

**Bizonytalanságok figyelembevétele a radioaktív anyagok légköri
terjedésének modellezésben**

PhD téziszfüzet

Rudas Csilla

Témavezető: Dr. Pázmándi Tamás

Konzulens: Dr. Czifrus Szabolcs

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest

2024

A KUTATÁSOK ELŐZMÉNYE

A nukleáris létesítmények biztonságának értékelése érdekében, amely az atomenergia békés célú felhasználásának kezdete óta kritikus kérdés, vizsgálni kell a radioaktív kibocsátások környezeti hatását. A különböző típusú nukleáris létesítmények közül az atomerőművek jelentik a legnagyobb kockázatot a lehetséges radioaktív kibocsátások nagyságrendjét tekintve. A radioaktív anyagnak a légkörben, a felszíni és felszín alatti vizekben, valamint a táplálékláncban történő terjedése modellezhető, és ennek alapján becsülhetők a környezetben kialakuló sugárzási viszonyok és a lakosság tagjainak dózisa. A légköri terjedési modelleket széles körben használják a radioaktív kibocsátás következményeinek elemzésére, mivel egy valós veszélyhelyzet esetén nem vagy csak igen pontatlanul mérhető folyamatokról és mennyiségekről nyújtanak információt, és emellett lehetővé teszik a létesítmény biztonságának értékeléséhez szükséges hipotetikus forgatókönyvek elemzését is. Egy modellben, amely egy jelenség általánosított leírása, a kevésbé releváns mechanizmusok kihagyása miatt különböző típusú bizonytalanságok vannak jelen, amelyek befolyásolhatják a modellezett mennyiségek pontosságát. Munkám az episztemikus bizonytalanságokra összpontosít, beleértve a modellbizonytalanságot (amely a modellezett jelenségek egyszerűsítéseiből, numerikus közelítéseiből vagy hiányos kezeléséből adódik) és a paraméterbizonytalanságot (amely a modellparaméterek és a bemeneti adatok bizonytalanságából adódik). Az ilyen típusú bizonytalanságok jelen vannak a légköri terjedési modellszámításokban, és jelentősen befolyásolhatják a modellezett terjedést, a számított aktivitáskoncentrációkat és az ebből eredő dózisokat. E bizonytalanságok számszerűsítése különösen fontos, figyelembe véve, hogy a radioaktív anyagok légköri terjedésének modellezését a nukleáris biztonság és sugárvédelem területén különböző célokkal végzik a kibocsátások telephelyen kívüli következményeinek értékelésére, beleértve a determinisztikus és valószínűségi biztonsági elemzéseket, valamint a nukleáris balesetelhárításhoz kapcsolódó számításokat.

A nukleáris biztonsági elemzéseket annak ellenőrzésére végzik, hogy a radioaktivitás környezeti terjedése és az ebből eredő dóziskövetkezmények minden észszerűen lehetséges esemény esetén egy előre meghatározott szabályozási határérték (pl. dózislimit vagy kockázati kritérium) alatt maradnak-e, azt bizonyítva, hogy a létesítmény biztonságos az események széles skálája esetén is. Ezeknek az értékeléseknek átláthatónak és jól dokumentálnak kell lenniük, hogy lehetővé tegyék a különböző létesítmények biztonságának összehasonlítását, független értékelését. A nukleáris létesítményekből történő kibocsátások determinisztikus biztonsági elemzéséhez világszerte különböző megközelítéseket és modelleket használnak, mivel nincsenek összehangolt követelmények a módszertan alkalmazásának konkrét részleteire vonatkozóan. Bár léteznek nemzetközi iránymutatások és különböző nemzeti szabályozások, amelyek célja a nagy vagy korai radioaktív környezeti kibocsátáshoz vezető balesetek elkerülése, például a 2014/87/Euratom irányelv, ezek nem kötelezik az országokat azonos módszerek alkalmazására. A harmonizációs törekvések támogatására az elmúlt évtizedben az Energiatudományi Kutatóközpontban egy egyszerűsített és könnyen használható számítási módszertant dolgoztak ki, amellyel a nukleáris létesítmények légköri kibocsátási kritériumainak való megfelelés igazolható. Ehhez a munkához csatlakoztam, és részt vettem az alkalmazott módszerek és modellek továbbfejlesztésében, valamint

azok beépítésében a CARC (Calculating Atmospheric Release Criteria) szoftverbe. A szoftvernek az elemzésekhez való felhasználása érdekében a modellek validálására és alkalmazhatóságuk ellenőrzésére is szükség volt.

