület (km ²)	8,9E-3	5,7E-4	3,0E-3	1,3E-4	3,2E-5	8,7E-8	1,1E-6	4,6E-7	3,8E-3	1,4E-3

Az 5.2.13-1. ábra a determinisztikus károsodásból származó halálesetek kumulatív gyakoriságát leíró (CCDF) függvényét mutatja. Az ábra a négy legfontosabb kibocsátási kategória (1, 3, 14, 15) járulékait és ezek eredőjét illusztrálja. A determinisztikus károsodásnál valamennyi terhelési útvonalat, a felhőcsóvát, a talajt és az inhalációt figyelembe vettem. A négy – a következményeit illetően - domináns kibocsátási kategória gyakoriságát és a kibocsátás volumenét mutatja be 5.2.13-3. táblázat. Az 1. kategória kibocsátása igen jelentős, ugyanakkor a hozzá tartozó gyakoriság mintegy 2 nagyságrenddel alatta marad a kisebb volumenű kibocsátással járó kategóriáknak.

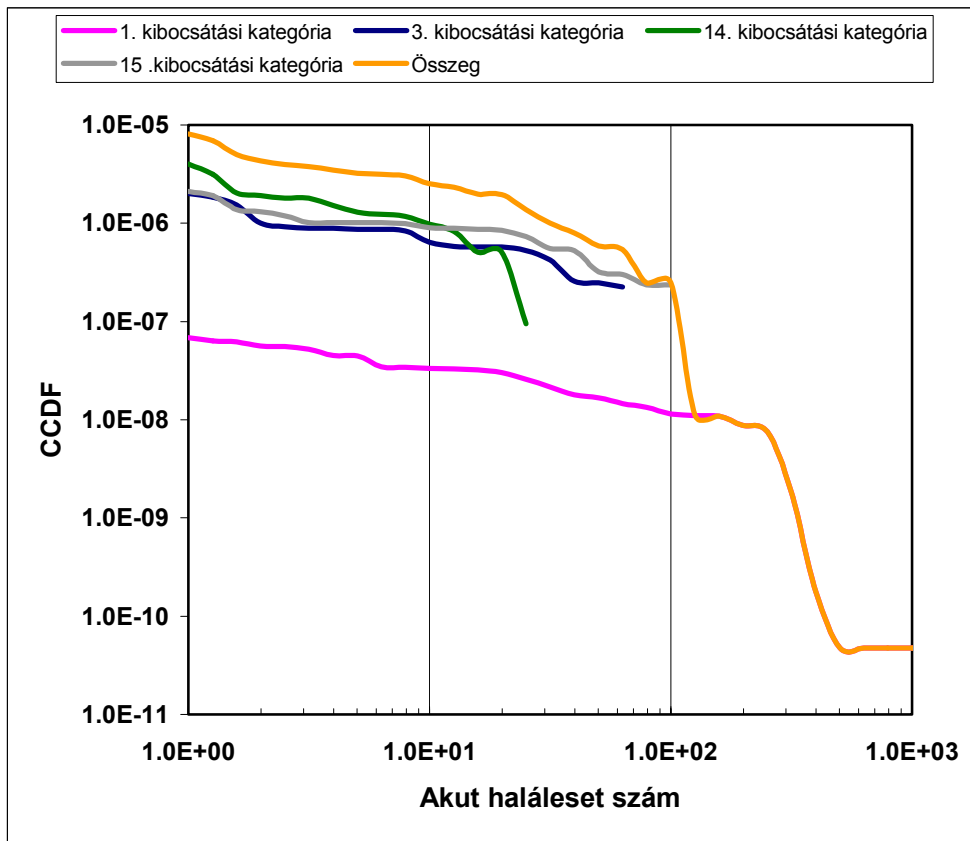
5.2.13-3. táblázat. A domináns kibocsátási kategóriákhoz tartozó I és Cs kibocsátás (a zónaleltár %-ában)

Kibocsátási kategória	Gyakoriság [reaktorév ⁻¹]	I (Cs) kibocsátás [%]
1	6,83E-08	77,3 (76,1)
3	3,98E-06	12,6 (12,7)
14	4,32E-06	10,6 (10,6)
15	3,14E-06	17,4(17,4)

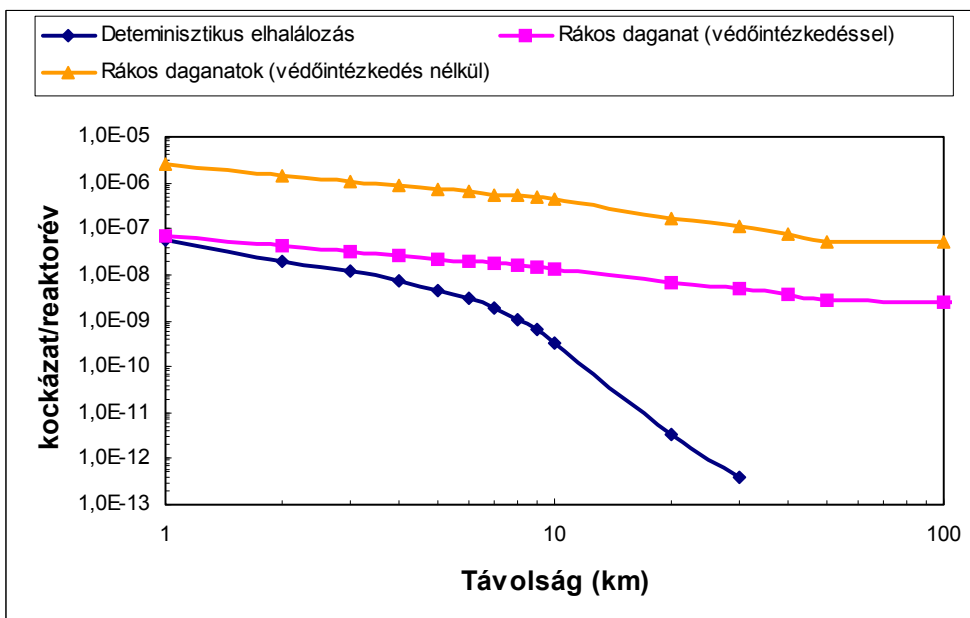
A négy domináns kibocsátási kategória (1, 3, 14 és 15) eredőhöz történő járulécai visszatükrözik a kibocsátás volumenét és a hozzá tartozó gyakoriság értékeket. A viszonylag kicsi kibocsátással rendelkező (3, 14 és 15-ös jelzésű kategóriák) járulécai dominánssá válnak a kibocsátáshoz tartozó viszonylag nagy gyakoriság értékek miatt.

Az 5.2.13-2. ábrán a determinisztikus károsodás (akut halál) és a stochasztikus (rákos daganat) kockázatát látjuk reaktorévenként a reaktortól való távolság függvényében. A kockázat ún. átlagos kockázat valamennyi szélirányra átlagolva. (A tényleges kockázatértékek egy adott irányban ettől eltérhetnek, hiszen sem a szélirányeloszlás, sem a meteorológiai szekvencia csoportok nem homogének).

Védőintézkedések feltételezése (és annak sikeres végrehajtása) esetén a korai elhalálozás valószínűsége zérus valamennyi távolságra. A védőintézkedések elmaradása esetén a kockázat jelentős csökkenést mutat a távolsággal, 40 km-es övezetben $7 \cdot 10^{-8}$ -ról gyorsan leesik $4 \cdot 10^{-13}$ értékre. A gyors csökkenés a determinisztikus hatásoknál feltételezett küszöbértéknek köszönhető.



5.2.13-1. ábra. Az akut halálesetek kumulatív gyakorisága



5.2.13-2. ábra. A determinisztikus és stochasztikus elhalálozások egyéni kockázata

5.2.14. A kritériumok teljesülésének vizsgálata

A súlyos balesetek során a lehetséges aktivitás-kibocsátás és környezeti következmények a magyar szabályozás szerint nincsenek korlátozva. A zónaolvasásra vonatkozóan a nemzetközi ajánlás $<10^{-4}$ /reaktorév. A zónaolvasással járó súlyos balesetek 1%-ban vezethetnek konténment sérülésre. Így a nagy radioaktív kibocsátásokat eredményező súlyos balesetek kockázati kritériuma $<10^{-6}$ /reaktorév.

Az **egyéni kockázat** korlátozásra az Egyesült Államok hatósága USNRC ajánlása determinisztikus és stochasztikus hatásokból eredő elhalálozásra az erőmű 10 mérföldes körzetében kockázati tényezőben kifejezve $<10^{-6}$ /év. Az angol ajánlások [69] a következő korlátokat szabják a dolgozókra, illetve a lakosságra :

- Bármilyen ipari tevékenységet folytató dolgozók maximális kockázata : $<10^{-3}$.
- A lakosság tagjainak maximális kockázata nagy ipari katasztrófa esetén : $<10^{-4}$.
- A nukleáris erőművek környezetében élők kockázata az atomerőmű normál üzemi tevékenysége esetén $<10^{-8}$.
- Az erőműhöz közel élő lakosság tagjainak kockázata bármilyen nagy reaktorbaleset esetén $<10^{-6}$.
- A lakosság átlagos tagjának kockázata az atomerőmű normál és valamennyi lehetséges baleseti helyzetét figyelembe véve $<10^{-7}$.

Az ún. társadalmi vagy kollektív kockázatra vonatkozóan Európában egyedül Hollandiában találunk utalást a kritériumértékekre vonatkozóan [70] (lásd.:5.2.14-1. táblázat) :

5.2.14-1. táblázat. A társadalmi kockázat kritériumértékei Hollandiában

Kockázat/év	Maximális elhalálozások	Másodlagos értékek
$<10^{-5}$	10	-
$<10^{-7}$	100	10
$<10^{-9}$	1000	100

Az irányelv szerint a – korai halálozásokra vonatkozó – következményeket védőintézkedések nélkül (kivéve az árnyékoló tényezőket) kell kiszámolni az első nap dózisterhelését figyelembe véve. A holland szabályozás értelmében azon erőművek esetében, ahol a másodlagos értékek teljesülnek az ALARA értelmében nem kell az erőműnek újabb balesetkezelési eljárásokat életbe léptetni.

Tekintve, hogy sem a nemzetközi ajánlások [45], sem a hazai hatóság nem szabályozza a súlyos balesetekből származó kockázatokat, így az eredményeket – az egyéni kockázat esetén a – USNRC, a társadalmi kockázat esetén a holland szabályozással vettetem össze. Az előbbi ajánlása az 5.2.13-2. ábra tanúsága szerint teljesül még abban az esetben is, ha sem a determinisztikus sem a stochasztikus halálozások becslésénél nem tételezünk fel védőintézkedést. A társadalmi kockázat esetén az 5.2.13-1. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a táblázatban szereplő kritériumok első oszlopában szereplő értékek teljesülnek, a másodlagos értékek nem, ami azt jelenti, hogy balesetkezelési eljárások kidolgozására van szükség, ami egyébként folyamatban van a paksi atomerőműnél.

6. Összegzett következtetések

6.1. *A normálüzemi elemzések következtetései*

A közreműködéssel kidolgozott normálüzemi légköri kibocsátás új szabályozási elve biztosítja a lakosság sugárterheléséből származó egészségügyi kockázat minimálisra csökkentését. A három kiemelt nukleáris létesítmény (Oktatóreaktor, Kutatóreaktor és Izotóp Intézet Kft.) esetében – a jelen tanulmányban bemutatott módszerekkel meghatározásra kerültek a normál üzem során a környezetbe kibocsátható nuklidspecifikus aktivitások értékei. A biztonsági tényezők alkalmazásával kidolgozott kibocsátási határértékek betartása maximálisan biztosítja a dózismegszorítás teljesülését a kritikus lakosság körében.

6.2. *A következmények analízise tervezési üzemzavarok esetén*

A Kutatóreaktor üzemzavarai esetében – egy általam kidolgozott terjedési modellel – meghatározásra kerültek a légkörbe kikerülő nuklidspecifikus aktivitások a reaktor különböző szellőzési állapotaiban. Különböző fűtőelem károsodások és meteorológiai viszonyok esetén megbecsültem az épület közelében elhelyezett gamma-szondák várható jelzéseit, mely eredmények bekerültek a reaktor balesetelhárítási tervébe. Nagyobb távolságokra a várható sugárzási következményeket nemzetközileg elfogadott modellekkel határoztam meg. Az eredmények alapján a kritikus lakosság csoportnak, az üdülőkörzet felnőtt lakosságának dózisterhelése messze alatta marad a sürgős óvintézkedésekre vonatkozó kritériumértékeknek.

A termohidraulikai és aktivitásterjedési számításokra épülve elkészültek a paksi atomerőmű főrendszerbeli meghibásodásai esetére vonatkozóan a környezeti következmények becslései. A részletes analíziseket nemzetközileg elfogadott kódrendszer alkalmazásával készítettem el, biztosítva a biztonság egyöntetű összevethetőségét térségünkben. A számítások eredményei beépültek az erőmű jelenleg érvényes Végleges Biztonsági Jelentésébe és az üzemidő hosszabbítással kapcsolatos tanulmányokba. A kritikus lakossági csoport dózisterhelése alatta marad a jogszabályokban meghatározott – a korai védőintézkedésre vonatkozó, azzal javaslatom szerint megegyező – dóziskritérium értéknek.

6.3. *A következmények analízise súlyos balesetek esetén*

Jelen tanulmányban bemutatásra kerül a Kutatóreaktor igen kis valószínűséggel bekövetkező, teljes zónaolvadással járó súlyos balesetének determinisztikus elemzése. Az aktivitásterjedési számításokkal meghatározott nuklidspecifikus kibocsátások képezték alapját az épületközelbeli dózisteljesítmény meghatározásának. Szélcsatorna kísérletekkel a detektorjelzésekből – a meteorológiai állapot ismeretében – a kibocsátott aktivitások megbecsülhetők. Az eredmények beépültek a Kutatóreaktor biztonsági jelentésébe és a balesetelhárítási tervébe. A távolabbi környezeti következmények számítása során meghatározásra került a sürgős óvintézkedések határának kijelölése.

