

Légköri terjedésszámító szoftverek összehasonlítása

Földi Anikó^{*1}, Mészáros Mihály¹, Sági László¹, Deme Sándor¹,
Dombovári Péter², Szántó Attila³, Tóth Krisztina³, Petőfi-Tóth Katalin⁴

¹Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1525 Budapest, Pf. 49

²Paksi Atomerőmű Zrt., 7013 Paks Pf.: 71.

³Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság, 1149 Budapest, Mogyoródi út 43

⁴Országos Atomenergia Hivatal, 1539 Budapest, Pf. 676

*földia@aeki.kfki.hu

A kézirat beérkezett: 2010.08.12.

Közlésre elfogadva: 2010.08.18.

Title: Comparison of programs for atmospheric dispersion calculations

Abstract. At present several atmospheric dispersion codes, e.g. the HotSpot (Health Physics Codes), the RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis) and the PC COSYMA (COde SYstem for MAria), are used by experts involved in radioactive pollution dispersion. The objective of our project was the comparison of the results obtained by the above mentioned codes to those achieved by the BALDOS (Suitable for dispersion and residential exposure modeling in case of accidents), the SINAC (Simulator of Interactive modeling of environmental consequences of Nuclear ACCidents), the RODOS (Real time On-line DecisiOn Support system) and a new atmospheric modeling software named TREX (TRansport-EXchange).

Keywords – Atmospheric dispersion codes, BALDOS, HotSpot, PS COSYMA, RASCAL, RODOS, SINAC, TREX

Kivonat – Jelenleg több légköri terjedésszámító szoftver áll a nukleáris szakemberek rendelkezésére. Munkánk célja, hogy összehasonlítsuk a nemzetközi gyakorlatban alkalmazott HotsSpot (Health Physics Codes), RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis), és PC COSYMA (COde SYstem for MAria) szoftvereket a hazai nukleáris baleset-elhárítási gyakorlatban alkalmazott BALDOS (Off-line baleseti terjedésszámítást és dózisbecslést végző program), RODOS (Real time On-line DecisiOn System), az ugyancsak nukleáris balesetek környezeti hatásának modellezésére szolgáló SINAC (Simulator of Interactive modeling of environmental consequences of Nuclear ACCidents), valamint az új TREX (TRansport-EXchange) szoftverekkel és azok eredményeivel.

Kulcsszavak – Légköri terjedésszámító szoftverek, BALDOS, HotSpot, PC COSYMA, RASCAL, RODOS, SINAC, TREX

BEVEZETÉS

Nukleáris létesítményeknél a súlyos balesetet követő radionuklid kibocsátás elsődleges útvonala a légkör. A balesetelhárítási intézkedések alapját is a légkörbe kibocsátott aktivitás által okozott levegőszennyezettség és az ebből számolt dózisértékek adják meg. Ezért kiemelt jelentősége van a baleseti kibocsátás légköri terjedési vizsgálatainak, melynek segítségével meghatározható a radioaktív csóva szennyezettsége, iránya és mozgása.

A terjedési számításokhoz több nemzetközi és hazai szoftver is rendelkezésre áll, melyek közel hasonló terjedési és dózisszámítási modellek alkalmazásával határozzák meg, a kibocsátási ponttól, a felhasználó által megadott távolságokban elhelyezett receptor pontokra számított dózis vagy dózisteljesítmény értékeket. Célunk, e szoftverek eredményeinek

összevetése volt, melyhez felhasználtuk az Országos Nukleárisbaleset-elhárítási Rendszer (ONER) döntéstámogató és értékelő rendszerének műszaki megújításáról szóló tanulmányban már megjelent BALDOS és SINAC eredményeket.

Munkánk nem keres magyarázatot az esetleges eltérések okainak feltérképezésére, azt az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (OKF), a Paksi Atomerőmű Zrt. (PA Zrt.), az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) és az Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet (AEKI) együttműködést igénylő jövőbeni feladatként képzeljük el.

