

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Új atomerőművi blokkok üzemzavarainak elemzése terjedésszámító szoftverrel

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Túri Márton

Meteorológus mesterszak
Időjárás előrejelző szakirány

Témavezető:

Dr. Dombóvári Péter

MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt.

Belső konzulens:

Dr. Mészáros Róbert

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2016

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Légtörri szennyezőanyagok terjedésének modellezése	5
2.1. Statisztikai modellek	5
2.2. Dinamikai modellek	6
2.2.1. Gauss-féle csóvamodell	6
2.2.2. Lagrange-i részecskemodell	7
2.2.3. Euler-i modell	9
2.3. Terjedésszámítás a Paksi Atomerőmű telephelyén	11
3. MONTEE légtörri terjedési szimulátor	13
3.1. A terjedési modell	13
3.1.1. Trajektória számítása	14
3.1.2. Turbulencia parametrizációja	14
3.1.3. Bomlás és ülepedés	17
3.1.4. Koncentráció számítása	18
3.2. A szoftver alkalmazása	18
3.3. A felhasznált adatok	20
4. Atomerőművi üzemiállapotok	22
4.1. TAK1 és TAK2 üzemiállapotok	23
5. Numerikus szimulációk	25
5.1. 2015. január 23–25.	27
5.2. 2015. március 2–4.	34
5.3. 2015. március 22–24.	41
5.4. 2015. május 4–6.	48
5.5. 2015. május 21–23.	56
5.6. 2015. július 8–10.	63
5.7. 2015. augusztus 15–17.	71
5.8. Összegzés	77
6. Észrevételek	80
6.1. Technikai észrevételek.....	80
Összefoglalás	83
Köszönetnyilvánítás	84
Irodalomjegyzék	85
Internetes források	88

1. Bevezetés

A magyarországi villamos energia-rendszer vizsgálata során egy 2013-as felmérés alapján a hazai villamos energiatermelés mintegy felét a Paksi Atomerőmű szolgáltatja. Az előrejelzések alapján a lakosság energiaigénye a következő 15 évben várhatóan 1%-kal nő évente, melyet a meglévő blokkok energiatermelése mellett külföldi importból képes az állam fedezni. A jelenleg üzemelő négy atomerőművi blokknak legkésőbb a 2032–2037-es időszak végére le kell állnia, így az egyoldalú energiafüggőség, illetve a hagyományos energiahordozók részarányának csökkentésére új atomerőművi blokkokat kell telepíteni.

A Magyar Országgyűlés által elfogadott T/13628. számú törvényjavaslat értelmében Magyarország és Oroszország között atomenergetikai együttműködés kötött, amely értelmében két új blokk kerül üzembehelyezésre a Paksi Atomerőmű telephelyén. A blokkok építése 2018-ban kezdődik, míg üzembe helyezésük az 5. blokk esetén 2025-ben, a 6. blokk esetén 2026-ban várható (*MVM Paks II. Zrt.*, 2015).

A telephely környezetében vizsgálatokat kell végezni arra vonatkozóan, hogy az erőmű építése, illetve annak üzemeltetése során milyen hatások érhetik a környező lakosságot. Maghasadás energiáját hasznosító intézmény esetén a kibocsátott radioaktív szennyezőanyagok képezik a hatásvizsgálatok alapját, melyek mind a légkörben, mind az atomerőmű hűtését szolgáló Dunában terjedhetnek. A szennyezőanyagok transzportját dozimetriai mérések és a meteorológiai viszonyok ismerete mellett numerikus modell szimulációkkal közelíthetjük.

Dolgozatomban különböző, radioaktív szennyezőanyagra vonatkozó, numerikus módszereken alapuló vizsgálatok mellett egy terjedésszámítási feladatot is bemutatok. Elsődleges célom numerikus modell szimulációk alkalmazásával megvizsgálni, hogy különböző időjárási helyzetek milyen hatást gyakorolnak a kibocsátott szennyezőanyag csóvára vonatkozóan. Üzemzavar esetén a Paks II. blokkok minden egyes üzemállapothoz meghatározhatók azok az események, amelyek az adott üzemállapoton belül a legnagyobb környezeti kibocsátással járnának. Munkám során ezekhez az eseményekhez tartozó kibocsátási értékekkel végeztem szimulációkat, mely értékeket a kivitelező fél javasolt. A modellezés során a hat atomerőművi üzemállapot közül a két legsúlyosabb következményekkel járó, úgy nevezett tervezési alapon kívüli eseményt jelöltem ki, melyekhez hét különböző meteorológiai helyzetet párosítottam. Ezeket a 2015-ös év időjárási helyzeteiből választottam ki. A számítások elvégzéséhez a Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet és az ELTE TTK Meteorológiai Tanszék által közösen

fejlesztett MONTEE terjedésszámítási modellt alkalmaztam, amelyben a két új blokk egyes paramétereit rögzítve vannak. A szimulációk elvégzése mellett vizsgáltam a modell gyakorlati alkalmazhatóságát és javaslatot tettem a modell további fejlesztési lehetőségeire.

2. Léggöri szennyezőanyagok terjedésének modellezése

A Föld népességével egyenes arányban gyarapodó energiaigények szoros kapcsolatban vannak a légkör szennyeződésének folyamatával. Az ipari forradalmat követő években a fejlettebb országokban elkezdődött a fatüzelésről szén alapú energiaforrásra való fokozatos áttérés. Az 1859-ben, Angliában végzett első tudományos felmérés kimutatta az áttérés környezetre gyakorolt káros hatását, mely később a két világháború között olyan módon felerősödött, hogy már halálos áldozatokat is követelt. A világháború után az energiapiacra előtérbe kerülő kőolaj és annak termékei, a megjelenő iparvidékek, valamint a fejlett országok atomkísérletei szükségszerűvé tették a kialakuló szennyezőanyag-felhő viselkedésének modellezését (*Várkonyi, 1982*). Az emberi tevékenység mellett a természetben is lejátszódhatnak olyan események, melyek hatása esetlegesen globális szinten mérhető. Ilyenek a vulkánkitörések, melyek során nagy mennyiségű hamu kerül ki a légkörbe, majd a globális cirkuláció által több kontinensnyi terület légtérét teríti be. Egy ilyen nagyskálájú esemény lezajlásának ismerete is fontos, mely akár rövid időn belül numerikus szimulációk által közelíthetővé válik.