A valószínűségi analízis 2-es szintjének eredményeire épülve – a kibocsátási kategóriák és ehhez tartozó valószínűségek ismeretében – elkészült az erőmű 3-as szintű valószínűségi elemzése. Az Európai Unió Bizottsága által javasolt – a hazai viszonyokra teljes körűen adaptált programcsomag segítségével – térségünkben egyedülállóan – elkészült az erőmű súlyos baleseteiből származó sugárzási, egészségügyi, balesetelhárítási és gazdasági következményeinek valószínűségi

elemzése. A becült kockázati értékek kielégítik az amerikai erőművekre (az USNRC által) javasolt egyéni kockázatra vonatkozó, valamint a társadalmi kockázatra kidolgozott holland kockázati kritériumokat.

7. Ajánlások

7.1. Normál üzemre

A kiemelt létesítményeknél a származtatást úgy kell elvégezni, hogy a kibocsátási határérték betartása, illetve a kibocsátási határérték kritérium teljesülése esetén a lakosság éves sugárterhelése ne haladja meg a dózismegszorítást. Az Európai Unió jogrendszerével történő harmonizáció megvalósulásaként fontos irányelv, hogy az egységnyi kibocsátás dóziszárulékát nemzetközileg elfogadott modellek segítségével kell meghatározni, a felhasznált paraméterek értékeit reális közelítéssel kell megállapítani.

7.2. Tervezési üzemzavarokra

A tervezési balesetek esetén nukleáris létesítményekből kikerülő aktivitások környezeti következményeinek becslését a kritikus lakossági csoportra (A KFKI telephelyénél 1km-en az üdülőkörzetben élő, az atomerőműnél a csámpai felnőtt lakosságra) kell elvégezni, figyelembe véve valamennyi – a korai intézkedést kiváltó – terhelési útvonalat. A nukleáris létesítmény tervezési üzemzavarának úgy kell lezajlania, hogy ne legyen szükség korai védőintézkedések életbeléptetésére.

7.3. Súlyos balesetekre

A súlyos balesetek környezeti következményeinek analízisét kutatóreaktornál determinisztikus, atomerőműnél pedig valószínűségi alapon kell elvégezni. A determinisztikus elemzéseket a Kutatóreaktor környezetében legvalószínűbb meteorológiai kategóriára (Pasquill D stabilitási kategóriára) kell elvégezni. Az eredményekből a sürgős óvintézkedések zónája meghatározható. A valószínűségi elemzéseket egy teljes évre vonatkozó meteorológiai adatbázis felhasználásával – súlyozott mintavételi eljárást alkalmazva – kell elvégezni. A kapott feltételes valószínűségeket a forrástagok valószínűségeivel súlyozva, majd ezeket valamennyi súlyos baleseti kategóriára összegezve határozandó meg az egyéni és társadalmi kockázat, melyeknek igazodniuk kell az átlagos ipari kockázati értékekhez, ellenkező esetben balesetkezelési eljárásokat kell kidolgozni.

8. Új tudományos eredmények (tézisek)

Munkám során széleskörűen elemeztem a radioaktív anyagok légköri kibocsátását és az ebből adódó környezeti következményeket a hazai nukleáris létesítmények valamennyi üzemi állapotában: normál üzemen, üzemzavari állapotban és súlyos baleseti helyzetekben

Javasolt tudományos eredmények:

1. A nukleáris létesítmények normálüzemi esetére elsőként dolgoztam ki a nuklidspecifikus kibocsátás szabályozás új alapelveit, minimálisra csökkentve ezáltal a lakosság sugárterhelésének kockázatát. Ennek keretében két régóta megoldandó fontos feladatot oldottam meg: a számítási eljárás elveinek kidolgozását kiemelt létesítményekre, illetve a kibocsátási határértékek kidolgozását nem kiemelt létesítményekre.
2. Három kiemelt létesítménynél (Oktatóreaktor, Kutatóreaktor és Izotóp Intézet Kft.) esetében – az előzőekben kidolgozott kibocsátás szabályozás elveinek alkalmazásával – részletesen meghatároztam a nuklidspecifikus normálüzemi kibocsátási határértékeket, biztosítva ezáltal kibocsátási határérték kritérium és így a dózismegszorítás betartását és betartatását a kritikus lakosságra vonatkozóan.
3. Elsőként elemeztem a Kutatóreaktor üzemzavari állapotaiban a sérült fűtőelemből kikerülő aktivitásmennyiségeket. A kidolgozott aktivitásterjedési modell segítségével megbecsültem a reaktor különböző szellőzési állapotaiban az épületből kikerülő nuklidspecifikus aktivitásokat. A kikerülő aktivitásokból számításokkal elsőként határoztam meg a reaktor épület közelében elhelyezett mérőszondák helyén – a különböző meteorológiai viszonyok esetén - várható dózisteljesítményeket. Nemzetközileg elfogadott modellekkel határoztam meg a környezetben kritikus lakosság várható dózisterheléseit.
4. Elsőként elemeztem teljes körűen a paksi atomerőmű főrendszereinek meghibásodásából származó kibocsátásainak környezeti következményeit. Az eredmények nemzetközi és hazai elfogadtatásához előzőleg közreműködtem az elemzések eszközének – egy Európai Unió programcsomag (PC COSYMA) elkészítésében, tesztelésében és hazai adaptálásában. A kritikus lakosság várható dózisterhelésének becslésére determinisztikus elemzéseket végeztem, majd a kapott eredményeket összevettem az általam előzőleg kidolgozott kritériumértékkel.
5. Az általam létrehozott aktivitásterjedési modell alkalmazásával elsőként elemeztem a Kutatóreaktor igen kis valószínűséggel bekövetkező súlyos balesetének – a teljes zónaolvadás – következményeit a reaktorépület környezetében és a kritikus lakosság körében. Szélcsatornában végzett kísérletekkel a kezdeti diszperziós paramétereket, valamint az épület közeli pontokban az egységnyi aktivitás kibocsátásra vonatkozó dóziskonverziós tényezőt határoztam meg. Ennek ismeretében a detektorjelzésből a kibocsátott aktivitás – vagyis a környezeti elemzésekhez baleseti helyzetben szükséges forrástág – jó közelítéssel megbecsülhető. A reaktor ezen legsúlyosabb baleseténél kiszámoltam a kritikus lakosság dózisterhelését és meghatároztam a sürgős óvintézkedések zónahatárát.
6. A Paksi atomerőmű 2-es szintű valószínűségi elemzésre (PSA Level 2) épülve – vagyis a súlyos balesetek forrástagjainak felhasználásával – elsőként végeztem el az erőmű biztonsági elemzésének 3-as szintjét (PSA –Level 3). Hazai meteorológiai adatokból súlyozott mintavételi eljárást alkalmazva határoztam meg az egyes kibocsátási kategóriákra vonatkozó

sugárzási, egészségügyi és gazdasági következmények feltételes, – a kibocsátási kategóriák gyakoriságának ismeretében az abszolút – valószínűségi értékeket. Elemeztem a védőintézkedések hatékonyságát a determinisztikus és a stochasztikus egészségügyi következményeket illetően.

9. Hivatkozások, saját publikációk

9.1. Hivatkozások

- [1] **L. Sági**: Hungarian Regulation. Technical Committee Meeting to review National Experience on the Regulatory Control of Discharges to the Environment. IAEA Vienna, 14-18. 05.2001.
- [2] 15/2001. (VI. 6.) KöM rendelet: Az atomenergia alkalmazása során a levegőbe és vízbe történő radioaktív kibocsátásokról és azok ellenőrzéséről.
- [3] **Sági László**: Tanulmány a Kibocsátási határértékek meghatározására a BME Oktatóreaktor tevékenységére vonatkozólag. Budapest 2002 február.
- [4] **Sági László**: Tanulmány a Kibocsátási határértékek meghatározására az Izotóp Intézet Kft. tevékenységére vonatkozólag. Budapest 2001. november .
- [5] **Sági László**: Tanulmány a Kibocsátási határértékek meghatározására Budapesti Kutatóreaktor tevékenységére vonatkozólag. Budapest 2001 november.
- [6] Budapesti Kutatóreaktor Végleges Biztonsági Jelentése 2005.
- [7] Budapesti Kutatóreaktor Balesetelhárítási és Intézkedési terve 2005. február.
- [8] **L. Sági**: Determining the source term for emission of radioactive material from the faces of a building, International Conference on Monitoring, Assessments and Uncertainties for Nuclear and Radiological Emergency Response. Rio de Janeiro November 21-25, 2005.
- [9] **L. Sági**, I. Goricsán, S. Deme, E. Láng and Zs. Szepesi: Determining the source term for emission of hazardous material from the faces of a building, AARMS, Vol. 5, No. 4. (2007).
- [10] A Paksi Atomerőmű Biztonságának újraértékelése. Összefoglaló jelentés 1994.december.
- [11] **L. Sági** and L. Koblinger: Calculation model for Radiation Doses Caused by DBA, AGNES Project. Budapest, 1992.
- [12] Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 90 mm diameter cold leg break of spray line in loop No. 6. AGNES Project 1992.
- [13] Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 73 mm diameter cold leg break of make-up water line in loop No. 5. AGNES Project 1992.
- [14] Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 111 mm diameter cold leg break in the HPIS pipeline of loop No. 5. AGNES project. Task No. B07.2. 1992.
- [15] **Sági L.**, Szabó Z., Bérci K., Mórocz I., Ozorai J., and Ördög M.: Radioaktív kibocsátás alrendszerekből és komponensekből. AEKI Kutatási Jelentés Budapest 1993. szeptember.
- [16] Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 233 mm diameter cold leg break in the HPIS pipeline of loop No. 4. AGNES project Task No. B07.1. 1993.
- [17] Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with 100 per cent cold leg break of the 492 mm diameter pipe of loop No. 4. AGNES project Task No. 1993.
- [18] Taubner R.: Contain elemzések a különböző üzemzavarok után a konténmentben kialakuló nyomásviszonyok vizsgálatához. VEIKI, 2004.
- [19] **Sági László**, Vértes Péter: Aktivitásterjedés és környezeti következmények számítása AEKI-DBAC-2005-736/33/M3

- [20] A Paksi Atomerőmű Zrt. Végleges Biztonsági Jelentése (VBJ) Paks, 2006 június.
- [21] **Sági László** and Vértés Péter: A Paksi Atomerőmű biztonságának értékelése nagy radioaktív kibocsátások szempontjából D4-5-6. A kibocsátások következményeinek elemzése Budapest 2005.
- [22] J. A. Jones, P.A. Mansfield, S.M. Haywood, I. Hasemann, C. Steinhauer, J. Ehrhardt and D. Faude: PC Cosyma (Version2): An accident consequence assessment package for use on PC EUR 16239 EN ISBN 92-827-5779-X, 1996.
- [23] **L. Sági**: Source term determination and consequence calculation analysis at research reactors IAEA Workshop 2003. September.
- [24] **L. Sági** and L. Koblinger: Consequence Analyses of Hypothetical Nuclear Accident by the COSYMA Code (PSA - Level 3). 21st Workshop on Radiation Protection, 22-24, May 1996, Balatonkenese.
- [25] **L. Sági** and L. Koblinger: MACCS Calculations for the VVER- type Reactor at the Paks NPP (HUNGARY). Proceedings of the Technical Committee Meeting organised by the IAEA and held in Vienna, Austria 21-25 November 1994.
- [26] **L. Sági** and L. Koblinger: Comparing the Environmental Consequences of Hypothetical Accidents at VVER Installations of Hungary. Proceedings of the 2nd COSYMA Users Meeting, Budapest 19-21 June 1995.
- [27] L. Koblinger and **L. Sági**: Calculations for the VVER-type reactor at the Paks NPP (Hungary) with the COSYMA and MACCS codes. Proceedings of the 2nd COSYMA Users Meeting, Budapest 19-21 June 1995.
- [28] **L. Sági** and L. Koblinger: PRA Level-3 Calculations for the VVER-type-reactor in Hungary. Proceedings of Probability Safety Assessment Methodology and Applications. Seoul, Korea November 26-30, 1995. ISBN 89-950024-17-94550.
- [29] L. Koblinger and **L. Sági**: PSA Level-3 Calculations for the VVER-type Reactor in Hungary. Fourth Annual Two day Conference on Probabilistic Safety Assessment in the Nuclear Industry (Invited paper). Edinburgh 29/30 November 1995.
- [30] **L. Sági** and L. Koblinger: Probability Safety Assessment (PSA Level 3) and Emergency Planning. IRPA9 1996 International Congress on Radiation protection. Vienna, Austria, 1996. ISBN 3-9500255-4-5.
- [31] Real-time On-line Decision Support System (RODOS) for Nuclear Emergencies.
- [32] Fehér István, Koblinger László és Nagy György: Javaslat kutató reaktorok és izotóplaboratóriumok légköri kibocsátásának szabályozására, Központi Fizikai Kutató Intézet Budapest 1983.
- [33] Jones, I. A.: Models to Allow for the Effects of Coastal Sites, Plume Rise and Buildings on Dispersion on the Value of Deposition Velocity and Washout Coefficients, NRPB-R 157.UK 1983.
- [34] Fackrell, J. E. and Pearce, J. E.: Parameters Affecting Dispersion in the Near Wake of Buildings, Central Electricity Governing Board, Report, RD/M/ 1179 (1981).
- [35] Vincent, J. H.: Model Experiments on the Nature of Air Pollution Transport Near Buildings. Atmos. Environ., 11, 765 (1977).
- [36] Vincent, J. H.: Scalar Transport in the Near Aerodynamic Wakes of Surface Mounted Cubes. Atmos. Environ., 12, 1319 (1978).
- [37] Fackrell, J. E.: Flow Behaviour Near Isolated Rectangular Buildings, Central Electricity Governing Board, Report 7 PRD /M/ 1254/ N82 (1982).