ALKALMAZOTT SZOFTVEREK

Jelenleg az AEKI-ben több nemzetközi terjedésszámító szoftvert alkalmazunk, ezek pl. a HotSpot, a RASCAL és a PC COSYMA, így ezek eredményeit vetettük össze az OKF által alkalmazott RODOS, az OAH által használt SINAC és a PA Zrt. által alkalmazott BALDOS, és TREX modellek azonos bemenő adatokon alapuló eredményeivel.

BALDOS (Off-line baleseti terjedésszámítást és dózisbecslést végző program)

Az off-line változat mellett a Paksi Atomerőmű Dozimetriai Vezénylőjében létesített Környezeti Adatgyűjtő Rendszer részeként on-line, real-time üzemmódban is használják, amely jelenleg az erőmű saját terjedésszámító és döntéstámogató rendszere. A kód az atomerőműből az atmoszférába jutott radioaktív szennyezők környezeti mozgását és a lakossági dózisok meghatározását képes végezni baleseti szituációban [1].

HotSpot (Health Physics Codes)

A program a radioaktív anyagok légköri kibocsátása utáni sugárzási hatások becslésére alkalmas, elsőrendű közelítéseket nyújt különböző kibocsátási események után. A kód a katasztrófavédelemmel foglalkozó szakemberek által készítendő biztonsági elemzések támogatását segíti eredményeivel. Leginkább rövidtávú, (kevesebb, mint néhány óras) kibocsátási időtartamok vizsgálatára alkalmas [2].

PC COSYMA (COde SYstem for MAria)

Az Európai Közösség Bizottsága a Maria (Methods for Assessing the Radiological Impact of Accident) projekt keretén belül került kidolgozásra a programrendszer, amelynek legújabb változatát, a 2.1 verzióját az Európai Bizottság 1996-ban bocsátotta ki. A programcsomag Gauss-eloszláson alapuló csóvamodellt alkalmaz [3].

RASCAL (Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis)

A szoftver kifejlesztése az Amerikai Egyesült Államok Nukleáris Szabályozó Bizottságának (NRC) Veszélyhelyzeti Műveleti Központjához fűződik. A program radiológiai veszélyhelyzetekben dózisbecslésekre alkalmas [4].

RODOS (Real time On-line DecisiOn System)

Az EU által támogatott, nemzetközi szinten egységes módszert nyújtó valós-idejű döntéstámogató rendszer. A rendszer a nukleáris eseményekre, nukleáris veszélyhelyzetekre való felkészüléshez, azok kezeléséhez, a sugárzási helyzet gyors értékeléséhez és az óvintézkedések, döntések szakmailag alátámasztott meghozatalához nyújt nemzetközi szinten egységes módszerű, megbízható segítséget [5].

SINAC (Simulator of Interactive Modeling of environmental consequences of Nuclear Accidents)

A program az atomerőművi balesetek környezeti hatásait elemző interaktív szakértői rendszer, környezeti szimulátor, a környezetbe került radioaktív anyagok terjedését, kiülepedését, a kialakuló dózisoskat, a várható egészségi hatásokat számolja és óvintézkedési javaslatokat ad a veszélyhelyzet korai fázisában [6].

TREX (Transport–Exchange)

A Paksi Atomerőmű Sugárvédelmi Osztálya, az Eötvös Loránd Tudományegyetem és a Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet által közösen fejlesztett szoftver feladata a normál és baleseti szituációkban a környezetbe kibocsátott radioaktív anyagok hatásának számítása és lakossági dózisosk meghatározása [7].

FORRÁSTAG, KIBOCSÁTÁSI SZÁMÍTÁSI PARAMÉTEREK

A modellezések számítási eredményeinek összevetéséhez, egyazon forrástagokat alkalmaztuk. A beállított paraméterek megegyeznek az ONER tanulmányban szereplő adatokkal [1].