A numerikus prognosztika eszköztárában az időjárás előrejelző modellek mellett található olyan számítási eljárások, melyek segítségével adott forrásból kibocsátott szennyezőanyagok transzportja, illetve kémiai átalakulása válik ismertté az időben. Ezek a terjedésszámítási modellek, melyek kibocsátási paraméterek, illetve meteorológiai állapotjelzők mezőinek ismeretével képesek a kibocsátott anyaghalmoz viselkedését szimulálni. Az egyes modellek közötti különbséget az azokat felépítő fizikai-matematikai háttér adja meg, mely alapján statisztikai, illetve dinamikai modellek csoportjai alkothatók.

2.1. Statisztikai modellek

A statisztikai, vagy sztochasztikus modellek kis számítási igénnyel rendelkező eljárások, melyek alapját a korábbi megfigyelési adatok statisztikai feldolgozása jelenti, amivel hosszútávú előrejelzések is készíthetők. Ezen modellek hiányossága, hogy az instacionárius folyamatokat, így a kibocsátott szennyezőanyag mennyiségi, illetve minőségbeli változásait, annak adott területen belüli változékonyságát, valamint az időfüggő meteorológiai alapparaméterek hatásait sem tudják kezelni (*Bájhóber, 2014*). Sztochasztikus modell adaptációjával foglalkozott egy tokiói kutatócsoport, akik a ^{137}Cs koncentrációjának változékonyságát vizsgálták. A vizsgálat alapját a csernobili atomkatasztrófa képezte, a

szoftvert pedig az esemény bekövetkezte utáni mérési adatsorból építették fel (*Ichige et al.*, 2015).

2.2. Dinamikai modellek

A dinamikus modellek a légköri szennyezőanyagok szimulációjának legelterjedtebb módszerét képezik. Ezek az áramlási modellek olyan fizikai-matematikai felépítéssel rendelkeznek, ami összhangot teremt a kibocsátott anyagot szállító közeget jellemző meteorológiai folyamatokkal. E modellek legegyszerűbb változata a Gauss-féle csóvamodell, míg a bonyolultabb szoftverek lagrange-i, illetve euler-i módszert használnak a szállító közeg áramlástan leírásához.

2.2.1. Gauss-féle csóvamodell

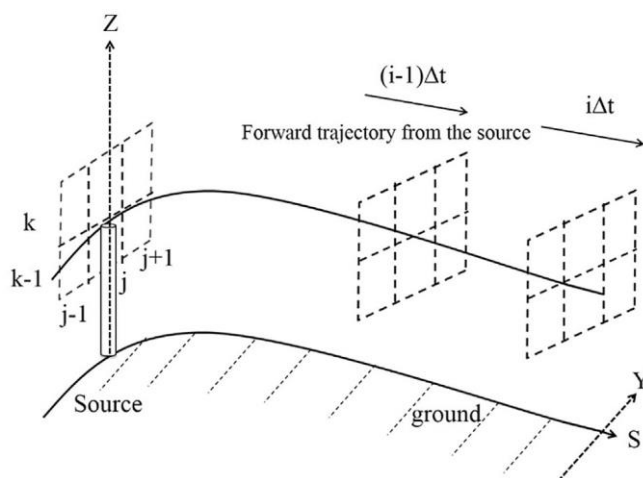
A Gauss-modell volt a legelső numerikus módszer a szennyezőanyagok légkörben való terjedésének leírására vonatkozóan. Egyszerűsége abban rejlik, hogy kevés bemeneti információra van szüksége a szimulációhoz. A modell alapegyenletéhez közelítéseket kell tennünk: stacionárius meteorológiai helyzet a szimuláció időtartama alatt, a vizsgálati tartományban a levegő vertikálisan homogén, a forrás pontszerű, a kibocsátás állandó intenzitású, illetve a kibocsátott szennyezőanyagok kémiai reakciói elhanyagolhatók. Ezen közelítéseknek a kontinuitási egyenletre való alkalmazásával írható fel a modell alapegyenlete (*Túri*, 2013).

A módszert több területen is alkalmazzák, ugyanis néhány 10 km-es tartományon jó közelítést adhat a kibocsátott szennyezőanyag-felhő mozgására, illetve kis számítási igénye miatt viszonylag gyorsan tud eredményt szolgáltatni. Ipari létesítmények kibocsátásai mellett természeti jelenségek, például erdőtüzek révén keletkező füstfelhő időbeli viselkedésének tanulmányozása is lehetséges (*Takács*, 2013).

A módszer fejlesztése az úgynevezett Gauss-i diszperziós trajektória modell (GTx), mely 3 dimenziós szélesség vektort számít, illetve az alsó légkörre vonatkozó stabilitási osztályt határoz meg a szennyezőanyag csóva minden pontjában meteorológiai mérések alkalmazásával (*I. ábra*).

A GTx segítségével végeztek dózisbecslést a tajvan-i 4-es atomerőműben (NPP4) 13 különböző radionuklidra vonatkozóan. A vizsgálat egy baleseti szimuláció volt, melynek kibocsátási adatai megegyeztek a Fukushima Daiichi atomerőműben történt robbanásnál mért adatokkal. A számítási időszak 2011. március 11-től egészen 2012. március 9-ig tartott,

melyhez a meteorológiai háttérmezőt az EPA (Environmental Protection Agency) által működtetett mérőállomások adatai szolgáltatták (Tang *et al.*, 2016).



1. ábra – A Gauss-i trajektória-modell (GTx) sematikus ábrája. Az S koordináta az adott forrásból származó szennyezőanyag által leírt trajektória érintő-irányát adja meg (Forrás: Tang *et al.*, 2016)

2.2.2. Lagrange-i részecskemodell

A tudományos életben legelterjedtebben alkalmazott terjedésszámítási módszert a Lagrange-i szemléletmódon alapuló részecskemodellek képezik, melyek numerikus időjárás előrejelző modellek szélmezőit alkalmazva adják meg az egyes szennyezőanyag részecskék sodródását a levegőben. A lagrange-i módszer esetén a vonatkoztatási rendszert maguk a részecskék képezik, melyek állapotváltozói e módszer által csak az időtől függenek, így például a mozgásegyenlet közönséges differenciálegyenlet formájában adható meg.