A determinisztikus biztonsági elemzésekhez a légköri terjedés modellezését általában olyan scenáriókra végzik, amelyeket konzervatív bemeneti paraméterek jellemeznek (úgy, mint a kibocsátási jellemzők, meteorológiai körülmények, az expozíció időtartama és a lakossági szokások). A számítások konzervativizmusának biztosítása érdekében a legrosszabb esetet leíró meteorológiai bemeneti paraméterek kiválasztása bonyolult, mivel a legrosszabb meteorológiai jellemzők a figyelembe vett távolságoktól és számított mennyiségektől függően eltérőek. Egy másik megközelítés az, hogy a számításokat egy hosszú, több éves meteorológiai adatbázissal végezzük el, és az eredményekből kiválasztunk egy percentilist (például az esetek 99,5%-át vagy a 95%-át magába foglaló tartomány felső határértékét). Mivel a légköri terjedési modellben használt meteorológiai adatok nagymértékben befolyásolhatják az aktivitáskoncentrációkat és így a dózisokat, meg kell vizsgálni a különböző meteorológiai adatok és különböző percentilisek használatát a kiválasztott mennyiség variációjának értékeléséhez annak biztosítása érdekében, hogy a biztonsági elemzések végeredménye robusztus legyen, vagyis ne függjön jelentősen az meteorológiai jellemzők változásától.

A légköri terjedési modelleket a nukleáris balesetelhárításhoz is használják a döntéstámogató rendszerekben, amelyek valós vagy feltételezett baleset esetén becsléseket adnak, és az így kapott eredmények alapján ajánlásokat lehet tenni a lakosság védelmét biztosító, az elszennvedett dózist csökkentő intézkedésekre vonatkozóan. Mivel a balesetelhárítási döntések ezeken a becsléseken alapulnak, a számított eredményeknek (azaz a környezeti szennyezettségnek és az ebből következő lakossági hatásoknak) megbízhatónak és robusztusnak kell lenniük. Ezért kulcsfontosságú értékelni a modell és a paraméterek bizonytalanságait, hatásukat a döntéstámogató rendszerek részét képező légköri terjedési számításokban.

Az Országos Atomenergia Hivatal Veszélyhelyzeti Intézkedési, Gyakorló és Elemző Központjában is alkalmaznak ilyen döntéstámogató eszközt, a SINAC-ot (Simulator Software for Interactive Modelling of Environmental Consequences of Nuclear Accidents). A SINAC-ot az elmúlt évtizedekben az Energiatudományi Kutatóközpontban dolgozó kutatók fejlesztették ki. A balesetelhárítási döntéstámogatás céljából végzett dózisbecslési számításoknak a lehető legpontosabbnak kell lenniük, miközben a szimulációk elvégzésére csak korlátozott idő áll rendelkezésre. A SINAC légköri terjedési számításainak optimalizálása érdekében különböző új módszereket vezettek be az atomerőműből a légkörbe kibocsátott radioaktív anyag terjedésének számítására. Ezeket a módszereket meg kell vizsgálni, és meg kell határozni az optimális megközelítést annak figyelembevételével, hogy a különböző módszerek és paraméterezések nagymértékben befolyásolhatják a számítási eredményeket és a szimuláció idejét.

A különböző modellek mellett a döntéstámogató rendszerekhez szükséges meteorológiai adatok bizonytalansága is befolyásolhatja a számítások eredményeit. A meteorológiai adatok forrása általában egy numerikus időjárás-előrejelző modell (amely nagy térbeli tartományra és megfelelő