- [38] A. Mayall, T. Cabiana, C. Attwood, C. A. Fayers, J.G. Smith, J. Penfold, D. Steadman, G. Martin, T. P Morris and J. R. Simmonds: PC-CREAM National Radiological Protection Board EUR 17791 EN (NRPB-SR296).
- [39] J. R. Simmonds, G. Lawson, and A. Mayall: Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment. CEC Luxemburg, EUR 15760 EN (1995).
- [40] H. M. Müller and P. Jakob: Gamma exposures from Gaussian clouds. Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung (GSF) mbH. Neuherberg (1991).
- [41] P. Jakob, H. G. Paretzke, H. Rosenbaum, M. Zankl.: Organ doses from radionuclides on the ground. Health Physics 54 617-633 (1988).
- [42] W. Jacobi, H. G. Paretzke and K. Henrich: Dosis faktoren für inkorporierte radionuclide and Kontamination der Haut. DSF report 14/89, Neuherberg (1989).
- [43] ICRP Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 3 ICRP Publication 69. Ann ICRP 25 (1) (1995).
- [44] ICRP 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Ann ICRP 21 (1-3) (1991).
- [45] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources Safety Series No. 116 IAEA, 1996.
- [46] Üzembehelyezést Megelőző Biztonsági Jelentés módosított változat, Budapest 1992.
- [47] Fehér István, Gadó János, Macsuga Géza, **Sági László**, Szabó Zoltán, és Vigassy József: A KFKI Kutatóreaktorban kis valószínűséggel bekövetkező balesetek elemzése Budapest 1992. augusztus.
- [48] J. Gadó and J. Zsoldos: RJFA and RJFB- Computer codes for Calculating Fuel Depletion and Fission Product Poisoning KFKI-76-75 Report. Budapest 1976.
- [49] Diszperziós vizsgálatok és dozimetriai számítások a Budapesti Kutatóreaktor környezetére vonatkozóan. AEKI Költségvetési beszámoló Budapest 2000.
- [50] Horváth Kristóf: Forrástag meghatározása a kibocsátást megelőzően reaktorbalesetek esetén. PhD értekezés 2005.
- [51] Paksi Atomerőmű-II. Műszaki terv IX. rész. Az atomerőmű biztonságának műszaki értékelése. 1976.
- [53] L. Pernecky, **L. Sági**, and P. Vértes : Opening of stem generator collector cover Contract No. MFFO 53/93-0769 Project Task No. B8/9. Budapest 2003.
- [52] KFKI-AEKI TRASS Report, AEKI-DBAC-2003-736/10/M0-19M1). Budapest 2003.
- [54] Adatszolgáltatás a B9.2 " Radioaktív kibocsátás alrendszerekből és komponensekből" c. feladathoz ETV-EROTERV Rt. Nukleáris Iroda 62/0423 1993. augusztus 23.
- [55] **Sági László** : Alrendszer meghibásodások következményei. AEKI jelentés Budapest 2003.
- [56] Principles of monitoring for radiation protection of the population, ICRP 43, 1985.
- [57] Az egészségügyi miniszter 16/2000. (VI. 8.) EüM rendelete.
- [58] A Paksi Atomerőmű Biztonságának Újraértékelése 1994. december.
- [59] Téchy Zsolt Konténment eseményfák valószínűségi értékelése VEIKI 22.11-214/A8,A9, 2003 jelentés
- [60] P.M. Roelofsen and J. van der Steen: Level 3 PSA Guidelines ECN KEMA 1995.
- [61] Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants, Rep. WASH-1400-MR (NUREG-75/014) Washington, DC (1975).
- [62] Lajta Gábor és Téchy Zsolt: Forrástagok meghatározása. Kutatási jelentés 21.11-215/E4 VEIKI 2002 október.

- [63] A paksi atomerőmű biztonságának értékelése nagy radioaktív kibocsátások szempontjából Budapest 2004.
- [64] K. J. Voght: Umweltkontamination und Strahlenbelastung durch radioactive Abluft aus Kerntechnischen Anlagen, Jül-k637-ST/1970.
- [65] Bencze, Major, Mészáros: Fizikai Meteorológia, Akadémiai Kiadó. Budapest, 1982.
- [66] Magyar Statisztikai Évkönyv, Statisztikai Hivatal. Budapest 1994.
- [67] **L. Sági**, I. Balásházy, N. Fülöp, and A. Kerekes: Providing Site Specific Data around Paks NPP Budapest 1993.
- [68] Egyes súlyos baleseti folyamatok esetén az erőművi radioaktív kibocsátásból származó, társadalmat ért kár meghatározása AEKI-G- 1054/1995.
- [69] The tolerability of risk from nuclear power stations ISBN O 11886368 1. London 1992.
- [70] E. van Wonderen: Application of COSYMA According to the Dutch Risk Policy, KEMA Nederland B.V. Arnhem, The Netherlands 1998.

9.2. *Saját publikációk*

1. **L. Sági**: Hungarian Regulation. Technical Committee Meeting to review National Experience on the Regulatory Control of Discharges to the Environment. IAEA Vienna, 14-18. 05.2001.
2. **Sági László**: Tanulmány a Kibocsátási határértékek meghatározására a BME Oktatóreaktor tevékenységére vonatkozólag. Budapest 2002 február.
3. **Sági László**: Tanulmány a Kibocsátási határértékek meghatározására az Izotóp Intézet Kft. tevékenységére vonatkozólag. Budapest 2001. november .
4. **Sági László**: Tanulmány a Kibocsátási határértékek meghatározására Budapesti Kutatóreaktor tevékenységére vonatkozólag. Budapest 2001 november.
5. **L. Sági**: Determining the source term for emission of radioactive material from the faces of a building, International Conference on Monitoring, Assessments and Uncertainties for Nuclear and Radiological Emergency Response. Rio de Janeiro November 21-25, 2005.
6. **L. Sági**, I. Goricsán, S. Deme, E. Láng and Zs. Szepesi: Determining the source term for emission of hazardous material from the faces of a building, AARMS, Vol. 5, No. 4. (2007).
7. **L. Sági** and L. Koblinger: Calculation model for Radiation Doses Caused by DBA, AGNES Project. Budapest, 1992.
8. Gy. Ézsöl, L. Pernecky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 90 mm diameter cold leg break of spray line in loop No. 6. AGNES Project 1992.

9. Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 73 mm diameter cold leg break of make-up water line in loop No. 5. AGNES Project 1992.
10. Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 111 mm diameter cold leg break in the HPIS pipeline of loop No. 5. AGNES project. Task No. B07.2. 1992.
11. **Sági L.**, Szabó Z., Bérci K., Mórocz I., Ozorai J., and Ördög M.: Radioaktív kibocsátás alrendszeréből és komponensekből. AEKI Kutatási Jelentés Budapest 1993. szeptember.
12. Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with a 233 mm diameter cold leg break in the HPIS pipeline of loop No. 4. AGNES project Task No. B07.1. 1993.
13. Gy. Ézsöl, L. Perneczky, **L. Sági**, R. Taubner and P. Vértes: Analysis of the LOCA scenario with 100 per cent cold leg break of the 492 mm diameter pipe of loop No. 4. AGNES project Task No. 1993.
14. **Sági László**, Vértes Péter: Aktivitásterjedés és környezeti következmények számítása AEKI-DBAC-2005-736/33/M3.
15. **Sági László** and Vértes Péter: A Paksi Atomerőmű biztonságának értékelése nagy radioaktív kibocsátások szempontjából D4-5-6. A kibocsátások következményeinek elemzése Budapest 2005.
16. **L. Sági**: Source term determination and consequence calculation analysis at research reactors IAEA Workshop 2003. September.
17. **L. Sági** and L. Koblinger: Consequence Analyses of Hypothetical Nuclear Accident by the COSYMA Code (PSA - Level 3). 21st Workshop on Radiation Protection, 22-24, May 1996, Balatonkenese.
18. **L. Sági** and L. Koblinger: MACCS Calculations for the VVER- type Reactor at the Paks NPP (HUNGARY). Proceedings of the Technical Committee Meeting organised by the IAEA and held in Vienna, Austria 21-25 November 1994.
19. **L. Sági** and L. Koblinger: Comparing the Environmental Consequences of Hypothetical Accidents at VVER Installations of Hungary. Proceedings of the 2nd COSYMA Users Meeting, Budapest 19-21 June 1995.
20. L. Koblinger and **L. Sági**: Calculations for the VVER-type reactor at the Paks NPP (Hungary) with the COSYMA and MACCS codes. Proceedings of the 2nd COSYMA Users Meeting, Budapest 19-21 June 1995.
21. **L. Sági** and L. Koblinger: PRA Level-3 Calculations for the VVER-type-reactor in Hungary. Proceedings of Probability Safety Assessment Methodology and Applications. Seoul, Korea November 26-30,1995. ISBN 89-950024-I7-94550.

22. L. Koblinger and **L. Sági**: PSA Level-3 Calculations for the VVER-type Reactor in Hungary. Fourth Annual Two day Conference on Probabilistic Safety Assessment in the Nuclear Industry (Invited paper). Edinburgh 29/30 November 1995.
23. **L. Sági** and L. Koblinger: Probability Safety Assessment (PSA Level 3) and Emergency Planning. IRPA9 1996 International Congress on Radiation protection. Vienna, Austria, 1996. ISBN 3-9500255-4-5.
24. Fehér István, Gadó János, Macsuga Géza, **Sági László**, Szabó Zoltán, és Vigassy József: A KFKI Kutatóreaktorban kis valószínűséggel bekövetkező balesetek elemzése Budapest 1992. augusztus.
25. L. Pernecky, **L.Sági**,and P. Vértes : Opening of stem generator collector cover Contract No. MFFO 53/93-0769 Project Task No. B8/9. Budapest 2003.
26. **Sági László** : Alrendszer meghibásodások következményei. AEKI jelentés Budapest 2003.
27. **L. Sági**, I. Balásházy, N. Fülöp, and A. Kerekes: Providing Site Specific Data around Paks NPP Budapest 1993.

10. Melléklet. A Kutatóreaktor környezeti kibocsátási modellje és kódrendszere

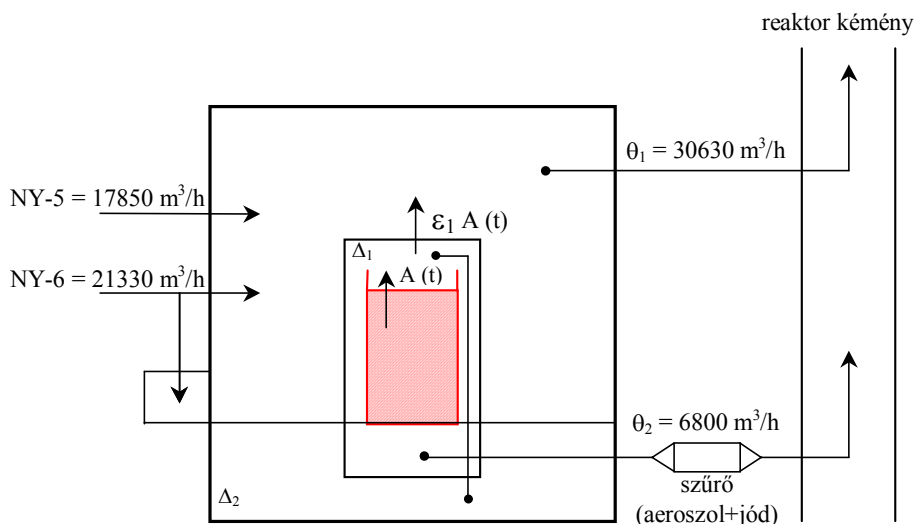
10.1. A környezetbe történő kibocsátás modellje a szellőzés különböző állapotainál

A Budapesti Kutatóreaktor környezeti hatásainak elemzése során a szellőzés öt különböző állapotát vizsgáltam. Az első négy állapot a normálüzemi és üzemzavari esetekben fordulhat elő, míg az ötödik állapot, a reaktorcsarnok sérülése csak baleseti helyzetekben léphet fel. Az alkalmazandó modell függ az állapottól. A 10.1.1-1...10.1.1-4. ábrákon sematikusán illusztráltam a zóna, a reaktorakna stb. elhelyezkedését a reaktorépületben, a szellőzési útvonalakat a reaktorcsarnokba és reaktorcsarnokból a reaktorkéményen, illetve a nyílászárókon keresztül.

10.1.1. Üzemzavari paraméterek

1. szellőzési állapot

1. eset : A teljes szívó/nyomó rendszer normál üzemben működik



10.1.1-1. ábra. Az 1. szellőzési állapot (normál szellőzési állapot)

Feltételezések:

- tökéletes keveredés mind a reaktorcsarnokban, mind a víztér felett, illetve a szivattyúházban,
- $A(t) = \text{konstans}$.

A reaktorcsarnokból a kéménybe közvetlenül (szűrés nélkül) az épület nyílászáróin kikerülő aktivitás:

$$\int_0^{t_0} \varepsilon_1 A / K_1 V (1 - \exp(-K_1 t)) (\theta_1) dt \quad (1)$$

ahol a kikerülés alatt ($t < t_0$) t a kibocsátás kezdetétől eltelt idő, t_0 pedig a kibocsátás időtartama.

A kikerülés befejeződését követően ($t > t_0$)

$$\int_0^{t_0} \varepsilon_1 A / K_1 V (1 - \exp(-K_1 t)) (\theta_1) dt \quad (2)$$

ahol $K_1 = \lambda + k_{1i} F_1 / V + (\theta_1) / V$
 A: a primer víztér fölé kerülő aktivitás [Bq/h]
 k_{1i} : ülepedési sebesség [m/h]
 F_1 : a csarnok felszíne [m^2]
 V : a csarnok térfogata [m^3]
 λ : bomlásállandó [h^{-1}]
 ε_1 : a fedél fölé kerülő aktivitás koefficiense.