A lagrange-i részecskemodelleket elterjedten használják ipari létesítmények hatásvizsgálataihoz, azonban a globális skálán is mérhető hatással rendelkező természeti katasztrófák kutatása esetén is gyakran alkalmazzák. A legjelentősebb események a vulkánkitörések, melyek során nagy mennyiségű hamu kerülhet a légkörbe, ami a légi közlekedést akadályozhatja, szélsőséges esetben balesthez vezethet, illetve a különböző anyagok éghajlatmódosító hatással is bírhatnak. Az Eyjafjallajökull vulkán 2010. áprilisi kitörése motivált egy brit kutatócsoportot, akik 6 múltbéli vulkáni aktivitást vizsgáltak. A szennyezőanyag felhők szimulációjához az UK Met Office által fejlesztett NAME lagrange-i diszperziós modellt alkalmazták, melyhez meteorológiai háttérmezőt az ERA-40, illetve az ERA INTERIM adatbázisokból nyertek (Witham *et al.*, 2012). A NAME továbbfejlesztett, NAME-III változatát alkalmazták a Te Maari új-zélandi vulkán 2012-es kitörése kapcsán, melynek meteorológiai adatokat az UKMO időjárás-előrejelző modell szolgáltatta.

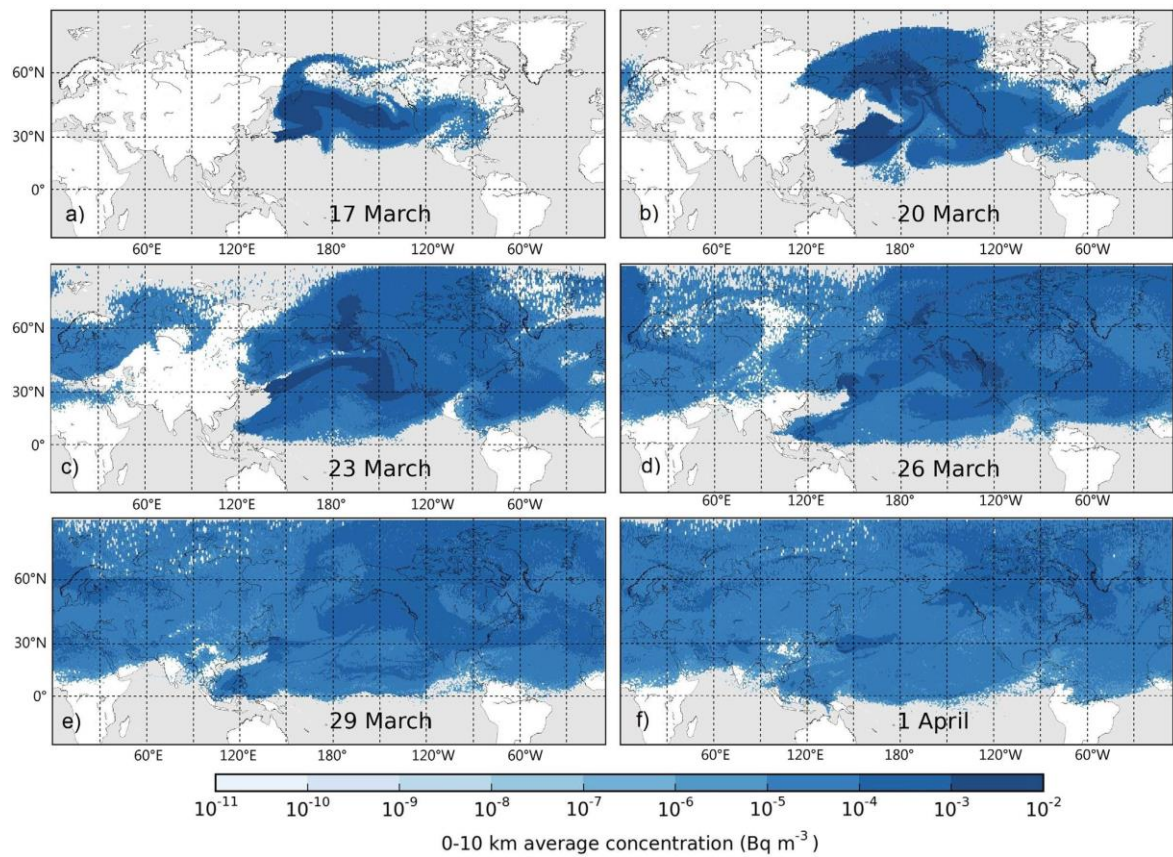
Ausztráliában Darwinnál a HYSPLIT4 modellt alkalmazták, mellyel sikerült kimutatni, hogy a monszun hatást gyakorolhat a háttérsugárzásra. A vizsgált radionuklid a ^{85}Kr izotóp volt, melynek aktivitás-koncentrációjáról bebizonyosodott, hogy a csapadékos monszun időszak alatt magasabb, amit az ITCZ (Intertropical Convergence Zone) elmozdulásából következő szélirány-fordulás okoz (Bolhöffner *et al.*, 2014).

Hazai gyakorlatban is alkalmazott diszperziós modell a FLEXPART (Kocsis *et al.*, 2009), mellyel szintén nagytérségű hatással rendelkező folyamatok szimulálhatóak hosszú időskálán (Halse *et al.*, 2013).