időbeli felbontással szolgáltat adatokat), mivel a valós meteorológiai mérések és megfigyelések egy baleseti szituációban korlátozottan állnak rendelkezésre. A meteorológiai bizonytalanságok hatásának értékelésére a leggyakoribb megközelítés az érzékenységi vizsgálat, amely során a meteorológiai paramétereket egyenként változtatva, külön-külön lehet értékelni azok hatását. Egy másik és viszonylag új módszer az ensemble (együttes) meteorológiai adatok használata (amelyeket a numerikus időjárás előrejelző modell többszöri futtatásával, kissé eltérő kezdeti feltételekkel vagy paraméterekkel állítanak elő). Ilyen ensemble meteorológiai adatsorok használata azért előnyös, mert azok önmagukban tartalmazzák a meteorológiai bizonytalanságokat, amelyek hatása közvetlenül megjelenik a légköri terjedési számítások eredményeiben. A 2017 és 2020 között a nukleáris vészhelyzetekben a bizonytalanságok azonosítását és csökkentését célzó, CONFIDENCE (Coping with uNcertainties For Improved modelling and DEcision making in Nuclear emergenCiEs) elnevezésű nemzetközi projektben a légköri terjedési és dózisszámítási modellek bemeneti bizonytalanságainak hatását vizsgáltuk ensemble adatsorok felhasználásával. A projekt részeként egy új modul került integrálásra a SINAC szoftverbe, amely az Országos Meteorológiai Szolgálat által előállított ensemble adatok mellett a CONFIDENCE projektben használt ensemble adatokat is figyelembe tudja venni. Fontos megjegyezni, hogy az ilyen meteorológiai adatok használatának van egy hátránya is, nevezetesen a szimulációk többszöri futtatásának megnövekedett számítási ideje, ami egy valós baleseti helyzetben nem optimális. Ahhoz, hogy az ensemble-módszert működés közben is alkalmazni lehessen, a számításokat optimalizálni kell. A szimuláció optimalizálásának különböző módjai vannak, úgy mint az ensemble tagok számának csökkentése vagy az egyes ensemble tagok számításához szükséges futtatási idő csökkentése. Ezeket a megközelítéseket meg kell vizsgálni, a legmegfelelőbbet meg kell határozni és be kell vezetni a gyakorlatban.

CÉLKITŰZÉSEK

A munkám a determinisztikus biztonsági elemzésekhez, valamint a nukleáris balesetelhárítási döntéstámogatáshoz végzett légköri terjedés- és dózisszámítások során előforduló modell- és paraméterbizonytalanságok értékelésére összpontosított.

A nukleáris létesítmények légköri kibocsátási kritériumainak való megfelelés igazolására szolgáló új módszertant és a hozzá kapcsolódó CARC szoftvert az elmúlt évtizedben dolgozták ki, de szükség volt az alkalmazott modellek validálására és az alkalmazhatóság ellenőrzésére. Munkám célja a módszertan validálása volt a modellek belső részeredményeinek a széles körben használt, kereskedelmi forgalomban kapható programokkal számított megfelelő értékekkel való összehasonlításával, valamint a módszertan alkalmazhatóságának bemutatása egy esettanulmányon keresztül, a számítások eredményeinek a tényleges szabályozási követelményekkel való összehasonlításával. Emellett a CARC szoftver légköri terjedési modelljét illetően céлом volt annak felmérése, hogy a meteorológiai adatok változásai hogyan befolyásolják a determinisztikus biztonsági elemzés eredményeit, és hogy az eredmények különböző percentilisei hogyan reagálnak ezen eltérésekre. A dózisszámítások esetében azt akartam azonosítani, hogy a lakosság szokásait

jellemző paraméterek közül melyek azok, amelyek a legnagyobb hatással vannak a végeredményként számított effektív dózisokra.

A légköri terjedési számításokat olyan döntéstámogató rendszerekben is használják, mint például a SINAC, hogy szimulálják a radioaktív anyagok légköri terjedését, és ajánlásokat fogalmazzanak meg egy valós baleset esetén bevezetendő védelmi intézkedésekre vonatkozóan. A modell bizonytalanságait illetően célom a SINAC szoftverben a radioaktív anyagok légkörben való terjedésének kiszámítására bevezetett új módszerek értékelése volt. Célom az volt, hogy azonosítsam, melyik módszer adja a legpontosabb eredményt a korlátozott számítási idő figyelembevételével, hogy ezáltal optimalizáljam az ilyen számításokat. A paraméterek bizonytalanságai esetén célom az volt, hogy érzékenységvizsgálat segítségével külön-külön értékeljem az egyes meteorológiai paraméterek (szélsebesség, szélirány, légköri stabilitás, csapadék) hatását, és meghatározzam, hogy melyik van a legnagyobb hatással a SINAC légköri terjedési modellje által számított légköri aktivitáskoncentrációkra. Célom volt továbbá az új ensemble módszer alkalmazhatóságának ellenőrzése egy esettanulmányon keresztül, a Paksi Atomerőmű telephelyére jellemző meteorológiai adatok figyelembevételével. A CONFIDENCE projekt részeként a SINAC szoftver légköri terjedési modelljének bizonytalanságait értékeltem a Radiological Ensemble Modelling esettanulmányok során a bemenő ensemble adatok felhasználásával. Az ensemble szimulációk optimalizálása és a módszer operatív használatának elősegítése érdekében célul tűztem ki az egyes ensemble tagok futási idejének csökkentésére szolgáló különböző módszerek vizsgálatát (úgy, mint a modellezési terület csökkentése, a kibocsátás és az eredmények időbeli felbontásának csökkentése), az időcsökkentés, valamint a számított eredmények és azok bizonytalanságának változásának számszerűsítését.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Tézispont:

A nukleáris létesítmények kibocsátási kritériumainak való megfelelés igazolására szolgáló analitikus modelleket a számítási folyamat átláthatósága és egyszerűsége szempontjából továbbfejlesztettem és beépítettem a CARC (Calculations for Release Criteria) szoftverbe. Megmutattam, hogy a továbbfejlesztett modellekkel kapott számítási részeredmények egyéb, nemzetközi gyakorlatban elfogadottan használt programokkal kapott eredményektől való eltérése 50%-150% közötti, vagyis az egyezés az ilyen összehasonlításokhoz viszonyítva megfelelő:

- a környezeti aktivitáskoncentrációknál jelentős, egyes esetekben akár 60-90%-os különbségek is adódtak,
- a külső és inhalációs dózis esetén az eltérés kevesebb, mint 13%,
- a tápláléklánc dózisban azon nuklidok esetében, melyek a lakosság sugárterhelésében tipikusan jelentős járulékot adnak, az eltérés maximum 26%.

Rámutattam, hogy az eltérések nagy részét az összehasonlított modellek egyes metódusai és a felhasznált modellparaméterek közötti különbségek okozzák. Megmutattam, hogy a determinisztikus biztonsági elemzések esetén meghatározott effektív dózisok értékét egyes

lakossági szokásokat leíró paraméterek (azaz a légzési sebesség, az árnyékolás mértéke, a szabadban való tartózkodás ideje, a fogyasztási szokások) jelentősen befolyásolják. Ezek közül a légzési sebesség (0,7 m³/h és 3 m³/h közötti), az árnyékolás mértékének (0,01 és 0,4 közötti) és a szabadban való tartózkodás idejének (1 h és 6 h közötti) változtatása nem befolyásolja jelentősen az 1 éves effektív dózist (maximum 24%-os eltérés okozva). Egyes szennyezett élelmiszerek (a leveles zöldségek és a tej) fogyasztása jelentősen növelte az 1 éves effektív dózist: az eltérés a fogyasztás nélküli esethez képest 124%-251% közöttinek adódott a figyelembevett meteorológiai adatoktól függően. Igazoltam a modellek és a CARC program gyakorlati alkalmazhatóságát egy esettanulmányon keresztül, igazolva a determinisztikus nukleáris biztonsági elemzések során alkalmazott kritériumnak való megfelelést egy hipotetikus kibocsátási esetre. [P1][P2]

2. Tézispont:

Megmutattam, hogy a determinisztikus biztonsági elemzések során egy legalább 5 évet felölelő, valós meteorológiai méréseken alapuló adatbázis és egy jól kiválasztott dózis percentilis használata robusztusabb eredményt ad, mint az általános gyakorlatban elterjedt legkedvezőtlenebb becsléshez („worst case”) tartozó fix meteorológiai paraméterek és egy dóziseredmény alkalmazása. Egy éves valós meteorológiai adatsor használatával igazoltam, hogy meteorológiai adatokból véletlenszerű adatelhagyás esetén a 7 napos dózis 95. percentilisének eltérése a hiánymentes meteorológiai adatsorral meghatározott eredményhez képest megfelelő, 5% alatti. A módszer megfelelőségét és a jól megválasztott percentilis alkalmazásának előnyét továbbá azzal a megállapítással is alátámasztottam, hogy a szakértői becslés (nem a telephelyre jellemző, valós mérési adatok) alapján meghatározott legrosszabb becslésű esethez képest a különböző évekre számított maximum dózisok közötti legnagyobb eltérés akár közel 5000% is lehet a percentilis értékétől függően, míg a valós meteorológiai adatokkal meghatározott 95. percentilis maximum 50%-os eltérést mutatott. [P3]