A primer víztér fölötti térből, illetve a szivattyúházból a kéménybe (szűrés után) kikerülő aktivitás:

A kibocsátás alatt ($t < t_0$):

$$\int_0^{t_0} (1 - \mu_{1i}) A (1 - \varepsilon_1) / K_2 / (\Delta_1 + \Delta_2) (1 - \exp(-K_2 t)) \theta_2 dt \quad (3)$$

A kikerülés befejeződését követően ($t > t_0$)

$$\int_{t_0}^t (1 - \mu_{1i}) A (1 - \varepsilon_1) / K_2 / (\Delta_1 + \Delta_2) (\exp(K_2 t_0) - 1) \exp(-K_2 t) \theta_2 dt \quad (4)$$

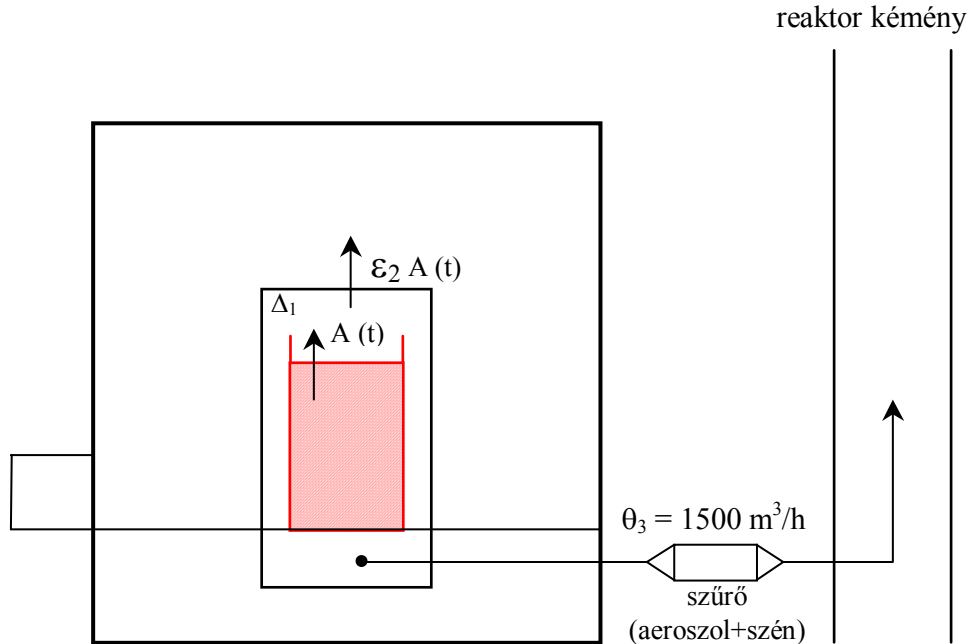
ahol $K_2 = \lambda + k_{2i} F_2 / (\Delta_1 + \Delta_2) + \theta_2 / (\Delta_1 + \Delta_2)$ és
 μ_{1i} : a szűrési hatásfok a S-1 szellőző rendszerben az i-k halmazállapotban (elemi aeroszol és gáz)
 λ : bomlásállandó [h^{-1}]
 F_2 : a víztér feletti tér + a szivattyúház felülete [m^2]
 k_{2i} : ülepedési sebesség a víztér feletti térben, illetve a szivattyúházban [m/h]
 Δ_1 , illetve Δ_2 : a víztér feletti + a tartály alatti, illetve a szivattyúház térfogata [m^3]
 θ_2 : szellőzési sebesség: 6800 [m^3/h]
 ε_1 : szivárgási együttható (0,001)

Az első esetben a kéményen t idő alatt kikerülő hasadványok aktivitása:

$$(1) + (2) + (3) + (4).$$

2. szellőzési állapot

2. eset: Teljes feszültség kimaradással járó üzempazar (1 db pót S₁-1 működik)



10.1.1-2. ábra. A 2. szellőzési állapot (üzempzavari szellőzési állapot)

A primer víztér fölötti, illetve a tartály alatti térből a kéménybe kerülő aktivitás (a szűrést követően):

a kikerülés alatt ($t < t_0$):

$$\int_0^{t_0} (1 - \mu_{2i}) A (1 - \varepsilon_2) / K_3 / \Delta_1 (1 - \exp(-K_3 t)) \theta_3 dt \quad (5)$$

a kikerülést követően ($t > t_0$):

$$\int_{t_0}^t (1 - \mu_{2i}) A (1 - \varepsilon_2) / K_3 / \Delta_1 (\exp(K_3 t_0) - 1) \cdot \exp(-K_3 t) \theta_3 dt \quad (6)$$

ahol: $K_3 = \lambda + k_{3i} F_3 / \Delta_1 + \theta_3 / \Delta_1$

μ_{2i} : a szűrési hatások a pót S-1 szellőző rendszerben az i-k halmazállapotú radioaktív anyagra

λ : bomlásállandó [h^{-1}]

F_3 : a víztér feletti tér + a szivattyúház felülete [m^2]

k_{3i} : ülepedési sebesség a víztér feletti részben [m/h]

Δ_1 : a víztér feletti rész térfogata [m^3]

θ_3 : szellőzési sebesség: (1500) [m^3/h]

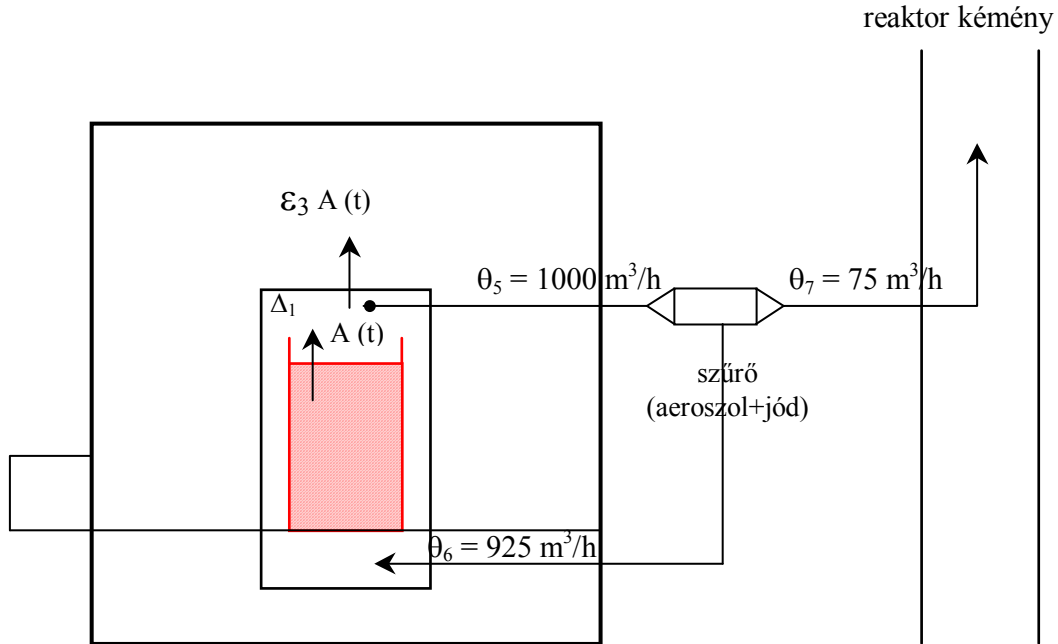
ε_2 : szivárgási együttható (0,01)

A környezetbe kerülő aktivitás:

a kéményen (80 m magasságban): (5) + (6),

3. szellőzési állapot

3. eset: Üzemzavari helyzet. Az S-1 helyett a recirkulációs rendszer működik



10.1.1-3. ábra. A 3. szellőzési állapot (recirkulációs szellőzés)

A reaktorkéményen kibocsátott hasadványok aktivitása a kibocsátás alatt:

A kéményen történő kibocsátás, ha $t < t_0$:

$$\int_0^{t_0} (1 - \mu_{3i}) A (1 - \varepsilon_3) / K_6 / \Delta_1 (1 - \exp(-K_6 t)) \theta_7 dt \quad (7)$$

ha $t > t_0$:

$$\int_0^t (1 - \mu_{3i}) A (1 - \varepsilon_3) / K_6 / \Delta_1 (\exp(K_6 t_0) - 1) \exp(-K_6 t) \theta_7 dt \quad (8)$$

ahol $K_6 = \lambda + k_1 F_3 / \Delta_1 + [\theta_5 - \theta_6 (1 - \mu_{3i})] / \Delta_1$
és

μ_{3i} : a szűrési hatások a pót S-1 szellőző rendszerben az i-k halmazállapotú radioaktív anyagra

λ : bomlásállandó [h^{-1}]

F_3 : a víztér feletti tér + a szivattyúház felülete [m^2]

k_{3i} : ülepedési sebesség a víztér feletti részben [m/h]

Δ_1 : a víztér feletti rész térfogata [m^3]

θ_5 : szellőzési sebesség: (1000) [m^3/h].

θ_6 : szellőzési sebesség: (925) [m^3/h].

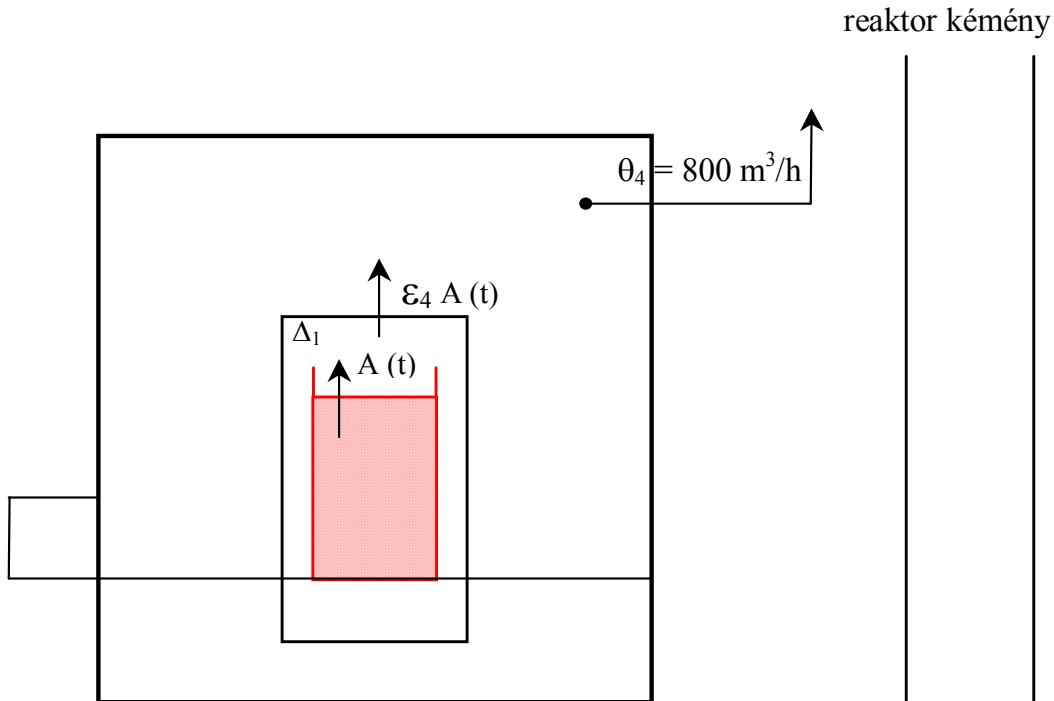
θ_7 : szellőzési sebesség: (75) [m^3/h].

ε_3 : szivárgási együttható (0,01)

A harmadik esetben a reaktorkéményen keresztül kikerülő hasadványok összaktivitása: (7) + (8)

4. Szellőzési állapot

4. eset: Csak a természetes szivárgás lép fel



10.1.1-4. ábra. A 4. szellőzési állapot (természetes szellőzés)

Kibocsátás nyílászárókon (8,5 m effektív magasságban, szűrés nélkül)

ha $t < t_0$:

$$\int_0^{t_0} \varepsilon_4 A / K_4 V (1 - \exp(-K_4 t)) \theta_4 dt \quad (9)$$

ha $t > t_0$:

$$\int_{t_0}^t \varepsilon_4 A / K_4 V (\exp(K_4 t_0) - 1) \exp(-K_4 t) \theta_4 dt \quad (10)$$

ahol $K_4 = \lambda + k_{1i} F_1 / V + \theta_4 / V = K_4$

θ_8 : a természetes szivárgás szellőzési sebessége :800 [m³/h]

a többi paraméter az előzőekben definiált.

A 4. esetben kibocsátott összaktivitás:

reaktorkéményen: (9) + (10)

A környezetbe történő kibocsátásokat a fenti összefüggések szerint számoltam ki. A reaktorcsarnokba és a környezetbe történő radioaktív anyag kibocsátás modellszámításaihoz a következő számszerű paraméter-értékeket használtam:

Szellőzési paraméterek

10.1.1-1. táblázat. Szellőzési paraméterek az 1-4. szellőzési állapotokban

Szellőzési állapot	Szellőzési sebesség [m ³ /h] θ	Felület [m ²] Δ	Térfogat [m ³] V	Szivárgási hányad ε
1	$\theta_1=30630$ $\theta_2=6800$	$\Delta_1+\Delta_2=430$	10^4	$\varepsilon_1=10^{-3}$
2	$\theta_3=1500$	$\Delta_1=30$	10^4	$\varepsilon_2=10^{-2}$
3	$\theta_5=1000$ $\theta_6=925$ $\theta_7=75$	$\Delta_1=30$	10^4	$\varepsilon_3=10^{-2}$
4	$\theta_4=800$	$\Delta_1=30$	10^4	$\varepsilon_4=10^{-1}$

Egyéb paraméterek

10.1.1-2. táblázat. Egyéb paraméterek

Paraméterek	Csoport	Érték
Kikerülési hányad (vízből a fedél alá)	Jód	0,1
	nemesgáz	1
Ülepedési sebesség (k)	Elemi jód	0,005 m/s
	Nemesgáz	0 m/s
	Cézium	0,002 m/s
Szűrési határfok (μ)	Elemi jód	0,999
	Aeroszol	0,999
	Nemesgáz	0

Szivárgási sebesség

A hasadványok a reaktor primer vizének felszínéről történő kibocsátását leíró 'A' konstans értékét a különböző feltételezett végeseményeknél [47] adja meg. A kapott eredményeket a 10.1.1-3. táblázat tartalmazza.