Kibocsátás időtartama:	1 óra
Meteorológiai adatok:	
Szélsebesség:	5 m/s
Szélmagasság:	120 m
Pasquill kategória:	D
Csapadék:	nincs
Kibocsátási magasság:	120 m (effektív kémény magasság)
Forrástag:	
Radionuklidok:	I-131, Cs-137, Xe-133
Kibocsátott aktivitás nuklidonként:	10^{12} Bq
Jódfrakciók:	50% elemi, 50% aeroszol
Vonatkoztatási csoport:	felnőtt lakosság (szabadban)
Expozíciós (integrálási) időtartam:	külső dózis: 1 hét pajzsmirigy dózis: 50 év

EREDMÉNYEK

A modellszámítások eltérő helyen történtek, a TREX számításait a PA Zrt., a RODOS program futtatásait az OKF végezte, a BALDOS és a SINAC eredményeit kiemeltük az ONER Tanulmányból [1], a PC COSYMA, HotSpot, és RASCAL számítások pedig az AEKI Környezetvédelmi Szolgálatán történtek. Az eredményeket az 1. és 2. táblázat tartalmazza. Kiemeltük az adott távolságra eső legmagasabb (piros) és legalacsonyabb (sárga) értékeket.

A talajfelületi szennyezettség számításoknál, mindhárom nuklidnál a TREX eredményei a legnagyobbak, a legkisebb értékeket minden távolságra a RODOS és a PC COSYMA számításai szolgáltatták. A levegő aktivitáskoncentráció időintegrál számításoknál a legmagasabb értékeket a BALDOS a HotSpot és a TREX, a legalacsonyabb értékeket RODOS számításai szolgáltatták.

1. táblázat. Levegő aktivitáskoncentráció időintegrál és talaj felületi szennyezettség a forrástól mért távolság függvényében

Nuklid	Program	Levegő aktivitáskoncentráció időintegrál (Bq·s/m ³)			Talaj felületi szennyezettség (Bq/m ²)		
		1,5 km	3,5 km	18 km	1,5 km	3,5 km	18 km
I-131	BALDOS	1,75E+06	8,54E+05	9,08E+04	9,60E+03	4,57E+03	4,76E+02
	HotSpot	4,40E+05	7,80E+05	2,00E+05	1,30E+03	2,30E+03	3,10E+02
	PC COSYMA	9,68E+05	3,08E+05	4,29E+04	5,32E+03	1,69E+03	2,33E+02
	RASCAL						
	RODOS	8,66E+04	3,12E+05	5,79E+04	1,78E+02	6,39E+02	1,08E+02
	SINAC	4,35E+05	6,43E+05	6,31E+04	2,32E+03	3,42E+03	3,23E+02
	TREX	2,70E+07	1,28E+07	3,10E+06	3,20E+03	4,15E+04	8,00E+03
Cs-137	BALDOS	1,79E+06	8,64E+05	9,48E+04	1,79E+03	8,64E+02	9,48E+01
	HotSpot	4,40E+05	7,80E+05	2,00E+05	1,30E+03	2,30E+03	6,10E+02
	PC COSYMA	9,74E+05	3,11E+05	4,39E+04	9,74E+02	3,11E+02	4,39E+01
	RASCAL						
	RODOS	8,69E+04	3,14E+05	5,92E+04	4,70E+01	1,70E+02	3,15E+01
	SINAC	4,35E+05	6,46E+05	6,64E+04	4,35E+02	6,46E+02	6,61E+01
	TREX	2,86E+07	1,30E+07	3,20E+06	2,13E+03	1,06E+03	4,59E+02
Xe-133	BALDOS	1,79E+06	8,65E+05	9,51E+04			
	HotSpot	4,30E+05	7,80E+05	2,10E+05			
	PC COSYMA	9,69E+05	3,10E+05	4,37E+04			
	RASCAL						
	RODOS	8,67E+04	3,14E+05	5,94E+04			
	SINAC	4,35E+05	6,46E+05	6,68E+04			
	TREX	2,66E+07	1,32E+07	3,12E+06			

2. táblázat. Az effektív dózis és a lekötött pajzsmirigy dózis a forrástól mért távolság függvényében