3. Tézis:

Igazoltam, hogy a SINAC (Simulator Software for Interactive Modelling of Environmental Consequences of Nuclear Accidents) balesetelhárítási döntéstámogató rendszer légköri terjedési modelljében rendelkezésre álló pöff léptetési modellek közül a legkisebb fix időlépést alkalmazó módszerrel kapott és pontosnak tekintett, de leghosszabb futtatási idővel szolgáltatott eredményhez legközelebbi eredményt a rövidebb futási idejű, a σ_z vertikális diszperziós paraméter változásától függő autószkálás eljárás adja ($M_0 = 1,001$ és $1,004$ léptetési szorzótényezővel). Kevesebb, mint 1% eltérés adódott a vizsgált egyszerű kibocsátási esetben, 1 km, 10 km és 30 km távolságban, fix meteorológiai paraméterek figyelembevételével (1 m/s szélsősebesség, D Pasquill kategória és 0 mm/h esőintenzitás). Megmutattam, hogy balesetelhárítási számítás esetén a futási idő minimalizálása céljából azon modell használata az optimális, melyben a pöff léptetése a σ_r horizontális diszperziós paraméter értékétől függ. Bizonyítottam, hogy a megfelelő paraméter választásával (például $m_0 = 0,5$ léptetési szorzótényezővel) a futási idő jelentősen rövidebb (a fele vagy negyede) az egyéb módszerekhez képest, miközben az időintegrált aktivitáskoncentráció a csóva elhaladásának teljes idejére csupán 3-5%-kal tér el a pontosnak tekintett esethez képest. [P4]

4. Tézis:

Rámutatam, hogy a meteorológiai adatok bizonytalansága jelentős hatással lehet a balesetelhárítási légköri terjedésszámítási modellek eredményeire, azonosítottam a környezeti aktivitáskoncentrációk számítását dominánsan befolyásoló paramétereket, és számszerűsítettem a hatásuk mértékét. Igazoltam, hogy a kibocsátási ponthoz közel (1-5 km) a szélesség 1 m/s-ról 10 m/s-ra változtatása körülbelül egy nagyságrendnyi, míg távolabb (5-30 km) a szélirány 10 fokkal való eltérése 3 nagyságrendnyi eltérést okozhat az aktivitáskoncentrációban. Új modult dolgoztam ki a SINAC balesetelhárítási döntéstámogató rendszerhez, amellyel ensemble meteorológiai adatok használatával nagy munkaigényű érzékenységi vagy bizonytalansági vizsgálat nélkül, közvetlenül becsülhető és megjeleníthető a légköri terjedésszámítás meteorológiai adatokból származó bizonytalansága. A SINAC program ensemble bemeneti adatokat felhasználó módszerének alkalmazhatóságát nemzetközi projekt keretében végzett számításokkal igazoltam, melyekben bemutattam a bizonytalanságok vizualizációját térképen megjelenítve különböző eredmények határérték átlépési valószínűségének statisztikai jellemzőit. [P5][P6][P7][P8][P9][P10]

5. Tézispont:

Azonosítottam a balesetelhárítási döntéshozatal szempontjából kritikus futtatási idő optimalizálásának lehetőségeit a SINAC döntéstámogató rendszerrel végzett számítássorozattal. Megmutattam, hogy az eredeti modellezési terület 4/9, illetve és 1/9 részre való csökkentése és az eredmények időbeli felbontásának felére és negyedére csökkentése a vizsgált eredmények értékének változatlanlansága mellett a 10 ensemble tag szimulációjának 76 perces futási idejét rendre 28 percre, 9 percre, 59 percre és 57 percre csökkentette. Bebizonyítottam, hogy a kibocsátás időbeli léptetésének, vagyis az adott idő alatt kibocsátott puffok számának negyedére való csökkentése (64-ről 16-ra, majd 4-re), ugyan előnyösen csökkentette a 10 ensemble tag számításának futási idejét (179 percről 76 percre, majd 47 percre), de 25%-kal módosította a sugárvédelmi szempontból egyik legmeghatározóbb Cs-137 kiüledésre vonatkozó várható értéket, a szórását pedig több mint hatszorosára növelte. [P11][P12]

TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [P1] **Cs. Rudas**, T. Pázmándi, P. Zagyvai, "Evaluation of an Improved Method and Software Tool for Confirming Compliance with Release Criteria for Nuclear Facilities", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 159, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108332>
- [P2] **Cs. Rudas**, T. Pázmándi, "Case Study with CARC software for Verifying Compliance with Atmospheric Release Criteria of Nuclear Installations", *9th International Conference on Radiation in Various Fields of Research (RAD 2021)*, Herceg Novi, Montenegro, 14–18 June 2021, 2021, https://rad2021.rad-conference.org/vs/RAD_2021-Csilla_Rudas.pdf
- [P3] **Cs. Rudas**, T. Pázmándi, "Consequences of Selecting Different Subsets of Meteorological Data to Utilize in Deterministic Safety Analysis", *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 225, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106428>

- [P4] P. Szántó, S. Deme, A. László, T. Pázmándi, **Cs. Rudas**, “Comparing Different Methods of Calculating Atmospheric Dispersion in SINAC”, in *Proceedings of the 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, HARMO18, Bologna, Italy, 9-12 Oct 2017
- [P5] T. Pázmándi, D. Jakab, **Cs. Rudas**, P. Szántó, “Availability and reliability of meteorological data for atmospheric dispersion models” in *Proceedings of the 5th European IRPA Congress, The Hague, The Netherlands, 4-8 June 2018*. pp. 247-252, 2018
<https://irpa2018europe.com/wp-content/uploads/2019/08/IRPA2018-Proceedings-v2sec.pdf#page=253>
- [P6] **Cs. Rudas**, T. Pázmándi, P. Szántó, M. Szűcs, B. Szintai, “The Application of Meteorological Ensembles in the SINAC Decision Support System”, in *Proceedings of the 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, HARMO19, Bruges, Belgium, 3–6 June 2019, 2019,
<https://www.harmo.org/Conferences/Proceedings/Bruges/publishedSections/H19-095%20Csilla%20Rudas.pdf>
- [P7] **Cs. Rudas**, P. Szántó, O. Várady-B., M. Szűcs, B. Szintai, T. Pázmándi, “The application of meteorological ensembles in the SINAC decision support system”, *44th Annual Meeting on Radiation Protection, Hajdúszoboszló, Hungary 16-18 Apr 2019*, 2019.
https://elftsv.hu/svonline/docs/kulonsz/HSZOB2019_Book_of_abstract.pdf#page=28
- [P8] I. Korsakissok, S. Andronopoulos, P. Astrup, P. Bedwell, K. Chevalier-Jabet, H. De Vries, G. Geertsema, F. Gering, T. Hamburger, H. Klein, S. Leadbetter, A. Mathieu, T. Pazmandi, R. Périllat, **C. Rudas**, A. Sogachev, P. Szanto, J. Tomas, C. Twenhöfel and J. Wellings, “Comparison of ensembles of atmospheric dispersion simulations: lessons learnt from the confidence project about uncertainty quantification” in *Proceedings of the 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, HARMO19, Bruges, Belgium, 3–6 June 2019, 2019,
<https://www.harmo.org/Conferences/Proceedings/Bruges/publishedSections/H19-081%20Irene%20Korsakissok.pdf>
- [P9] S. J. Leadbetter, S. Andronopoulos, P. Bedwell, K. Chevalier-Jabet, I. Korsakissok, A. Mathieu, R. Périllat, J. Wellings, G. Geertesma, F. Gering, T. Hamburger, A. R. Jones, H. Klein, T. Pázmándi, **Cs. Rudas**, A. Sogachev, P. Szanto, J. Tomas, C. Twenhöfel, H. de Vries, “Ranking Uncertainties in Atmospheric Dispersion Modelling Following the Accidental Release of Radioactive Material”, *Radioprotection*, Vol. 55, pp. S51 - S55, 2020.
<https://doi.org/10.1051/radiopro/2020012>
- [P10] I. Korsakissok, S. Andronopoulos, P. Astrup, P. Bedwell, E. Berge, T. Charnock, H. De Vries, G. Geertsema, F. Gering, T. Hamburger, I. Ievdin, H. Klein, S. Leadbetter, O. C. Lind, T. Pázmándi, R. Périllat, **Cs. Rudas**, B. Salbu, S. Schantz, R. Scheele, A. Sogachev, N. Syed, J. Tomas, M. Ulmoen, J. Wellings, “Uncertainty propagation in atmospheric dispersion models

for radiological emergencies in the pre- and early release phase: summary of case studies”, *Radioprotection*, Vol. 55, pp. S57 – S68, 2020. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2020013>