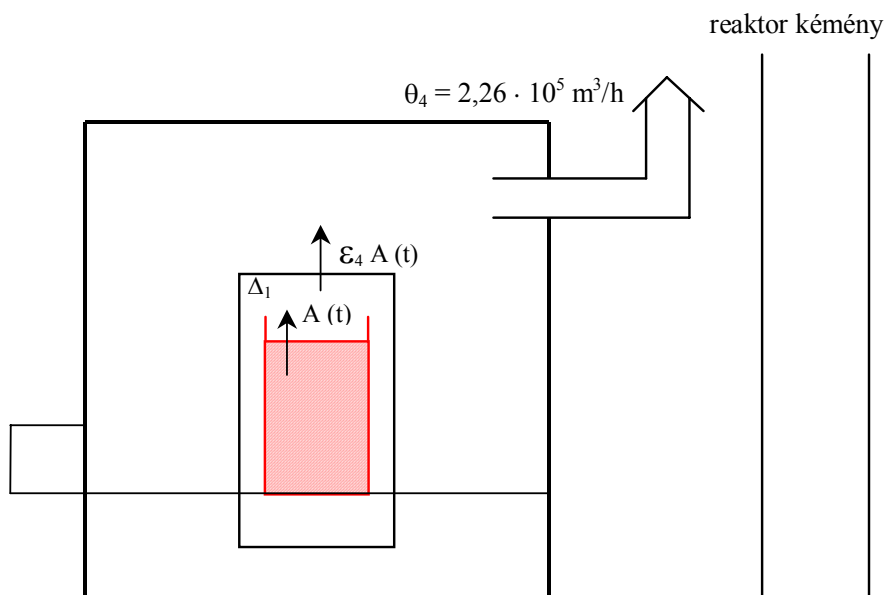
10.1.1-3. táblázat. Kikerülési paraméterek üzemzavari állapotokban (A)

Radionuklid	A kibocsátás típusa, sebessége és időtartama		
	FK1	FK2	FK3
	[10 ⁹ Bq/h] 200 h	[10 ¹³ Bq/h] 0,1 h	[10 ¹⁴ Bq/h] 0,1 h
I-131	2,60E+00	6,70E+00	6,70E+00
I-132	9,00E-02	1,00E+01	1,00E+01
I-133	1,30E+00	1,70E+01	1,70E+01
I-134	6,20E-02	1,90E+01	1,90E+01
I-135	3,90E-01	1,50E+01	1,50E+01
Kr-85m	5,10E-01	3,00E+01	3,00E+00
Kr-88	9,60E-01	8,80E+01	8,80E+00
Xe-133	5,20E+01	1,60E+02	1,60E+01
Xe-135m	2,60E-02	2,60E+01	2,60E+00
Xe-135	3,70E-01	1,00E+01	1,00E+00
Rb-88	9,60E-01	8,80E+01	8,80E+00

FK1: 1-es fűtőelemkárosodás (felületi forrás), FK2: 2-es fűtőelemkárosodás (lokális hűtéskimaradás, olvadás vízben), FK3: 3-as fűtőelemkárosodás (vízszint csökkenés, a zóna egy része szárazra kerül)

10.1.2. Súlyos baleseti paraméterek

Kikerülési modell



10.1.2-1. ábra. Az 5. szellőzési állapot (kvázi inhermetikusság megszűnése)

Kikerülési paraméterek

10.1.2-1. táblázat. Kikerülési paraméterek teljes zónaolvadás feltételezésével (A)

Radionuklid	A kibocsátás típusa, sebessége és időtartama teljes zónaolvadás (TZO) esetén	
	Csepegés [10 ¹³ Bq/h] 0,1 h	Kavitáció [10 ¹⁰ Bq/h] 150 h
I-131	6,40E+02	1,06E+02
I-132	9,08E+02	1,51E+02
I-133	1,45E+02	2,42E+02
I-134	1,62E+02	2,70E+02
I-135	1,26E+02	2,10E+02
Kr-85m	6,60E+03	0,00E+00
Kr-88	1,90E+04	0,00E+00
Xe-133	3,50E+04	0,00E+00
Xe-135m	5,74E+03	0,00E+00
Xe-135	2,29E+03	0,00E+00
Rb-88	1,90E+04	0,00E+00
Cs-137	8,76E+00	2,92E-02
Cs-134	4,54E+00	1,50E-02
Cs-136	1,58E+00	5,26E-03
Ru-103	1,59E+02	1,06E+00
Ru-106	8,76E+00	5,84E-02
Zr-95	5,66E+00	1,88E+00
Nb-95	5,20E+00	2,60E+02
Mo-99	3,52E+03	1,17E+03
Ba-140	6,52E+00	2,17E+00
La-140	6,54E+00	2,18E+00
Ce-141	6,16E+00	2,05E+00
Pu-239	7,16E-05	2,30E-05
Pu-240	5,86E-05	1,95E-05

10.2. A kikerülési modelleket felhasználó kódrendszer

Az előző pontokban leírt modellek felhasználásával egy számítógépes kódrendszert [Sági László: A Budapesti Kutatóreaktor VBJ-ben alkalmazott terjedési modell és az erre épülő kódrendszer Budapest 2005 november 15.] (KUTATO1) fejlesztettem ki. A Fortran nyelven írt program alkalmas különböző szellőzési állapotban, a reaktorcsarnokban tartózkodók dózisének számítására, valamint a környezetbe való kibocsátott aktivitás számítására. A program korábban a környezeti dóziseket is becsülte, de ezen eredményeket az EU uniós ajánlások alapján – a jelen program kibocsátási adataira épülve – a PC COSYMA program számolja. A kód egyetlen egy input fájlt (INPUTRE2.dat) használ fel, amelyben a szellőzési állapotra és a fűtőelem károsodásokra vonatkozó bemenő adatokat rögzíti. A program egyetlenegy kimenő adatfájlja (OUTPUTR2) a reaktorcsarnokban tartózkodók dózisait, a kéményen, illetve nyílászárókon kibocsátott aktivitásokat tartalmazza.

A program felhasználóbarát, a bemenő paraméterek egyetlen egy input fájlban állíthatók be. Az INPUTRE.dat fájlban a következő paraméterek beállítása történik:

SZELLŐZESI PARAMETEREK [" S(l,k) "]:

(a szellőzési állapotnak megfelelő szellőzési paraméterek, helyiség térfogatok és felületek)

SZIVARGASI PARAMETEREK [" A(i,j) "] (Bq/h)

(Nuklidonként és fűtőelemkárosodásonként)

IDOPARAMETEREK [" T0(j) "] (h):

(Szivárgási idő fűtőelemkárosodásonként)

OBLITES BEFEJEZESE [" T(l,j) "] (h):

(Szellőzési állapotonként és fűtőelemkárosodásonként)

NUKLIDPARAMETEREK [" N(i,s) "]:

(Bomlási állandók, ülepedési sebességek, szűrési hatások nuklidonként)

DÓZISKONVERZIOS TENYEZOK [" M (i,jk) "]

(a programba be van építve, de nem használjuk, helyette került alkalmazásra a PC COSYMA program)

11. I. függelék. Forrástag paraméterek

11.1. Az üzemzavari esetek kiindulási paramétere

11.1.1. A Kutatóreaktor

Zónaleltár

11.1.1-1. táblázat. A Kutatóreaktor zónaleltára 60%-os kiégettségnél [48] alapján

Sorszám	Radio-nuklid	1 db fűtőelem aktivitás [Bq]	Teljes zóna aktivitás [Bq]
1	Kr-85m	3,00E+13	6,60E+15
2	Kr-88	8,64E+43	1,90E+46
3	Rb-88	8,64E+13	1,90E+16
4	Xe-133	1,59E+14	3,50E+16
5	Xe-135m	2,61E+13	5,74E+15
6	Xe-135m	1,04E+13	2,29E+15
7	I-131	7,27E+13	1,60E+16
8	I-132	1,03E+14	2,27E+16
9	I-133	1,65E+14	3,63E+16
10	I-134	1,85E+14	4,06E+16
11	I-135	1,43E+14	3,15E+16
12	Cs-137	1,99E+12	4,38E+14
13	Zr-95	1,29E+14	2,83E+16
14	Nb-95	1,18E+14	2,60E+16
15	Ru103	7,23E+13	1,59E+16
16	Ru-106	3,98E+12	8,76E+14
17	Cs-134	1,03E+12	2,27E+14
18	Ce-144	5,36E+13	1,18E+16
19	Pu239	1,63E+09	3,58E+11
20	Pu-240	1,33E+09	2,93E+11
21	Mo-99	8,00E+13	1,76E+16
22	Cs-136	3,59E+11	7,90E+13
23	Ba-140	1,48E+14	3,26E+16
24	La-140	1,49E+14	3,27E+16
25	Ce-141	1,40E+14	3,08E+16

Üzemzavari aktivitás kibocsátások

11.1.1-2. táblázat. A környezetbe kikerülő aktivitások FK1 esetén

Radio-nuklid	COSYMA sorszám	Kibocsátott aktivitások a különböző szellőzési állapotban (abszolút értékben és a fűtőelem leltár %-ában)							
		1		2		3		4	
		Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]
Kr-85m	43	1,01E+11	3,40E-01	1,01E+11	3,40E-01	7,54E+09	2,50E-02	3,43E+09	1,10E-02
Kr-88	46	1,89E+11	2,20E-01	1,89E+11	2,20E-01	1,41E+10	1,60E-02	4,69E+09	5,40E-03
Rb-88	48	2,46E+08	2,80E-04	1,44E+08	1,70E-04	9,61E+06	1,10E-05	6,16E+08	7,10E-04
I-131	114	2,99E+08	4,10E-04	1,99E+08	2,70E-04	1,14E+07	1,60E-05	3,82E+08	5,30E-04
I-132	115	1,02E+07	1,00E-05	6,88E+06	6,70E-06	3,95E+05	3,80E-07	1,29E+07	1,30E-05
I-133	115	1,49E+08	9,00E-05	9,96E+07	6,00E-05	5,72E+06	3,50E-06	1,90E+08	1,20E-04
I-134	117	6,68E+06	3,60E-06	4,57E+06	2,50E-06	2,62E+05	1,40E-07	8,21E+06	4,40E-06
I-135	118	4,46E+07	3,10E-05	2,99E+07	2,10E-05	1,71E+06	1,19E-06	5,68E+07	4,00E-05
Xe-133	121	1,04E+13	6,54E+00	1,03E+13	6,47E+00	7,72E+11	4,85E-01	9,54E+11	6,00E-01
Xe-135m	122	4,45E+09	2,00E-02	4,89E+09	1,90E-02	3,57E+08	1,40E-03	1,51E+07	5,80E-05
Xe-135	123	7,36E+10	7,10E-01	7,31E+10	7,00E-01	5,48E+09	5,30E-02	3,78E+09	3,60E-02
Összesen		1,08E+13	1,01E+00	1,07E+13	1,00E+00	8,00E+11	7,50E-02	9,67E+11	9,00E-02

11.1.1-3. táblázat. Környezetbe kikerülő aktivitások FK2 esetén

Radio-nuklid	COSYMA sorszám	Kibocsátott aktivitások a különböző szellőzési állapotban (abszolút értékben és a fűtőelem leltár %-ban)							
		1		2		3		4	
		Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Ki./leltár [%]
Kr-85m	43	2,97E+13	9,90E+01	2,96E+13	9,87E+01	2,22E+12	7,40E+00	9,59E+11	3,20E+00
Kr-88	46	8,66E+13	1,00E+02	8,67E+13	1,00E+02	6,49E+12	7,51E+00	2,11E+12	2,44E+00
Rb-88	48	1,13E+11	1,30E-01	6,59E+10	7,60E-02	4,41E+09	5,10E-03	2,83E+11	3,30E-01
I-131	114	3,85E+09	5,30E-03	2,57E+09	3,50E-03	1,47E+08	2,00E-04	4,92E+09	6,80E-03
I-132	115	5,68E+09	5,50E-03	3,82E+09	3,70E-03	2,19E+08	2,10E-04	7,15E+09	6,90E-03
I-133	115	9,76E+09	5,90E-03	6,51E+09	3,90E-03	3,74E+08	2,30E-04	1,25E+10	7,60E-03
I-134	117	1,06E+10	5,70E-03	7,23E+09	3,90E-03	4,15E+08	2,20E-04	1,30E+10	7,00E-03
I-135	118	8,59E+09	6,00E-03	5,74E+09	4,00E-03	3,30E+08	2,30E-04	1,09E+10	7,60E-03
Xe-133	121	1,06E+14	6,66E+01	1,58E+14	9,93E+01	1,19E+13	7,48E+00	9,85E+12	6,19E+00
Xe-135m	122	2,22E+13	8,51E+01	2,44E+13	9,35E+01	1,79E+12	6,86E+00	7,58E+10	2,90E-01
Xe-135	123	9,95E+12	9,56E+01	9,89E+12	9,50E+01	7,41E+11	7,12E+00	4,41E+11	4,24E+00
Összesen		2,55E+14	2,39E+01	3,09E+14	2,89E+01	2,31E+13	2,17E+00	1,38E+13	1,29E+00

11.1.1-4. táblázat. Környezetbe kikerülő aktivitások FK3 esetén

Radio-nuklid	COSYMA sorszám	Kibocsátott aktivitások a különböző szellőzési állapotban (abszolút értékben és a fűtőelem leltár %-ban)							
		1		2		3		4	
		Kib. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kibocs. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kib. [Bq]	Kib./leltár [%]	Kib. [Bq]	Kib./leltár [%]
Kr-85m	43	2,97E+13	9,90E+01	2,96E+13	9,87E+01	2,22E+12	7,40E+00	9,59E+11	3,20E+00
Kr-88	46	8,66E+13	1,00E+02	8,67E+13	1,00E+02	6,49E+12	7,51E+00	2,11E+12	2,44E+00
Rb-88	48	1,13E+11	1,30E-01	6,59E+10	7,60E-02	4,41E+09	5,10E-03	2,83E+11	3,30E-01
I-131	114	3,85E+10	5,30E-02	2,57E+10	3,50E-02	1,47E+09	2,00E-03	4,92E+10	6,80E-02
I-132	115	5,68E+10	5,50E-02	3,82E+10	3,70E-02	2,19E+09	2,10E-03	7,15E+10	6,90E-02
I-133	115	9,76E+10	5,90E-02	6,51E+10	3,90E-02	3,74E+09	2,30E-03	1,25E+11	7,60E-02
I-134	117	1,06E+11	5,70E-02	7,23E+10	3,90E-02	4,15E+09	2,20E-03	1,30E+11	7,00E-02
I-135	118	8,59E+10	6,00E-02	5,74E+10	4,00E-02	3,30E+09	2,30E-03	1,09E+11	7,60E-02
Xe-133	121	1,06E+14	6,66E+01	1,58E+14	9,93E+01	1,19E+13	7,48E+00	9,85E+12	6,19E+00
Xe-135m	122	2,22E+13	8,51E+01	2,44E+13	9,35E+01	1,79E+12	6,86E+00	7,58E+10	2,90E-01
Xe-135	123	9,95E+12	9,56E+01	9,89E+12	9,50E+01	7,41E+11	7,12E+00	4,41E+11	4,24E+00
Összesen		2,55E+14	2,39E+01	3,09E+14	2,90E+01	2,32E+13	2,17E+00	1,42E+13	1,33E+00