A Fukushima Daiichi Atomerőműben bekövetkezett nukleáris baleset hatástanulmányához alkalmazott több külföldi intézet is lagrange-i modelleket, melyek szimulációs eredményeit egy WMO által kezdeményezett kutatási projekt foglalta össze multi-modell ensemble technológiával, ami a meteorológiában is gyakran alkalmazott módszer hosszútávú előrejelzések készítése esetén (Solazzo *et al.*, 2014). A Japán kutatócsoport a JMA (Japan Meteorological Agency) szervezésében a RATM diszperziós modellt alkalmazta, melyhez az 5 km-es horizontális felbontású MESO korlátos tartományú előrejelző modellt párosult (Saito *et al.*, 2015). Az angolok a NAME modell szimulációit vizsgálták, amihez a meteorológiai mezőket az ECMWF globális modell, az UKMET és a MESO korlátos tartományú modellek, illetve a radarok által mért reflektivitási adatokat is felhasználó MESO-R korlátos tartományú modell szolgáltatták. A NAME modellel kapcsolatos kutatás további célja a nedves ülepedés parametrizációja volt (Leadbetter *et al.*, 2015). A másik három résztvevő kutatócsoport az MLDPO (Kanada), a HYSPLIT (Egyesült Államok) és a FLEXPART (Ausztria) részecskemodellekkel végezte a számításokat (Draxler *et al.*, 2015).

Az ELTE Meteorológiai Tanszék is vizsgálta a Fukushima Daiichi atomerőműben bekövetkezett baleset hatásait. A szimulációt a ^{131}I izotópra végezték egy 35 napos periódusra vonatkozóan, melyhez a RAPTOR lagrange-i részecskemodellt alkalmazták GFS (Global Forecasting System) meteorológiai háttérmező alkalmazásával. A kibocsátott radionuklid északi hemiszférán történő légköri diszperzióját a 2. ábra mutatja be. Az ábráról leolvasható, hogy a szennyezőanyag felhő a Poláris Jet által 5 nap alatt elérte Észak-Amerikát, majd 12 napon belül Európa légterét is betérítette. A vizsgálati időszak végére mérhető aktivitás-koncentráció volt tapasztalható az északi félgömb teljes légterében. Az eredményeket a CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) Nemzetközi Atomsorompó Egyezményt aláíró országok által működtetett IMS globális

megfigyelőrendszer állomásainak adataival (az északi félgömbön 187 ilyen állomás üzemel) vetették össze (Mészáros *et al.*, 2016).



2. ábra – A RAPTOR modell által szimulált ¹³¹I radionuklid terjedése a troposzférában a vizsgálati időszak alatt. A színskala a szennyezőanyag aktivitás-koncentrációját mutatja [Bq/m³] egységben, ami vertikálisan átlagolt a légkör alsó, 10 km-es rétegére vonatkozóan (Forrás: Mészáros *et al.*, 2016)

2.2.3. Euler-i modell

Az euler-i modellek olyan szemléletet alkalmaznak, amely során a levegővel kitöltött tér mozdulatlan, a vonatkoztatási rendszer pedig egy adott ponthoz rögzített. Lehetőség nyílik a mozdulatlan tér tetszőlegesen kiválasztott bármely pontjában egy adott mozgáselem határozóinak időbeli vizsgálatára, ugyanakkor a térben egy adott elmozdulás hatására a mozgáselem jellemzőinek a változása is számolhatóvá válik. A rendszer állapotának megváltozása parciális differenciálegyenlet-rendszer alakjában adható meg, aminek numerikus megoldása a lagrange-i modellnél nagyobb számítástechnikai háttérrel igényel. A kibocsátott szennyezőanyag adott komponensének koncentráció-változása az alábbi alakban írható le:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(\vec{u}c) = \text{div}\left(\rho \underline{K} \nabla \left(\frac{c}{\rho}\right)\right) - \Lambda^s - \Lambda^d + \sigma. \quad (1)$$

Itt c a kibocsátott komponens koncentrációja \vec{u} a terjedés sebességének vektora, ρ a levegő sűrűsége, \underline{K} a turbulens diffúziós együtthatók mátrixa, melynek vertikális összetevője az úgynevezett Louis-parametrizációval származtatható, míg horizontális komponense konstans. Λ^s és Λ^d a nedves, illetve száraz ülepedési együtthatók, σ pedig a szennyezőanyag forrásának erősségét jelenti (Túri, 2013).

Indiában széntüzelésű hőerőművekhez kapcsolódó kibocsátást vizsgálták a CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) euler-i kémiai transzport modellel, melyhez meteorológiai háttérmezőként a NCEP (National Center for Environmental Prediction) intézet globális reanalízis adatbázisát alkalmazták (Guttikunda et al., 2014). Szintén az euler-i modellek csoportjába tartozik a POLAIR 3D, melyet Fukushimával kapcsolatos kutatásoknál használtak ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) meteorológiai háttérmezővel 2011. március 11-től április 5-ig tartó időszakra vonatkozóan (Winiarek et al., 2014). Az euler-i személetmódot követi az 1dX is, melyet a francia Areva által La Hague-ban üzemeltetett nukleáris üzemanyag újrahasznosító üzemében (Connan et al., 2014), illetve az IMS globális megfigyelő rendszer állomásainak vizsgálatánál is alkalmazták (Eslinger et al., 2016). A 2.3. fejezetben említésre kerülő TREX modellnek készült euler-i változata is, melyet az ELTE TTK Meteorológiai Tanszékén használtak fel a Közép-Európai régióra vonatkozó kutatásokhoz (Mészáros et al., 2015).

2.3. Terjedésszámítás a Paksi Atomerőmű telephelyén

A Paksi Atomerőmű telephelyére vonatkozóan több magyarországi szervezet is működtet terjedésszámító szoftvereket, melyek esetleges nukleáris balesetek hatásainak prognosztizálásához, illetve gyakorlati esettanulmányok készítéséhez használatosak. A különböző modellek eltérő meteorológiai háttérmezőket, illetve különböző matematikai-fizikai leírasmódot használnak.