- [P11] P. Bedwell, I. Korsakissok, S. Leadbetter, R. Périllat, **Cs. Rudas**, J. Tomas and J. Wellings, “Operationalising an ensemble approach in the description of uncertainty in atmospheric dispersion modelling and an emergency response”, *Radioprotection*, Vol. 55, pp. S75 – S79, 2020. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2020015>
- [P12] **Cs. Rudas**, P. Szántó, T. Pázmándi, P. Zagytai, “Efficiency savings in model setup for an ensemble approach used to describe atmospheric dispersion model uncertainty”, *CONFIDENCE Dissemination workshop*, Bratislava, Slovak Republic, 5-9 Dec 2019. <https://eu-neris.net/library/archives/concert/confidence/confidence-dissemination-workshop-2-5-december-2019/posters.html>

További tudományos közlemények

- [op1] J. Wellings, P. Bedwell, S. Leadbetter, J. Tomas, S. Andronopoulos, I. Korsakissok, R. Périllat, A. Mathieu, G. Geertsema, H. de Vries, H. Klein, T. Hamburger, F. Gering, T. Pázmándi, P. Szanto, **C. Rudas**, A. Sogachev, N. Davis, C. Twenhöfel, “D 9.1.5 - Guidelines for ranking uncertainties in atmospheric dispersion”, *European Joint Program for the Integration of Radiation Protection Research CONCERT - CONFIDENCE project, H2020 – 662287*, 2018. [D9.1 CONFIDENCE D68 Guidelines-ranking-uncertainties-for-atmospheric-dispersion.pdf](#)
- [op2] S. Leadbetter, Reviewers: H. Klein, H. de Vries, C. Rudas, I. Korsakissok, P. Bedwell, M. Hort: D 9.2 – Published dataset of meteorological ensemble data to be used as dispersion and source terms by other WPs (Fukushima and synthetic), *European Joint Program for the Integration of Radiation Protection Research CONCERT - CONFIDENCE project, H2020 – 662287*, 2017. [D9.2 CONFIDENCE D69 Published-dataset-of-meteorological.pdf](#)
- [op3] H. De Vries, G. Geertsema, I. Korsakissok, R. Périllat, R. Scheele, J. Tomas; S. Andronopoulos, P. Astrup, P. Bedwell, T. Charnock, T. Hamburger, I. Ievdin, S. Leadbetter, T. Pázmándi, **C. Rudas**, A. Sogachev, P. Szántó, J. Wellings, “D 9.4 – Published sets of probability maps of threshold exceedance for scenarios provided to WP4, WP5 & WP6→2”, *European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research, CONCERT - CONFIDENCE project*, 2019. [D9.4 CONFIDENCE Published-sets-of-probability-maps-of-threshold-exceedance-for-scenarios.pdf](#)
- [op4] H. De Vries, G. Geertsema, I. Korsakissok, S. Leadbetter, R. Périllat, R. Scheele, J. Tomas, S. Andronopoulos, P. Astrup, P. Bedwell, T. Charnock, T. Hamburger, I. Ievdin, S. Leadbetter, T. Pázmándi, R. Périllat, **C. Rudas**, A. Sogachev, P. Szántó, J. Wellings, “D 9.5.1 – Ensemble calculations for the atmospheric dispersion of radionuclides. Hypothetical accident scenarios in Europe: the REM case studies”, *European Joint Program for the Integration of Radiation Protection Research CONCERT - CONFIDENCE project, H2020 – 662287*, 2019. [D9.5 CONFIDENCE Guidelines-for-the-use-of-ensemble-calculations.pdf](#)

- [op5] P. Bedwell, I. Korsakissok, S. Leadbetter, R. Périllat, **C. Rudas**, J. Tomas, J. Wellings, „D9.5.5 – Guidelines for the use of ensembles in the description of uncertainty in atmospheric dispersion modelling: operational applications in the context of an emergency response”, *European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research, CONCERT - CONFIDENCE project*, 2019. [D9.5 CONFIDENCE Guidelines-for-the-use-of-ensemble-calculations.pdf](#)