Súlyos baleseti aktivitás kibocsátások

11.1.1-5. táblázat. A számított környezeti kibocsátások Bq-ben TZO esetén

Radio-nuklid	COSYMA sorszám	Csepegési fázis	Kavitációs fázis	Teljes
Kr-85m	43	6,5500E+15	0	6,55E+15
Kr-88	46	1,8800E+16	0	1,88E+16
Rb-88	48	1,7200E+16	0	1,72E+16
Mo-99	75	2,5900E+15	1,3300E+15	3,92E+15
Ru-103	83	1,4900E+14	1,5400E+12	1,51E+14
Ru-106	85	8,1300E+12	8,1300E+10	8,21E+12
I-131	114	4,3500E+14	1,1200E+14	5,47E+14
I-132	115	6,1400E+14	1,5200E+14	7,66E+14
I-133	116	1,0200E+14	2,4500E+14	3,47E+14
I-134	117	1,0600E+14	2,6900E+14	3,75E+14
I-135	118	8,8200E+13	2,1400E+14	3,02E+14
Xe-133	121	3,5000E+16	0	3,50E+16
Xe-135m	122	5,1100E+15	0	5,11E+15
Xe-135	123	2,2900E+15	1,4900E+16	1,72E+16
Cs-134	126	4,2000E+12	2,1000E+10	4,22E+12

Radio-nuklid	COSYMA sorszám	Csepegési fázis	Kavitációs fázis	Teljes
Cs-136	128	1,4900E+12	7,4200E+09	1,50E+12
Cs-137	129	8,2200E+12	4,0600E+11	8,63E+12
Ba-140	132	6,0700E+12	3,0800E+12	9,15E+12
La-140	133	6,0700E+12	3,0800E+12	9,15E+12
Ce-141	136	5,7900E+12	2,9400E+12	8,73E+12
Összeg		8,9074E+16	5,9783E+16	6,55E+15

11.1.2. A paksi atomerőmű primerköri víz leltára

11.1.2-1. táblázat. A számításokban feltételezett primerköri víz leltára egy blokkra vonatkozóan

Radionuklid	Aktivitás
Br- 84	1,20E+12
Kr- 85	1,48E+10
Kr-85m	5,96E+12
Kr- 87	5,40E+12
Kr- 88	1,35E+13
Rb- 88	1,43E+13
Kr- 89	3,18E+12
Rb- 89	4,52E+12
Sr- 89	1,90E+10
Rb- 90	3,96E+12
Sr- 90	8,77E+07
Sr- 91	2,89E+11
Sr- 92	2,59E+12
I -131	3,00E+13
I -132	4,30E+13
I -133	3,00E+13
Xe-133	1,41E+14
I -134	1,60E+13
Cs-134	1,71E+11
I -135	2,00E+13
Xe-135	6,81E+13
Cs-137	2,12E+11

Radionuklid	Aktivitás
Xe-138	6,25E+12
Cs-138	1,08E+13
Ba-139	4,33E+12
Ba-140	7,48E+10
Ru-103	2,93E+11
Ru-106	2,06E+09

11.1.3. Környezeti kibocsátások

Csőtöréses esetek

11.1.3-1. táblázat. Kibocsátás a környezetbe csőtöréses esetekben. I. rész.

COSYMA csoport	Radio-nuklid	Üzemzavari kibocsátás [Bq]				
		73a2	90cca2	90tka2	111a2	233a2
1	Kr-85m	7,59E+11	3,32E+11	8,26E+11	1,94E+11	2,40E+11
1	Kr-85	2,42E+11	8,21E+10	4,04E+11	4,15E+10	5,00E+10
1	Kr-87	2,58E+11	1,23E+11	1,60E+11	9,63E+10	1,24E+11
1	Kr-88	9,50E+11	4,43E+11	8,75E+11	2,81E+11	3,51E+11
1	Xe-133	1,70E+13	5,81E+12	2,80E+13	2,95E+12	3,55E+12
1	Xe-135	3,65E+12	1,35E+12	5,70E+12	6,75E+11	8,02E+11
1	Xe-135m	4,46E+11	1,85E+11	5,37E+11	1,06E+11	1,30E+11
2	I-131	3,17E+12	1,09E+12	5,24E+12	5,50E+11	6,62E+11
2	I-132	1,35E+12	6,33E+11	1,95E+12	3,46E+11	3,98E+11
2	I-133	4,95E+12	1,82E+12	7,45E+12	9,46E+11	1,14E+12
2	I-134	4,46E+11	2,33E+11	2,92E+11	1,84E+11	2,19E+11
2	I-135	2,73E+12	1,12E+12	3,32E+12	6,29E+11	7,72E+11
3	Cs-134	6,72E+10	2,28E+10	1,12E+11	1,15E+10	1,39E+10
3	Cs-137	6,32E+10	2,15E+10	1,06E+11	1,08E+10	1,31E+10
3	Cs-136	1,88E+10	6,42E+09	3,12E+10	3,25E+09	3,91E+09
4	Te-127m	8,67E+09	2,95E+09	1,45E+10	1,49E+09	1,79E+09
4	Te-127	4,19E+10	1,42E+10	7,02E+10	7,12E+09	8,57E+09
4	Te-129m	2,62E+10	8,91E+09	4,37E+10	4,50E+09	5,42E+09
4	Te-129	6,05E+10	2,48E+10	7,71E+10	1,37E+10	1,68E+10
4	Te-131	3,02E+10	1,16E+10	3,04E+10	9,09E+09	1,17E+10
4	Te-132	6,33E+11	2,19E+11	1,02E+12	1,12E+11	1,35E+11
4	Te-131m	7,18E+10	2,57E+10	1,11E+11	1,33E+10	1,61E+10
4	Sb-127	4,06E+10	1,40E+10	6,60E+10	7,12E+09	8,59E+09
4	Sb-129	4,00E+10	1,76E+10	4,30E+10	1,04E+10	1,28E+10
5	Sr-90	4,92E+10	1,67E+10	8,23E+10	8,44E+09	1,02E+10
5	Sr-89	6,46E+11	2,20E+11	1,08E+12	1,11E+11	1,34E+11
5	Sr-91	3,57E+11	1,40E+11	4,71E+11	7,60E+10	9,29E+10

COSYMA csoport	Radio-nuklid	Üzemzavari kibocsátás [Bq]				
		73a2	90cca2	90tka2	111a2	233a2
5	Ba-140	9,16E+11	3,13E+11	1,52E+12	1,58E+11	1,91E+11
6	Mo-99	8,36E+11	2,91E+11	1,34E+12	1,48E+11	1,79E+11
6	Tc-99m	7,51E+11	2,57E+11	1,23E+12	1,30E+11	1,57E+11
6	Ru-103	8,17E+11	2,78E+11	1,36E+12	1,41E+11	1,69E+11
6	Ru-105	1,47E+11	6,43E+10	1,59E+11	3,78E+10	4,67E+10
6	Ru-106	2,31E+11	7,85E+10	3,86E+11	3,96E+10	4,78E+10
6	Rh-105	3,86E+11	1,35E+11	6,12E+11	6,91E+10	8,34E+10
7	Ce-141	9,87E+11	3,36E+11	1,64E+12	1,70E+11	2,04E+11
7	Ce-143	6,55E+11	2,33E+11	1,02E+12	1,20E+11	1,46E+11
7	Ce-144	7,82E+11	2,66E+11	1,31E+12	1,34E+11	1,62E+11
7	Zr-95	1,09E+12	3,71E+11	1,82E+12	1,88E+11	2,26E+11
7	La-140	9,01E+11	3,06E+11	1,51E+12	1,55E+11	1,86E+11

11.1.3-2. táblázat. Kibocsátás a környezetbe csőtörés esetekben. II. rész

Nuklid csoport	Radio-nuklid	277a2	492a2	492a2tnuh5	492am	Nyomástartó szeleppnyitás
1	Kr-85m	7,80E+11	9,304E+11	6,38E+12	5,82E+12	6,8E+08
1	Kr-85	1,66E+11	1,738E+11	8,28E+11	1,10E+12	1,2E+08
1	Kr-87	3,69E+11	6,010E+11	7,36E+12	3,69E+12	4,3E+08
1	Kr-88	1,12E+12	1,442E+12	1,17E+13	8,98E+12	1,0E+09
1	Xe-133	1,18E+13	1,238E+13	5,96E+13	7,81E+13	9,1E+09
1	Xe-135	2,67E+12	2,788E+12	1,31E+13	1,76E+13	2,0E+09
1	Xe-135m	4,15E+11	5,184E+11	5,26E+12	3,21E+12	3,7E+08
2	I-131	2,20E+12	2,309E+12	1,11E+13	1,46E+13	1,7E+09
2	I-132	1,29E+12	1,572E+12	1,21E+13	9,82E+12	1,1E+09
2	I-133	3,78E+12	4,058E+12	2,11E+13	2,56E+13	3,0E+09
2	I-134	6,33E+11	1,142E+12	1,66E+13	6,96E+12	8,3E+08
2	I-135	2,53E+12	2,893E+12	1,79E+13	1,82E+13	2,1E+09
3	Cs-134	4,62E+10	4,831E+10	2,30E+11	3,05E+11	3,5E+07
3	Cs-137	4,34E+10	4,540E+10	2,16E+11	2,86E+11	3,3E+07
3	Cs-136	1,30E+10	1,364E+10	6,54E+10	8,60E+10	1,0E+07
4	Te-127m	5,96E+09	6,235E+09	2,97E+10	3,93E+10	4,6E+06
4	Te-127	2,85E+10	2,970E+10	1,39E+11	1,87E+11	2,1E+07
4	Te-129m	1,80E+10	1,887E+10	9,00E+10	1,19E+11	1,3E+07

Nuklid csoport	Radio-nuklid	277a2	492a2	492a2tnuh5	492am	Nyomástartó szelepnnyitás
4	Te-129	5,53E+10	6,162E+10	3,42E+11	3,88E+11	4,5E+07
4	Te-131	3,26E+10	6,207E+10	8,82E+11	3,77E+11	4,4E+07
4	Te-132	4,48E+11	4,720E+11	2,31E+12	2,98E+12	3,4E+08
4	Te-131m	5,32E+10	5,680E+10	2,88E+11	3,58E+11	4,1E+07
4	Sb-127	2,85E+10	3,000E+10	1,45E+11	1,89E+11	2,2E+07
4	Sb-129	4,16E+10	4,991E+10	3,45E+11	3,12E+11	3,6E+07
5	Sr-90	3,38E+10	3,536E+10	1,68E+11	2,23E+11	2,6E+07
5	Sr-89	4,45E+11	4,653E+11	2,22E+12	2,94E+12	3,4E+08
5	Sr-91	3,06E+11	3,406E+11	1,96E+12	2,14E+12	2,5E+08
5	Ba-140	6,34E+11	6,648E+11	3,19E+12	4,19E+12	4,9E+08
6	Mo-99	5,95E+11	6,280E+11	3,08E+12	3,96E+12	4,6E+08
6	Tc-99m	5,21E+11	5,450E+11	2,59E+12	3,44E+12	4,0E+08
6	Ru-103	5,63E+11	5,890E+11	2,81E+12	3,72E+12	4,3E+08
6	Ru-105	1,52E+11	1,810E+11	1,23E+12	1,13E+12	1,3E+08
6	Ru-106	1,59E+11	1,661E+11	7,91E+11	1,05E+12	1,2E+08
6	Rh-105	2,77E+11	2,918E+11	1,42E+12	1,84E+12	2,1E+08
7	Ce-141	6,79E+11	7,109E+11	3,39E+12	4,49E+12	5,2E+08
7	Ce-143	4,82E+11	5,137E+11	2,58E+12	3,24E+12	3,7E+08
7	Ce-144	5,38E+11	5,623E+11	2,68E+12	3,55E+12	4,1E+08
7	Zr-95	7,51E+11	7,864E+11	3,75E+12	4,96E+12	5,8E+08
7	La-140	6,19E+11	6,469E+11	3,08E+12	4,08E+12	4,7E+08

Bypass esetek

11.1.3-3. táblázat. Kibocsátások gőzfejlesztő sérülés esetén [Bq]

COSYMA csoport	Radionuklid	Kibocsátás	
		3 cső törése	Kollektor fedél felnyílás
1	Kr-85m	4,949E+12	5,299E+12
1	Kr- 85	1,423E+10	1,468E+10
1	Kr-87	3,209E+12	3,733E+12
1	Kr-88	1,037E+13	1,134E+13
1	Xe-133	1,356E+14	1,400E+14
1	Xe-135	6,214E+13	6,499E+13
1	Xe-135m	2,266E+12	2,132E+12
2	I-131	2,881E+13	2,975E+13
2	I-132	3,131E+13	3,464E+13
2	I-133	2,798E+13	2,911E+13
2	I-134	7,883E+12	9,594E+12
2	I-135	1,742E+13	1,843E+13
3	Cs-134	1,643E+11	1,695E+11
3	Cs-137	2,039E+11	2,104E+11
5	Sr-90	8,515E+07	8,785E+07
5	Sr-89	1,914E+10	1,966E+10
5	Sr-91	2,598E+11	2,728E+11
5	Ba-140	7,189E+10	7,421E+10
6	Mo-99	0,000E+00	0,000E+00
6	Tc-99m	0,000E+00	0,000E+00
6	Ru-103	2,824E+11	2,914E+11
6	Ru-106	1,984E+09	2,047E+09
7	La-140	1,209E+09	9,366E+08