Nuklid	Program	Effektív dózis (nSv)			Lekötött pajzsmirigy dózis (nSv)		
		1,5 km	3,5 km	18 km	1,5 km	3,5 km	18 km
I-131	BALDOS	4,86E+03	2,32E+03	2,43E+02	2,39E+05	1,14E+05	1,20E+04
	HotSpot	1,30E+03	2,30E+03	6,10E+02			
	PC COSYMA	1,76E+03	5,60E+02	7,78E+01	4,02E+04	1,28E+04	1,78E+03
	RASCAL	8,90E+03	3,30E+03	8,40E+02	2,60E+05	9,40E+04	2,40E+04
	RODOS	1,69E+02	5,70E+02	1,11E+02	2,98E+03	1,07E+04	1,99E+03
	SINAC	8,96E+02	1,32E+03	1,30E+02	1,83E+04	2,72E+04	2,73E+03
	TREX	1,03E+04	5,02E+04	1,20E+04	1,94E+06	9,00E+05	2,15E+05
Cs-137	BALDOS	3,45E+05	1,66E+05	1,82E+04			
	HotSpot	1,30E+03	2,30E+03	5,90E+02			
	PC COSYMA	3,75E+02	1,21E+02	1,73E+02			
	RASCAL	8,90E+03	3,30E+03	8,40E+02			
	RODOS	1,03E+02	3,54E+02	6,95E+01			
	SINAC	4,80E+04	7,20E+04	7,40E+03			
	TREX	6,04E+03	2,75E+03	6,96E+02			
Xe-133	BALDOS	2,34E+00	1,11E+00	1,27E-01			
	HotSpot	6,80E-01	1,20E+00	3,20E-01			
	PC COSYMA	8,11E-01	3,42E-01	5,93E-02			

Nuklid	Program	Effektív dózis (nSv)			Lekötött pajzsmirigy dózis (nSv)		
		1,5 km	3,5 km	18 km	1,5 km	3,5 km	18 km
	RASCAL	2,70E+00	9,70E-01	4,80E-01			
	RODOS	1,32E-01	1,80E-01	6,37E-02			
	SINAC	1,47E+00	2,18E+00	2,26E-01			
	TREX	7,40E-01	2,10E+00	1,50E+00			

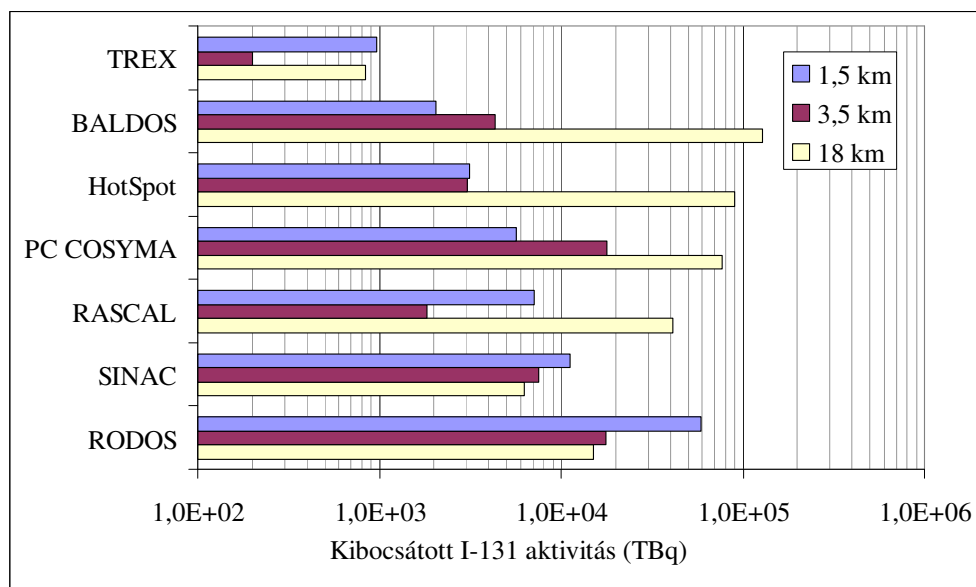
A RASCAL program modellezése nem teszi lehetővé közvetlenül talajfelületi szennyezettség és levegő aktivitás időintegrál értékek számítását.

A dózisszámításoknál, az effektív dózisértékeknél, I-131-re való számításoknál a TREX számításai eredményezték a legmagasabb, a PC COSYMA és a RODOS pedig a legalacsonyabb értéket. A Cs-137 esetében a BALDOS, a nemesgáz esetében pedig a BALDOS a SINAC és a TREX eredményei szolgáltatták a legmagasabb eredményeket, még a legalacsonyabbakat a RASCAL, a RODOS és a TREX.