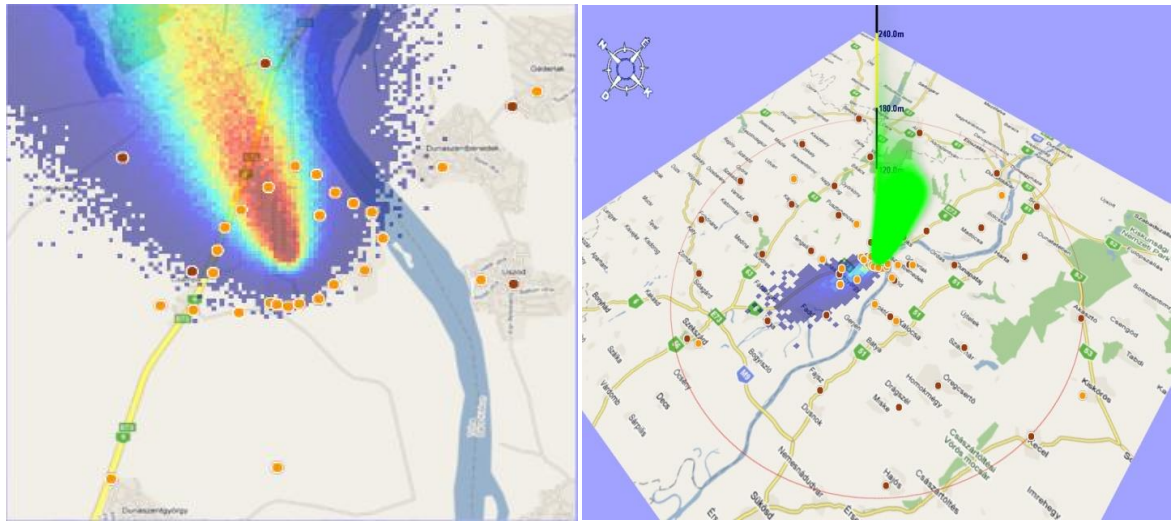
A RODOS (**R**eal-Time, **O**n-line, **D**ecision Support System) egy on-line Gauss-puff modell, melyet az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság alkalmaz döntéshozatali céllal. Az EU tagországok által fejlesztett szoftver 10 percenkénti szennyezőanyag-kibocsátással készíti a szimulációkat, melyek eredményeit négy szintű döntéshozatali rendszerbe építi be. A futtatásához szükséges forrástagot a Paksi Atomerőmű mérőrendszere szolgáltatja, míg a meteorológiai háttérmezőt a 120 m magas meteorológiai mérőtorony 10 perces felbontással rendelkező, 3 magassági szintre (20 m, 50 m, 120 m) vonatkozó adatsora biztosítja (Földi *et al.*, 2010).

A Központi Fizikai Kutató Intézet által alkotott SINAC-ot (**S**imulator of **I**nteractive **M**odeling of environmental consequences of **N**uclear **A**ccidents) szintén az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság futtatja az atomerőmű telephelyére vonatkozóan. Az előző modellel ellentétben a SINAC off-line, így döntéshozatalok megalapozására nem alkalmazható. E Gauss-i csóvamodellt hatásvizsgálatok készítéséhez használják. A forrástagot az Országos Atomenergia Hivatal, míg a meteorológiai inputot az Országos Meteorológiai Szolgálat biztosítja.

A HPAC (**H**azard **P**rediction and **A**ssessment **C**apability) a Magyar Honvédség alkalmazásában lévő Gauss-puff modell, mely minden NATO tagország számára ingyenesen biztosított (Brennan *et al.*, 2010). A szoftver lakosságot érinthető természeti, illetve ipari katasztrófák esetén alkalmazott katonai segítségnyújtás megalapozásához szolgáltat számítási eredményeket, melyekhez különböző időjárás előrejelző modelleket alkalmaz meteorológiai háttérmezőként (Csurgai *et al.*, 2011).

Az ELTE Meteorológiai Tanszéke, illetve a Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet közös fejlesztése a TREX (**T**ransport–**E**xchange) modell, melyet elsősorban a Paksi Atomerőmű területére adaptáltak. A lagrange-i részecskemodell az ALADIN időjárás előrejelző modell segítségével készít 3 dimenziós szimulációt, melyet 10×10 km-es rácsfelbontáson képes számítani. A szoftver nagy számítástechnikai háttérrel igényel, ami

asztali számítógép esetén az úgynevezett CUDA technológiával érhető el. Ennek segítségével a számítási kapacitás nagyságrendekkel növelhető (Túri, 2013).



3. ábra – A TREX által szimulált hipotetikus szennyezőanyag-csóva 2D-s, illetve 3D-s grafikus megjelenítése, melynek forrása a Paksi Atomerőmű (Forrás: Dombóvári, 2006)

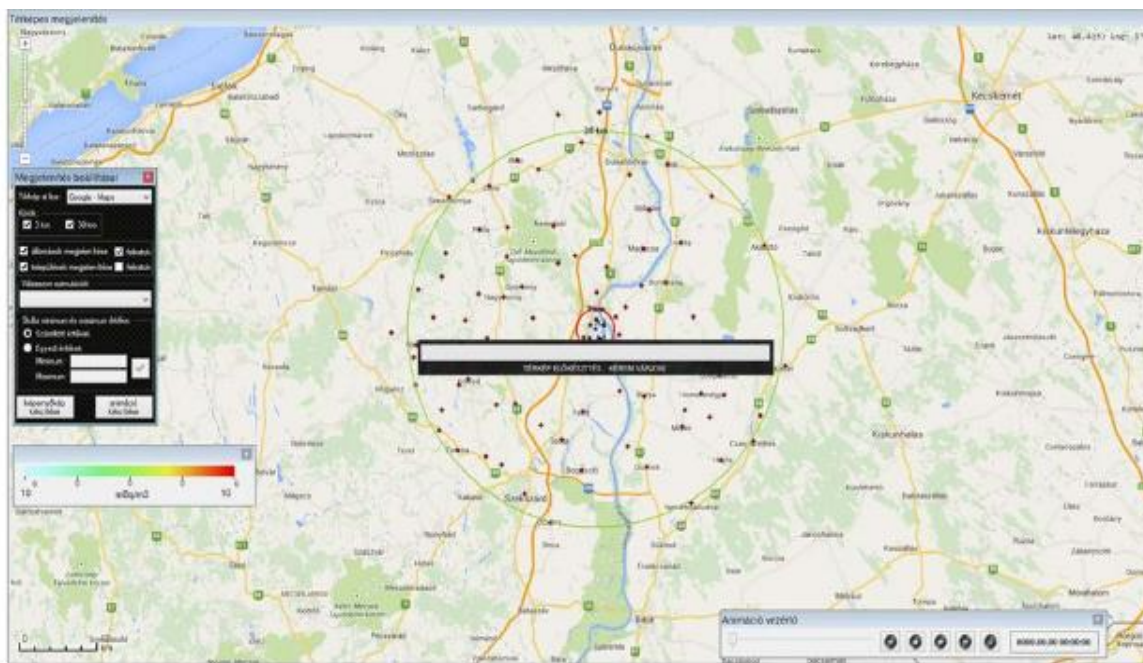
A modellnek több fejlesztése készült, például a PyTREX, mely Python programnyelven írt forráskóddal rendelkező lagrange-i modell, és nagy, kontinentális méretű terjedésszámítási problémák megoldására is alkalmas (Mészáros *et al*, 2015).