11.2. Súlyos balesetek kiindulási paraméterei

11.2.1. A Paksi atomerőmű zónaleltára

11.2.1-1. táblázat. A paksi atomerőmű zónaleltárai egy blokkra

Meg- nevezés	Pihentető medence zónaleltára *	Leállási zónaleltár Átrakás előtt 15.eset	Leállási zónaleltár Átrakás után 14.eset	Üzemi zónaleltár 1-13. eset
Kr-85m	1,29E+03	3.29E+14	-	3,42E+17
Kr-85	7,28E+16	8,58E+15	5,72E+15	8,59E+15
Kr-87	-	1,47E+07	-	6,56E+17
Kr-88	-	2,85E+14	-	9,24E+17
Xe-135m	6,88E+07	3,57E+15	-	5,26E+17
Xe-133	1,15E+18	2,39E+18	4,25E+17	2,67E+18
Xe-135	6,06E+11	1,77E+17	7,13E+08	5,26E+17
I-131	7,22E+17	1,14E+18	3,20E+17	1,30E+18
I-132	3,28E+17	1,29E+18	9,49E+16	1,87E+18
I-133	2,38E+15	6,13E+17	4,02E+14	2,64E+18
I-134	-	-	-	2,90E+18
I-135	4,26E+08	2,24E+16	5,14E+04	2,47E+18
Cs-137	6,91E+17	1,91E+17	1,29E+17	1,91E+17
Cs-134	9,05E+17	2,24E+17	1,50E+17	2,24E+17
Cs-136	7,39E+16	8,56E+16	3,31E+16	9,40E+16
Sb-127	-	1,12E+17	1,14E+16	1,53E+17
Sb-129	-	3,41E+14	-	4,58E+17
Te-127m	2,89E+16	1,79E+16	1,16E+16	1,79E+16
Te-127	5,81E+16	1,17E+17	2,16E+16	1,42E+17
Te-129m	7,02E+16	6,11E+16	3,31E+16	6,29E+16
Te-129	4,57E+16	4,02E+16	2,16E+16	4,22E+17
Te-131	4,96E+14	1,55E+16	3,09E+13	1,18E+18
Te-132	3,18E+17	1,27E+18	9,20E+16	1,89E+18
Sr-89	1,03E+18	1,26E+18	7,36E+17	1,30E+18
Sr-90	4,67E+17	6,74E+16	4,53E+16	6,73E+16
Sr-91	2,27E+11	5,99E+16	4,17E+08	1,59E+18

Ba-140	1,59E+18	2,29E+18	8,03E+17	2,33E+18
Mo-99	2,92E+17	1,54E+18	7,289E+16	2,48E+18
Ce-141	2,08E+18	2,16E+18	1,17E+18	2,25E+18
Ce-143	2,42E+16	8,08E+17	2,72E+15	2,06E+18
Ce-144	2,81E+18	1,40E+18	9,177E+17	1,41E+18
La-140	1,83E+18	2,11E+18	9,14E+17	2,39E+18
Pu-238	-	1,42E+15	9,60E+14	1,42E+15
Pu-239	-	4,10E+14	2,77E+14	4,07E+14
Pu-240	-	4,07E+14	2,72E+14	4,07E+14
Pu-241	-	1,60E+17	1,07E+17	1,60E+17

*A jelen tanulmány nem tárgyalja a pihentető medence meghibásodásos eseteket

11.2.2. Névleges teljesítmény baleseti bocsátásai

A számításokban felhasznált kikerülő aktivitások (a zónaleltár %-ban)

1. Nagynyomású reaktortartály törés - 1. baleseti scenárió (gyakoriság: $6,83 \cdot 10^{-8}$ /reaktorév)

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,11	11,11	16,16	27,77	36,11	55,55	
Nemesgázok	8,68E-05	8,44E-01	6,50E-02	3,80E-02	6,99E-03	7,00E-03	9,61E-01
Jódcsoport	3,35E-07	7,71E-01	1,99E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,73E-01
Céziumcsoport	3,27E-07	7,58E-01	1,99E-03	0,00E+00	0,00E+00	5,16E-04	7,61E-01
Tellurcsoport	0,00E+00	2,74E-05	2,00E-07	1,52E-05	5,25E-04	3,04E-03	3,61E-03
Stronciumcsoport	0,00E+00	1,24E-02	0,00E+00	9,99E-05	0,00E+00	0,00E+00	1,25E-02
Molibdénsoport	1,23E-10	4,94E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-03	4,95E-01
Plutoniumcsoport	0,00E+00	1,00E-10	9,99E-13	2,74E-08	5,80E-08	1,15E-07	2,01E-07

2. By-pass - 2. baleseti scenárió

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	10,91	11,11	11,38	12,5	13,88	55,55	
Nemesgázok	4,09E-04	1,35E-01	4,87E-01	1,60E-01	3,20E-02	4,70E-02	8,61E-01
Jódcsoport	2,42E-04	4,05E-02	7,73E-02	6,70E-02	4,60E-02	2,20E-02	2,53E-01
Céziumcsoport	2,42E-04	4,00E-02	7,67E-02	6,80E-02	4,81E-02	2,20E-02	2,55E-01
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stronciumcsoport	5,00E-09	7,91E-06	9,91E-05	1,06E-03	2,68E-03	2,10E-04	4,06E-03
Molibdénsoport	2,45E-08	5,08E-05	3,87E-03	4,25E-02	7,98E-02	6,00E-03	1,32E-01
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,51E-08	1,51E-08

3. Korai konténment törés - 3. baleseti scenárió (gyakoriság: $3,98 \cdot 10^{-6}$ /reaktorév)

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	5,83	11,11	13,88	16,66	27,77	48,05	
Nemesgázok	0,00E+00	5,06E-01	3,38E-01	2,00E-02	8,00E-02	4,60E-02	9,90E-01
Jódcsoport	0,00E+00	1,18E-01	5,00E-03	9,99E-04	1,00E-03	1,00E-03	1,26E-01
Céziumcsoport	0,00E+00	1,19E-01	5,52E-03	9,99E-04	4,84E-04	1,00E-03	1,27E-01
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	4,93E-05	8,87E-04	2,14E-04	9,99E-06	1,16E-03
Stronciumcsoport	0,00E+00	5,31E-04	8,09E-04	5,00E-05	5,00E-05	9,99E-06	1,45E-03
Molibdénsoport	0,00E+00	8,05E-03	9,85E-03	9,99E-05	1,00E-04	0,00E+00	1,81E-02
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	1,82E-10	8,62E-09	8,11E-08	1,47E-07	2,37E-07

4. Korai konténment szivárgásnövekedés - 4. baleseti szcenárió

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	41,38	44,44	48,61	55,55	68,88	77,77	
Nemesgázok	0,00E+00	5,74E-03	2,68E-02	9,55E-02	1,22E-01	2,32E-01	4,82E-01
Jódcsoport	0,00E+00	7,61E-04	6,29E-04	4,20E-04	1,10E-04	6,00E-05	1,98E-03
Céziумcsoport	0,00E+00	7,62E-04	6,34E-04	4,20E-04	1,10E-04	6,52E-05	1,99E-03
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stronciumcsoport	0,00E+00	2,58E-06	8,14E-05	1,23E-04	2,90E-05	1,50E-05	2,51E-04
Molibdénsoport	0,00E+00	3,93E-05	3,21E-04	2,98E-04	7,30E-05	3,50E-05	7,66E-04
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	7,08E-08	1,01E-07	2,80E-08	1,90E-08	2,19E-07

5. Késői konténment törés - 5. baleseti szcenárió

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	44,44	50	55,55	61,11	66,66	77,77	
Nemesgázok	4,24E-03	1,86E-02	2,54E-02	3,92E-01	1,13E-01	2,08E-01	7,61E-01
Jódcsoport	6,32E-04	4,88E-04	2,90E-04	1,38E-03	1,06E-03	1,49E-03	5,34E-03
Céziумcsoport	6,27E-04	4,82E-04	2,95E-04	1,30E-03	1,11E-03	1,35E-03	5,16E-03
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stronciumcsoport	1,54E-06	1,04E-05	6,10E-06	8,80E-05	7,10E-05	6,10E-05	2,38E-04
Molibdénsoport	3,02E-05	2,06E-04	9,60E-05	6,68E-04	2,80E-04	1,40E-04	1,42E-03
Plutoniumcsoport	0,00E+00	1,35E-09	8,50E-10	1,24E-08	6,60E-09	2,53E-08	4,65E-08

6. Késői konténment szivárgásnövekedés - 6. baleseti szcenárió (gyakoriság: $1,49 \cdot 10^{-5}$ /reaktorév)

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,11	13,88	20,83	30,55	41,66	48,05	
Nemesgázok	6,39E-07	1,46E-02	2,69E-02	4,88E-02	6,37E-02	3,80E-02	1,92E-01
Jódcsoport	2,53E-09	1,15E-03	5,40E-04	3,50E-04	1,70E-04	6,00E-05	2,27E-03
Céziумcsoport	2,43E-09	1,15E-03	5,40E-04	3,50E-04	1,80E-04	6,00E-05	2,28E-03
Tellurcsoport	0,00E+00	2,14E-06	1,87E-05	7,60E-06	3,80E-06	1,20E-06	3,34E-05
Stronciumcsoport	0,00E+00	1,39E-05	1,02E-05	6,10E-06	3,00E-06	9,00E-07	3,41E-05
Molibdénsoport	0,00E+00	3,19E-04	1,79E-04	1,13E-04	5,70E-05	1,70E-05	6,85E-04
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	7,63E-10	1,45E-09	1,67E-09	8,70E-10	4,75E-09

7. Korai konténment törés, sprinklerrel - 7. baleseti szcenárió (gyakoriság: $1,01 \cdot 10^{-6}$ /reaktorév)

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,66	9,72	13,88	20,83	27,77	48,05	
Nemesgázok	6,02E-03	1,16E-02	4,38E-01	2,19E-01	1,27E-01	1,61E-01	9,63E-01
Jódcsoport	1,39E-05	7,80E-06	8,39E-03	1,10E-04	1,00E-05	2,00E-05	8,55E-03
Céziumcsoport	1,33E-05	7,59E-06	8,68E-03	1,15E-04	4,84E-06	1,99E-05	8,84E-03
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	1,73E-06	2,76E-05	0,00E+00	1,00E-07	2,94E-05
Stronciumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	1,07E-04	1,10E-05	0,00E+00	0,00E+00	1,18E-04
Molibdénecsoport	5,93E-09	5,37E-09	2,51E-03	3,00E-05	0,00E+00	0,00E+00	2,54E-03
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,04E-09	2,17E-09	3,19E-09	1,04E-08

8. Korai konténment szivárgásnövekedés, sprinklerrel - 8. baleseti szcenárió
(gyakoriság: $4,95 \cdot 10^{-8}$ /reaktorév)

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,52	11,11	13,88	16,66	27,77	48,05	
Nemesgázok	1,35E-08	6,65E-04	5,78E-03	3,34E-03	8,68E-02	4,99E-01	5,96E-01
Jódcsoport	0,00E+00	4,91E-05	6,29E-05	1,50E-05	1,19E-04	1,81E-04	4,27E-04
Céziumcsoport	0,00E+00	4,91E-05	6,24E-05	1,55E-05	1,19E-04	1,83E-04	4,29E-04
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	5,31E-08	1,52E-07	5,47E-07	8,38E-07	1,59E-06
Stronciumcsoport	0,00E+00	7,08E-08	8,42E-07	2,27E-07	1,74E-06	2,63E-06	5,51E-06
Molibdénecsoport	0,00E+00	7,57E-07	1,26E-05	3,20E-06	2,43E-05	3,70E-05	7,79E-05
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,27E-10	2,42E-09	2,85E-09

9. Késői konténment törés, sprinklerrel - 9. baleseti szcenárió

Nuklidesoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,66	12,5	19,44	30,55	38,88	48,05	
Nemesgázok	2,02E-06	5,23E-04	6,43E-02	4,02E-01	1,75E-01	1,03E-01	7,45E-01
Jódcsoport	3,42E-09	6,36E-06	1,24E-05	1,70E-05	6,30E-06	5,00E-06	4,71E-05
Céziumcsoport	3,27E-09	6,41E-06	1,36E-05	1,55E-05	5,84E-06	7,84E-06	4,92E-05
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	9,58E-06	2,00E-08	1,20E-08	1,20E-08	9,62E-06
Stronciumcsoport	0,00E+00	1,90E-08	7,30E-07	4,21E-07	2,00E-08	2,00E-08	1,21E-06
Molibdénecsoport	0,00E+00	4,51E-07	3,94E-06	6,90E-07	3,90E-07	3,20E-07	5,79E-06
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	1,19E-10	2,98E-09	1,37E-09	7,30E-10	5,20E-09

10. Késői konténment szivárgásnövekedés, sprinklerrel - 10. baleseti scenárió

Nuklidcsoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,66	13,88	22,22	30,55	36,11	42,77	
Nemesgázok	2,02E-06	6,13E-03	2,56E-02	3,79E-02	2,94E-02	3,80E-02	1,37E-01
Jódcsoport	3,42E-09	3,04E-05	2,04E-05	1,44E-05	7,40E-06	7,00E-06	7,96E-05
Céziumcsoport	3,27E-09	3,02E-05	2,02E-05	1,43E-05	7,35E-07	6,95E-06	7,24E-05
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	1,24E-06	6,10E-07	3,80E-07	4,40E-07	2,67E-06
Stronciumcsoport	0,00E+00	6,75E-07	1,10E-06	6,60E-07	3,40E-07	3,20E-07	3,10E-06
Molibdén-csoport	0,00E+00	1,65E-05	1,89E-05	1,35E-05	6,90E-06	6,50E-06	6,23E-05
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	1,99E-10	1,72E-10	1,00E-10	1,00E-11	4,81E-10