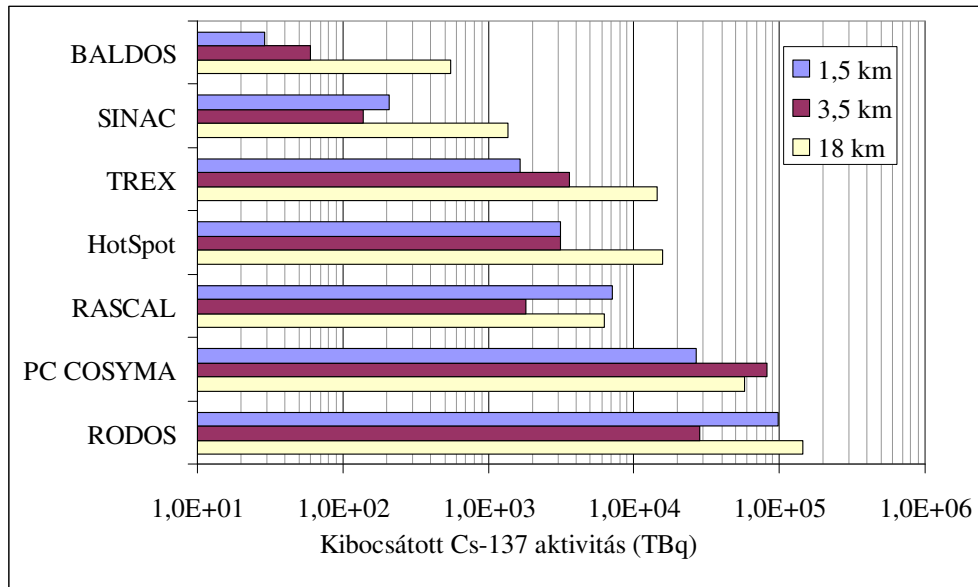
A lekötött pajzsmirigy dózis számításoknál a legmagasabb a TREX, a legalacsonyabb a PC COSYMA és a RODOS értékei voltak. A HotSpot program modellezése nem teszi lehetővé pajzsmirigy dózis számítását.

AZ EREDMÉNYEKBŐL EREDŐ INTÉZKEDÉSEK ELTÉRÉSEI

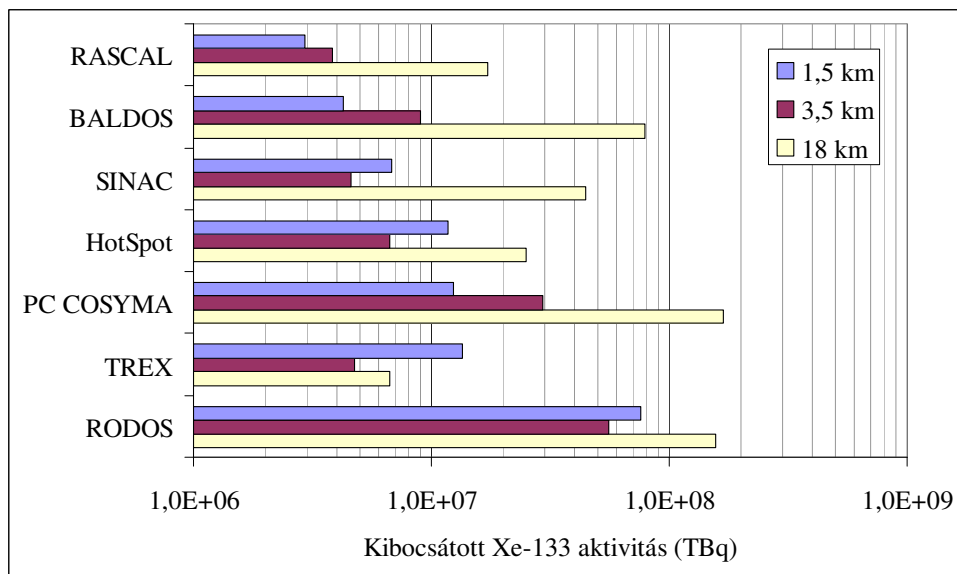
Az eredmények ismeretében megvizsgáltuk, hogy a különböző terjedésszámító szoftvereknél, mekkora kéményen kibocsátott aktivitás felelne meg a Paksi Atomerőmű kéményétől 1,5, 3,5 és 18 km-re elhelyezett receptor pontokra számolt 50 mSv effektív dózisértéknek, a kimenekítésre vonatkozó dóziskritériumnak. (A beavatkozási szint ugyan elkerülhető dózisban van kifejezve, itt azonban az egyszerűség kedvéért védőintézkedés nélküli dózist vettük alapul). A vizsgált szoftverek eredményei az 1,5 km-es értékek alapján lettek rendezve. Érdekesképpen, leolvasható a diagramokból, hogy az eltérések nem azonosak mindhárom távolságra. A BALDOS I-131-re történt számítása 18 km-re a legnagyobb értéket, 3,5 km-re a közepes értéket, míg 1,5 km-re a legkisebb értéket adta