3. MONTEE légköri terjedési szimulátor

A MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zrt. megrendelésére a Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet és az Eötvös Loránd Tudományegyetem közösen fejlesztette ki a MONTEE terjedésszámító szoftvert, a tervezett új blokkokra vonatkozóan.

3.1. A terjedési modell

A MONTEE a TREX modellhez hasonlóan lagrange-i matematikán alapuló részecskemodell. A módszer lényege, hogy az emittált szennyezőanyagot nem egy adott pontból vizsgáljuk, hanem az egyes részecskéket követjük, így annak állapota határozza meg a környezetét is. A szimuláció során adott Δt időközönként történik a kezdeti feltételként megadott részecskeszámmal a kibocsátás. Egy több, úgynevezett „pöff”-ből álló szennyezőanyag-csóva rajzolódik ki a modellfutás eredményeként, mely „pöff”-ök középpontjában a legmagasabb a radioaktív aeroszolok aktivitás-koncentrációja. A számolt szennyezőanyag felhőt az atomerőmű 30 km-es körzetében, a SÓZ-ban (Sürgős Óvintézkedések Zónája) lehet grafikus megjeleníteni.



4. ábra – A MONTEE grafikus megjelenítése. A térképen láthatók a környező települések, az A1–A9 mérőállomások, illetve az atomerőmű 30 km-es sugarú környezetét képező SÓZ határa is (Forrás: ELTE and RTTSz, 2014)

A térképen a csóva mellett a környező települések, illetve az erőmű közvetlen környezetében telepített A1–A9 mérőállomások is megjelennek. Mind a települések, mind a mérőpontok

esetén lekérdezhető a különböző paraméterek (aktivitás-koncentráció, illetve dózisértékek) időbeli változása.

3.1.1. Trajektória számítása

A modell számításai során a lagrange-i szemléletmódot alkalmazza, melynek eredményeként az egyes szennyezőanyag-részecskék mozgása közönséges differenciálegyenlet formájában írható le. A részecskék mozgását a szélesebbesség, illetve a turbulens sebességfluktuációk összege adja meg. Ezek az alábbi formában adhatók meg:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}(\vec{r}) + \vec{v}_t(\vec{r}), \quad (2)$$

ahol

$$\vec{v} = \left(\frac{u}{R_F \cos \varphi}, \frac{v}{R_F}, w \right) \quad (3)$$

$$\vec{v}_t = \left(\frac{u_t}{R_F \cos \varphi}, \frac{v_t}{R_F}, w_t \right). \quad (4)$$

Itt \vec{v} a szélesebbesség-vektor, \vec{v}_t a turbulencia sebességfluktuációk vektora, φ a földrajzi szélesség, R_F a Föld sugara. A differenciálegyenlet megoldása elsőrendű Euler módszerrel közelíthető.

3.1.2. Turbulencia parametrizációja

Esetleges kibocsátás során a kijutott szennyezőanyag a planetáris határrétegben terjed, amit erős turbulencia jellemez. Az itt előforduló mozgásformák véletlen bolyongással közelíthetők, amit a Langevin-egyenlet ír le. A véletlen mozgás Markov-folyamatnak tekinthető, és az alábbi formában adható meg:

$$du_t = \frac{-1}{T_{Lu}} u_t \cdot dt + \sqrt{\frac{2}{T_{Lu}}} \sigma_u \cdot dW(0, dt) \quad (5)$$

$$dv_t = \frac{-1}{T_{Lv}} v_t \cdot dt + \sqrt{\frac{2}{T_{Lv}}} \sigma_v \cdot dW(0, dt) \quad (6)$$

$$dw_t = \frac{-1}{T_{Lw}} w_t \cdot dt + \sqrt{\frac{2}{T_{Lw}}} \sigma_w \cdot dW(0, dt). \quad (7)$$

Itt u_t , v_t és w_t az egyes sebességkomponenseket jelenti, T_L az adott irányokhoz tartozó turbulens folyamatok Lagrange-féle időskálája, σ a szélesség-komponensek fluktuációjának szórása, $dW(0, dt)$ az úgynevezett Wiener-folyamat 0 várható értékkel és dt szórással. A Langevin-egyenlet megoldása mindhárom komponens esetén elsőrendű Euler-módszerrel közelíthető.

A fenti egyenletekben megjelenő szórások és Lagrange-féle időskálák nem ismertek, ezeket becsülni kell, melyhez a Monin–Obukhov elméletet felhasználó Hanna-féle parametrizáció kerül alkalmazásra. Az L Monin–Obukhov hossz az alábbi alakban adható meg:

$$L = \frac{T \cdot (u^*)^2}{gkT^*} \quad (8)$$

Itt T a 2 méter magasságban mért hőmérséklet, g a gravitációs gyorsulás, k a Kármán-féle állandó, u^* a súrlódási sebesség, T^* pedig a dinamikus hőmérséklet. Ezen két utóbbi változó az input meteorológiai adatokból határozható meg különböző iterációs módszerekkel. A súrlódási sebesség alakja:

$$u^* = \frac{k \cdot U}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right) - \psi_M\left(\frac{z_{ref}}{L}\right) + \psi_M\left(\frac{z_0}{L}\right)}. \quad (9)$$

Az egyenletben U a mért szélesség 10 méteres magasságban, $z_{ref} = 10 \text{ m}$ a szélmérési referencia szintje, z_0 a felszíni érdesség. ψ_M pedig az úgynevezett Monin–Obukhov-féle univerzális függvény.