11. Intakt konténment, sprinkler nem működik - 11. baleseti scenárió

Nuklidcsoportok	Időpont [h]						Összeg
	6,66	11,11	16,66	22,22	27,77	48,05	
Nemesgázok	4,00E-05	4,68E-03	2,06E-02	2,04E-02	1,98E-02	5,75E-02	1,23E-01
Jódcsoport	6,83E-07	7,27E-04	6,52E-04	3,70E-04	2,60E-04	4,90E-04	2,50E-03
Céziumcsoport	6,77E-07	7,25E-04	6,49E-04	3,75E-04	2,60E-04	4,90E-04	2,50E-03
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stronciumcsoport	0,00E+00	5,02E-06	7,98E-06	4,00E-06	2,90E-06	5,20E-06	2,51E-05
Molibdén-csoport	5,04E-10	1,20E-04	2,07E-04	1,04E-04	7,30E-05	1,34E-04	6,38E-04
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

12. Intakt konténment, sprinklerrel - 12. baleseti scenárió (gyakoriság: $8,51 \cdot 10^{-6}$ /reaktorév)

Nuklidcsoportok	Időpont [h]						Összeg
	8,33	11,11	15,27	19,44	27,77	48,05	
Nemesgázok	3,77E-05	8,64E-04	8,17E-03	4,93E-03	4,00E-03	7,40E-03	2,54E-02
Jódcsoport	6,45E-08	1,43E-05	1,04E-05	8,30E-06	1,32E-05	2,07E-05	6,70E-05
Céziumcsoport	6,50E-08	1,43E-05	1,03E-05	8,25E-06	1,31E-05	2,05E-05	6,65E-05
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stronciumcsoport	0,00E+00	9,46E-08	9,84E-08	8,00E-08	1,26E-07	1,98E-07	5,97E-07
Molibdén-csoport	0,00E+00	2,18E-06	2,60E-06	2,08E-06	3,34E-06	5,20E-06	1,54E-05
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

13. Részleges zónasérülés - 13. baleseti scenárió (gyakoriság: $6,65 \cdot 10^{-6}$ /reaktorév)

Nuklidcsoportok	Időpont [h]						Összeg
	0,22	0,55	1,11	11,11	22,22	27,77	
Nemesgázok	1,56E-04	1,80E-03	4,50E-04	2,07E-03	3,29E-03	1,55E-03	9,32E-03
Jódcsoport	4,41E-06	2,86E-05	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-07	0,00E+00	3,31E-05
Céziumcsoport	4,39E-06	2,85E-05	0,00E+00	0,00E+00	4,84E-08	0,00E+00	3,29E-05
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stronciumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Molibdénecsoport	4,82E-09	3,49E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,97E-08
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

11.2.3. A leállási baleset kibocsátásai

14. Átrakás utáni zónaolvadási baleset 14. baleseti scenárió (gyakoriság: $4,32 \cdot 10^{-6}$ /reaktorév)

Nuklidcsoportok	Időpont [h]						Összeg
	3,6	8,3	13,88	27,77	55,55	83,3	
Nemesgázok	9,59E-06	2,42E-01	1,64E-01	1,94E-01	2,22E-01	1,03E-01	9,25E-01
Jódcsoport	2,13E-09	1,03E-01	2,30E-03	4,99E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,06E-01
Céziumcsoport	2,11E-09	1,03E-01	2,30E-03	5,50E-04	4,96E-05	4,96E-05	1,06E-01
Tellurcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,17E-05	1,65E-05	8,00E-07	7,90E-05
Stronciumcsoport	0,00E+00	9,37E-05	4,22E-05	7,39E-05	1,19E-05	0,00E+00	2,22E-04
Molibdénecsoport	0,00E+00	2,86E-03	1,34E-03	6,20E-04	3,00E-05	0,00E+00	4,85E-03
Plutoniumcsoport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,32E-10	4,10E-10	6,36E-10	1,18E-09

15. Átrakás előtti zónaolvadási baleset 15. baleseti scenárió (gyakoriság: $3,14 \cdot 10^{-6}$ /reaktorév)

Nuklidcsoportok	Időpont [h]						Összeg
	1,66	13,88	27,77	41,66	55,55	83,33	
Nemesgázok	1,88E-06	5,57E-01	2,01E-01	1,23E-01	6,09E-03	4,19E-03	8,91E-01
Jódcsoport	4,29E-09	1,74E-01	2,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E-01
Céziumcsoport	4,26E-09	1,74E-01	2,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E-01
Tellurcsoport	0,00E+00	1,82E-04	4,70E-05	4,99E-06	1,00E-06	0,00E+00	2,35E-04
Stronciumcsoport	0,00E+00	4,50E-04	1,00E-05	9,99E-07	0,00E+00	0,00E+00	4,61E-04
Molibdénecsoport	0,00E+00	1,12E-01	9,99E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,12E-01
Plutoniumcsoport	0,00E+00	1,85E-09	2,04E-09	1,93E-09	1,12E-09	1,12E-09	8,06E-09

12. II. függelék. Sugárzási és gazdasági paraméterek

12.1. Általános cselekvési szintek

12.1-1. táblázat. Cselekvési szintek élelmiszerre és ivóvízre

Radionuklidok	Általános fogyasztásra szánt élelmiszer [kBq/kg]	Tej, csecsemő élelmiszer és ivóvíz [kBq/kg]
Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106, Sr-89	1	1
I-131		0,1
Sr-90	0,1	
Pu-238, Pu-239 Am-241,	0,01	0,001

12.2. Gazdasági paraméterek

12.2.1.1.1 Kimenekítés (euro/fő)

Keresetkiesés fő/év	Szállítási költségek	Szállásköltségek
8,8E+03	6	18

12.2.1.1.2 Kiköltöztetés (euro/fő)

Keresetkiesés	Szállítási költségek	Szállás költségek	Tőkevesztés			
			munka helyi	lakó helyi	tartós fogy.	földterület
8,8E+03	30	1425	10150	46600	9000	12/m ²

12.2.1.1.3 Étkezési tilalomból eredő veszteségek

Termelési ág	első év /l v. db	következő év /l v. db	Hozam /km ²	megsemmisítés /l v. db
Tejtermelés [l]	0,33	0,18	1,4E+06	0,035
Élőállat [db]	345	185	610	0
Növényterm. [kg]	1,0E+05	5,5E+04	-	0

12.2.1.1.4 Egyéb tényezők (Euro)

Mezőgazdaság újraéledés értéke	5,0E+05
Földtőkeérték veszteség	0%

12.2.1.1.5 Egészségügyi károsodásból eredő veszteségek

Egészségügyi károsodás			Költség [Euró/eset]	Kezelési idő [év]
Akut hatás	Morbidityás	funkcionális tüdőbetegség	1,80E+03	0,1
		csökkent pajzsmirigy- működés	3,8E+03	
		szemlencse hályog	1,25E+03	
		szellemi leépülés	-	
		bőrégés	3,95E+03	
	Mortalitás	tüdővizenyő	6,65E+03	
		vérképzőszervi	1,01E+05	
		emésztő- szervi	5,15E+04	
		születési rendellenességek	-	
Krónikus hatás	Morbidityás	csontvelő rák	4,7E+04	0,5
		csontszarkóma	3,45E+04	
		mellrák	5,5E+03	
		tüdőrák	3,8E+04	
		gyomorrák	3,8E+04	
		pajzsmirigy-rák	5,5E+03	
		bőrrák	3,6E+03	
		maradékok	4,7E+04	
	Mortalitás	csontvelő rák	4,7E+04	1
		csontszarkóma	3,4E+04	
		mellrák	5,5E+03	
		tüdőrák	3,8E+04	
		gyomorrák	3,8E+04	
		pajzsmirigy-rák	5,5E+03	
		bőrrák	3,6E+03	
maradékok	4,7E+04			

13. III. függelék. Módszertani összefoglaló

A dolgozatomban fejezetenként részletesen megtalálhatóak azon módszerek, amelyekkel a tudományos tevékenységemet végeztem. Jelen függelékben röviden összefoglalom ezen módszereket és helyenként kiegészítésekkel éltem. Munkám során első lépést az irodalmazás jelentette, ennek során áttekintettem a hazai és a nemzetközi irodalmat. Megvizsgáltam, hogy milyen kibocsátási, terjedésszámítási modellek állnak rendelkezésre, elemeztem a nemzetközi szakirodalmat és bekapcsolódtam a hazai és a nemzetközi konferenciák munkájába.

A *normálüzemi kibocsátások* elemzése során tájékozódtem az egyes létesítmények tevékenysége során a környezetbe kikerülhető radioaktív anyagok milyenségéről és azok várható mennyiségéről. Megvizsgáltam ezen radioaktív anyagok kémiai és fizikai állapotát, valamint áttekintettem a szóbajóhető légköri kikerülési útvonalakat. Begyűjtöttem az egyes létesítmények környékére jellemző – több évre vonatkozó meteorológiai adatokat : elemeztem a szélirány, szélsébség, stabilitási kategória ill. a csapadéokra vonatkozó adatokat. Ugyancsak elemeztem a létesítmények közelében élő lakosságra vonatkozó adatokat: megvizsgáltam elhelyezkedésüket a kibocsátási ponthoz képest, elemeztem korösszetételüket és életmódjukat. Épületközelben szélsatorna kísérletek eredményeit felhasználva, távolabbi környezetben pedig a helyi adatokkal feltöltött nemzetközi modellek segítségével határoztam meg az egységnyi kibocsátásra vonatkozó nuklidspecifikus dózisterhelést, figyelembe véve valamennyi terhelési útvonalat és korcsoportot. Ezen adatok felhasználásával, valamint az egyes létesítményekre meghatározott dózismegszorításból kiindulva határoztam meg a nuklidspecifikus kibocsátási dóziskorlátokat. Összevetve ezt a létesítmény tervezett ill. tényleges kibocsátásaival ellenőriztem a kibocsátási ill. kivizsgálási kritérium teljesülését.

A nukleáris létesítmények *tervezési üzemzavarai során* megvizsgáltam, hogy rendelkezésre állnak e az ún. forrástagok a későbbi elemzések elvégzéséhez. A *Kutatóreaktor* esetén ilyen épületen belüli terjedési modell nem állt rendelkezésre, így első lépésként el kellett készítenem a radionuklidok aktivitásterjedési modelljét épületen belül. A fűtőelem meghibásodásokból kiindulva végigkövettem a radioaktív anyagok útját a primerköri vízből a reaktorcsarnok szellőzőin keresztül a környezetbe. Megvizsgáltam, hogy adott fűtőelem károsodásnál és szellőzési állapotban milyen mennyi radioaktív anyag kerül ki a környezetbe. Az ilyen módon meghatározott forrástagokból kiindulva, determinisztikus elemzést végeztem a létesítmény közelében élő kritikus lakossági csoportra vonatkozóan. Az Atomreaktornál a forrástagok korábbi tanulmányokból rendelkezésre álltak így itt belső aktivitásterjedési számításokra nem volt szükség, a számításokat a reaktorkéményen történő kibocsátástól követtem nyomon. Mindkét létesítmény esetén ellenőriztem a kritériumok teljesülését, miszerint a tervezési baleseteknek úgy kell lezajlania, hogy korai védőintézkedések bevezetésére ne legyen szükség.

A *súlyos balesetek* elemzésénél a *Kutatóreaktor* esetében a kidolgozott aktivitásterjedési modell felhasználásával meghatározott forrástagból kiindulva épületközelben szélsatorna kísérletekkel, távolabbi környezetben pedig nemzetközi modellekkel történt a várható dózisterhelés

meghatározása. Az *Atomerőmű* esetében az elemzéseket a valószínűségi analízis 2. szintjének (PSA-Level 2) eredményeit, valamint a létesítmény környezetében begyűjtött meteorológiai adatok ismeretében nemzetközi modell (népességi, termelési és gazdasági adatokkal történő) adaptálását követően került sor. A meghatározott társadalmi és egyéni kockázati értékeket összevettem a nemzetközi kritérium értékekkel.

A távoli környezeti elemzéseknél olyan modellt (Gauss féle csóvamodellt) választottam, amelynek becsült hibája nemzetközi szinten elfogadott (30% - on belül) - még a maximális mintavételezési szám esetén is - még elfogadható optimális számítógépi idő mellett.

A dózisbecsléseknél messzemenően felhasználtam az ICRP ajánlásait a kockázati tényezők, dóziskonverziós tényezők stb. tekintetében. A védőintézkedések kritériumainál a NAÜ (IBSS) ajánlásait, valamint az erre épülő szabályozást vettem alapul. Egyéb paraméterek megválasztásánál a Európai Unió programcsomag ajánlásait fogadtam el.

14. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Gadó Jánosnak, az Atomenergia Kutatóintézet igazgatójának, akinek vezetésével, irányításával a hazai létesítmények (kutatóreaktor, atomerőmű) biztonsági jelentései, és ebben a környezeti következmények elemzése teljes körűen elkészültek.

Külön köszönetet mondok Dr. Koblinger Lászlónak, akitől sok hasznos tanácsot kaptam a valószínűségi biztonsági analízis harmadik szintjének (PSA- Level3) elkészítése során.

Köszönetet illeti Dr. Vincze Árpádot, aki a kutatási munkám során sok segítséget nyújtott, témavezetőként irányította kutatásaimat.

Szeretném megköszönni az elemzésekben használt COSYMA kód nemzetközi vezetőinek (Dr. Artur Jones, NRPB, UK, Dr. Jochaim Ehrhardt, Kfk, D). támogatását a kód magyarországi teljes körű adaptálását illetően.

Köszönöm a Paksi Atomerőmű Zrt. Fejlesztési és Elemzési osztály vezetőjének dr. Elter Józsefnek, hogy kérdéseivel és javaslataival segítette munkámat.

Külön köszönöm Dr. Deme Sándor segítségét a lektorálásban, valamint Detréné Németh Ingeborg közreműködését a dolgozatom szerkesztésében.

Budapest 2007.04.11.

Sági László