1. ábra. 50 mSv effektív dózist eredményező kibocsátott I-131 aktivitás



2. ábra. 50 mSv effektív dózist eredményező kibocsátott Cs-137 aktivitás



3. ábra. 50 mSv effektív dózist eredményező kibocsátott Xe-133 aktivitás

AZ EREDMÉNYEKBŐL EREDŐ INTÉZKEDÉSI ELTÉRÉSEK

A vizsgált szoftverek eredményei és az általunk számolt 50 mSv effektív dózisa vonatkoztatott értékek között is nagyságrendi eltéréseket tapasztaltunk. Ezek az eltérések mindenképpen hatással lennének egy esetleges balesetet követő intézkedési eljárásra. A különbségek bemutatására megvizsgáltuk szoftverenként a reaktor kéménytől 1,5 km-re lévő településen élők kitelepítését elrendelő 50 mSv effektív dózisértéknek megfelelő kibocsátott aktivitások nagyságrendjét.

Program	Kibocsátott I-131 aktivitás (TBq)		
	1,0E+2–1,0E+3	1,0E+3–1,0E+4	1,0E+4 - 1,0E+5
RODOS			
SINAC			
RASCAL			
PC COSYMA			
HotSpot			
BALDOS			
TREX			

4. ábra. A kitelepítés elrendelése a kibocsátott I-131 aktivitás függvényében

Program	Kibocsátott Cs-137 aktivitás (TBq)			
	1,0E+1–1,0E+2	1,0E+2–1,0E+3	1,0E+3–1,0E+4	1,0E+4–1,0E+5
RODOS				
PC COSYMA				
RASCAL				
HotSpot				
TREX				
SINAC				
BALDOS				

5. ábra. A kitelepítés elrendelése a kibocsátott Cs-137 aktivitás függvényében

Program	Kibocsátott Xe-133 aktivitás (TBq)		
	1,0E+5 - 1,0E+6	1,0E+6 - 1,0E+7	1,0E+7 - 1,0E+8
RODOS			
TREX			
PC COSYMA			
HotSpot			
SINAC			
BALDOS			
RASCAL			

6. ábra. A kitelepítés elrendelése a kibocsátott Xe-133 aktivitás függvényében

I-131 kibocsátás esetében a TREX 100–1000 TBq nagyságrendű kibocsátásnál számítja a kitelepítés elrendelésére vonatkozó határértéket, a BALDOS, HotSpot, PC COSYMA, RASCAL 1000–10.000 TBq nagyságrendnél, a SINAC és a RODOS pedig csak 10.000–100.000 TBq nagyságrendnél.

A Cs-137 esetében még nagyobb a széthúzás, már négy nagyságrend között oszlanak meg a kitelepítési intézkedésekre vonatkozó értékek. A BALDOS és a PC COSYMA illetve a RODOS intézkedési szintet jelentő aktivitásai között 1000-szeres eltérés tapasztalható.

A nemesgázra vonatkozó aktivitásoknál jelentkezik a legkisebb eltérés, a SINAC, a BALDOS és a RASCAL csupán egy nagyságrenddel tér el a többi szoftver eredményétől.