A dinamikus hőmérséklet számítása napszakhoz kötött. Két formula használatos T^* meghatározására, melyek kiválasztása a H szenzibilis hőáram előjelén alapul. Nappali órákban, amikor a H értéke negatív az alábbi összefüggés alkalmazott:

$$T^* = \frac{1}{u^*} \left(\frac{-H}{\rho c_p} - 0,61 \cdot \frac{T \cdot LH}{\rho \cdot L_w} \right), \quad (10)$$

ahol ρ a levegő sűrűsége, c_p a levegő fajhője állandó nyomáson, LH a látens hőáram, L_w

pedig a víz párolgáshője. Az éjszakai órákban, amikor H értéke pozitív, akkor a következő formula használatos:

$$T^* = \frac{T \cdot C_D \cdot U^2}{4 \cdot \beta_M \cdot z_{ref} \cdot g}. \quad (11)$$

Itt $\beta_M = 4,7$ állandó, C_D pedig a felszíni súrlódási együttható, melyet a következőképpen határozhatunk meg:

$$C_D = \frac{k}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}. \quad (12)$$

A Monin–Obukhov hossz ismeretével már alkalmazható a Hanna-féle turbulencia modell a turbulens sebességfluktuációk meghatározására. Az u^* súrlódási sebesség és a h_{pbl} planetáris határreteg magasság alkalmazásával előállíthatjuk az egyes sebességfluktuációs szórásokat, azonban figyelembe kell venni a határreteg rétegzettségét is. A Monin–Obukhov hossz segítségével három rétegződési csoportot alkothatunk:

- konvektív ($L < 0$)

$$\sigma_u = \sigma_v = u^* \cdot \sqrt[3]{12 + \frac{1}{2} \frac{h_{pbl}}{|L|}} \quad (13)$$

- neutrális ($L = 0$)

$$\sigma_u = 2u^* \cdot \exp\left(\frac{-3f_{Cor} \cdot z}{u^*}\right) \quad (14)$$

$$\sigma_v = 1,3u^* \cdot \exp\left(\frac{-2f_{Cor} \cdot z}{u^*}\right) \quad (15)$$

- stabil ($L > 0$)

$$\sigma_u = 2u^* \cdot \left(1 - \frac{z}{h_{pbl}}\right) \quad (16)$$

$$\sigma_v = 1,3u^* \cdot \left(1 - \frac{z}{h_{pbl}}\right). \quad (17)$$

A neutrális rétegződéshez kapcsolódó formulákban megjelenő f_{Cor} a Coriolis-paraméter, mely a földrajzi szélességtől függ. Neutrális, illetve stabil légrétegződés esetén $\sigma_w = \sigma_v$ lesz, azaz nem lesz különbség a horizontális és a vertikális turbulens fluktuációk között. Ez a közelítés azért alkalmazható, mert ilyen rétegződési helyzetekben nincs termikus turbulencia, a vertikális turbulens mozgásokat a szélnyírás váltja ki és az így kialakuló mechanikai turbulencia irányfüggetlennek, azaz izotrópnak tekinthető.

Konvektív légrétegződés esetén termikus turbulencia is kialakul, amely jelentős hatással bír a szennyezőanyagok transzportjára vonatkozóan. A konvekció biztosítja az átkeveredést az aeroszolok számára a légrétegek között, illetve a termikus szél által a csóva terjedési irányának deformálódását eredményezi. A Hanna-féle turbulencia modell öt tartományra osztja fel a határreteget, majd ezekben egyenként parametrizálja a vertikális turbulens sebességfluktuációt.

$$\frac{z}{h_{pbl}} < 0,03 \quad \sigma_w = 0,96w^* \cdot \sqrt[3]{\frac{3z}{h_{pbl}} - \frac{L}{h_{pbl}}} \quad (18)$$

$$0,03 \leq \frac{z}{h_{pbl}} < 0,4 \quad \sigma_w = \min\left\{0,96w^* \cdot \sqrt[3]{\frac{3z}{h_{pbl}} - \frac{L}{h_{pbl}}}; 0,763w^* \cdot \left(\frac{z}{h_{pbl}}\right)^{0,175}\right\} \quad (19)$$

$$0,4 \leq \frac{z}{h_{pbl}} < 0,96 \quad \sigma_w = 0,722w^* \cdot \left(1 - \frac{z}{h_{pbl}}\right)^{0,207} \quad (20)$$

$$0,96 \leq \frac{z}{h_{pbl}} < 1 \quad \sigma_w = 0,37w^* \quad (21)$$

$$1 \leq \frac{z}{h_{pbl}} \quad \sigma_w = 0 \quad (22)$$

A szórásokra vonatkozó formulákban megjelenő w^* a konvekció sebességét jelenti.

3.1.3. Bomlás és ülepedés

Szennyezőanyagok terjedésének modellezésénél kiemelt szerepe van az ülepedésnek, illetve a radioaktív anyagok esetén a bomlásnak is, ugyanis e folyamatok révén a kibocsátott aeroszolokból álló felhő tömege, illetve összetétele is megváltozik. Egy szennyezőanyag részecskét vizsgálva, annak tömege Δt időlépcső alatt az alábbi formula

szerint változik meg:

$$m_{n+1} = m_n - m_n \cdot \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \Delta t - m_n \cdot \left\{ 1 - \exp \left(\frac{-\Delta t \cdot v_{dep}}{h_{dep}} - \frac{\Delta t \cdot k_w \cdot (rh - rh_{dep})}{1 - rh_{dep}} \right) \right\}, \quad (23)$$

ahol az első tag a részecske tömegét adja meg a kezdeti időpillanatban. A második tag az adott anyag radioaktív bomlását írja le $t_{1/2}$ felezési idővel, míg a harmadik tag a száraz ülepedésre vonatkozik. A száraz ülepedésnél v_{dep} a száraz ülepedés sebessége, k_w a nedves ülepedési együttható, h_{dep} pedig a felszín feletti rétegvastagság, melyben a száraz ülepedés folyamata végbemehet. A nedves ülepedés végbemenetelét a környező levegő relatív nedvessége határozza meg, rh_{dep} lesz az a minimális érték, melyet a relatív nedvességnek meg kell haladnia ahhoz, hogy a nedves ülepedés lejátszódhasson.