AZ ELTÉRÉSEK VIZSGÁLATA

Az eltérések okainak részletes elemzése egy további feladat keretében lenne elképzelhető, ahol az OKF a PA ZRT. és az AEKI szakemberei egymás rendelkezésére bocsátják a szoftverek összes a számításaikban alkalmazott diszperziós (szigma) paraméterét. Jelen esetben csupán egy előzetes áttekintést végeztünk, melyben megvizsgáltunk néhány paramétert. Elsősorban azt érdemes megemlíteni, hogy a terjedésszámítási modellezés mind a hét szoftvernél Gauss-eloszlású csóvamoddellel történik, a dózisszámítási modellben sincs eltérés, a dózisszámítás fél végtelen dóziskonverziós tényezők alkalmazásával történik, a dóziskonverziós tényezők értékében viszont már jelentős eltérés tapasztalható. Néhány további adatot a 3. táblázat tartalmaz.

3. táblázat. A szoftverekben alkalmazott főbb számítási paraméterek

Program	Felületi érdesség (m)	Száraz ülepedési sebesség (aeroszol, m/s)	Száraz ülepedési sebesség (elemi jód, m/s)
BALDOS	<1	1,0E-03	1,0E-02
HotSpot	0,82	3,0E-03	-
PC COSYMA	<1	1,0E-03	1,0E-02
RASCAL	0,7	-	-
RODOS	-	-	-
SINAC	<1	1,0E-03	1,0E-02
TREX	-	1,0E-03	1,0E-02

	Keveredési rétegvastagság (m)	Az effektív dózis számításánál figyelembe vett terjedési útvonalak	Légzési sebesség (felnett, m ³ /s)
BALDOS	-	felhő, talaj, inhaláció, bőr	2,7E-04
HotSpot	500	felhő, talaj, inhaláció, bőr	3,33E-04
PC COSYMA	560	felhő, talaj, inhaláció, bőr	2,27E-04
RASCAL	390	felhő, talaj, inhaláció	-
RODOS	-	felhő, talaj, inhaláció, bőr	3,33E-04
SINAC	500	felhő, talaj, inhaláció, bőr	2,70E-04
TREX	560	felhő, talaj, inhaláció	2,27E-04

ÖSSZEFOGLALÁS

Az OKF, a PA Zrt és az AEKI együttműködésben lezajlott vizsgálat rámutatott a jelenleg hazánkban és nemzetközi szinten alkalmazott terjedésszámító szoftverek számítási különbségeire, illetve az eltérésekből adódó intézkedési eltérésekre. Ezen eltérések tisztázása kiemelt feladat, annak érdekében, hogy az indokolt védőintézkedések kellő időben megtörténjenek.

IRODALOM

- [1] Solymosi József (szerk.): Országos Nukleárisbaleset-Elhárítási Rendszer (ONER) döntéstámogató és értékelő rendszerének műszaki megújítása. Tanulmány (2008)
- [2] Steven G. Hormann: HotSpot – Heath Physics Codes Version 2.07 User's Guide (2009)
- [3] National Radiological Protection Board, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH: PC COSYMA Version 2.0 User Guide, (EUR 16240 EN, NRPB-SR280) (1995)

- [4] George F. Athey, Stephen A. McGuire, and J. Van Ramsdell, Jr.: RASCAL 3.0.5 Workbook (2007)
- [5] Mikkelsen, S. Thykier-Nielsen, P. Astrup, J. M. Santabarbara, J. H. Sorensen, A. Rasmussen, L. Robertson, A. Ullerstig, S. Deme, R. Martens, J. G. Bartzis and J. Pasler-Sauer, Met-Rodos: a comprehensive atmospheric dispersion module, *Radiat. Prot. Dosim*, **73**, 45-56 (1997)
- [6] <http://www.kfki.hu/~aekihp/reports2001/sinac.htm>
- [7] Dombovári Péter, Ranga Tibor, Nényei Árpád, Bujtás Tibor, Kovács Tibor, Jobbágy Viktor, Vincze Csilla, Molnár Ferenc: Új terjedésszámító szoftver fejlesztése és bevezetése a Paksi Atomerőműnél, <http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem>. I. évfolyam, 1. szám (2008), 30-36.