3.1.4. Koncentráció számítása

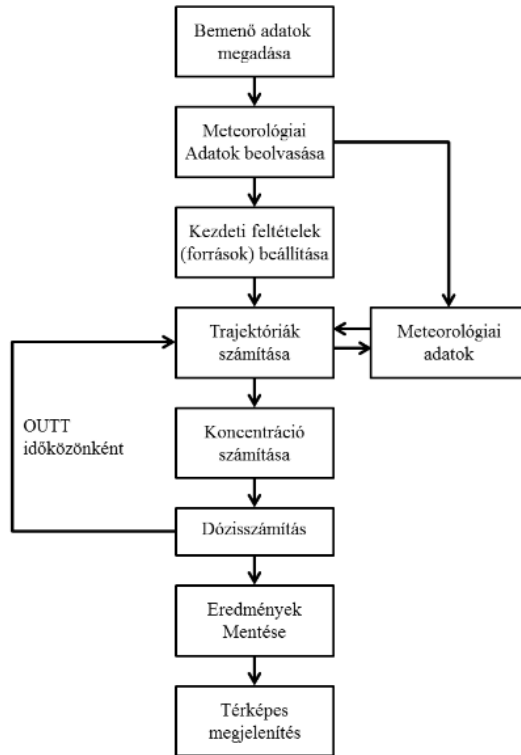
Az előzőekben felvázolt matematikai modell a kibocsátott szennyezőanyag-halmazból egyetlen részecskére fókuszálva írta le annak mozgását, illetve tömegének módosulását. Az anyaghalmaz részecskéinek tömegét összegezve a kibocsátott szennyezőanyag-csomagokra vonatkozó koncentráció kapható. Egy adott földrajzi pontra vonatkozóan koncentráció eloszlás definiálható, mely az anyaghalmaz k. kémiai komponensére vonatkozóan az alábbi alakot ölti:

$$c_k = \sum_{p=1}^N \left[\frac{m_{pk}}{2\pi\sigma_{h,p}^2\Delta z} \cdot \exp \left(\frac{-0,5d_p^2}{\sigma_{h,p}^2} \right) \right]. \quad (24)$$

Az egyes részecskék kiterjednek tekinthetők az összegzés során, a tömegeloszlásuk pedig vertikálisan homogén, horizontálisan pedig normális eloszlást követ. Az egyenletben m_{pk} a p-edik részecske által a k-adik komponensre képviselt tömeget jelenti, míg d_p a részecske középpontjának távolsága az adott rácsponttól. A Δz változó a részecske vertikális, míg $\sigma_{h,p}$ a horizontális kiterjedése.

3.2. A szoftver alkalmazása

A MONTEE modell futása három egymásba ágyazott ciklusból épül fel. A szimuláció folyamata az 5. ábrán olvasható:



5. ábra – A MONTEE programcsomag fizikai modellje. A szimuláció egy külső és két belső cikluson alapul (Forrás: ELTE and RTTSz, 2014)

A modell által három különböző modul alkalmazható szimuláció során. Ezek az automatikus, a baleseti és a gyakorlati modulok. Automatikus modul alkalmazása esetén előre definiált időközönként történik szimuláció. A számítás terjedési, ülepedési információkkal szolgál, illetve az erőmű környezetében élő lakosság sugárterhelését is kiszámítja. A baleseti modul alkalmazása viszont azonnal leállítja a háttérben futó modulokat és az adott szituációhoz tartozó meteorológiai és mérési adatokkal végez szimulációt. A számítások kis részecskeszámmal indulnak, az erre vonatkozó információkat az erőmű központi adatgyűjtő rendszeréből (Túri, 2013) a MONTEE modell üzemzavar esetén automatikusan elérheti.

Gyakorlati modul alkalmazása során meghatározott, fiktív kibocsátások szimulációja végezhető. Kezdeti feltételként a kibocsátott részecskeszámot, az időlépcsők hosszát, a szimuláció időtartamát, a kibocsátott szennyező anyagok típusát és azok aktivitását lehet megadni a kibocsátási forrással együtt. Meteorológiai háttérmezőként numerikus modellek alkalmazhatók, illetve a modell által tárolt hat időjárási minta használható, melyekhez szél és hőmérsékleti értékek adhatók meg a szimuláció kezdeti és végső időpontjára. Az input adatokhoz tartozó kezelői felület az 6. ábrán látható.

6. ábra – A szoftver kezdeti paramétereinek megadására szolgáló kezelőfelület. A források és a kibocsátási értékek mellett a kibocsátás kezdeti időpontját, annak időtartamát, illetve a vizsgált időszak meteorológiai viszonyait lehet beállítani (Forrás: ELTE and RTTSz, 2014)

3.3. A felhasznált adatok

A szimulációk során több lehetőség is adott az input adatok megadásához. Az alapértelmezett beállítás a GFS (Global Forecasting System) globális előrejelzési modell, amit naponta négyszer futtatnak le. A GFS alkalmazása által egy horizontális rácson, illetve vertikálisan több szinten tárolt adathalmaz érhető el, ami tartalmazza a számításokhoz szükséges alapparamétereket, illetve parametrizált változókat, mint például a turbulens sebességfluktuációk vektora. A modell 3 órás időlépcsővel dolgozik, időben csökkenő rácsfelbontással.

A gyakorlati modul bemutatásánál említésre került, hogy előre tárolt meteorológiai minták is alkalmazhatóak input mezőként. Ezek az *1. táblázatban* láthatók:

1. táblázat – A meteorológiai háttérhelyzet beállításához felkínált különböző minták
(Forrás: *ELTE and RTTSz, 2014*)

Meteorológiai minta	Időjárási helyzet leírása
met1	Hidegfront hátoldal, mérsékelt, erősödő, É felé forduló ÉNy-i szél, csökkenő hőmérséklet, gomolyfelhős égbolt
met2	Anticiklon keleti perem, éjszaka, csökkenő hőmérséklet, magas páratartalom, gyenge É-i szél
met3	Melegszeaktor, élénk, kezdetben D-i, majd DNy-i irányba forduló szél, gomolyfelhők, magas páratartalom, emelkedő hőmérséklet
met4	Téli anticiklon, zárt felhőzet, gyenge ÉK-i szél, alacsony hőmérséklet
met5	Évi átlagos nappali időjárás, mérsékelt ÉNy-i szél, közepes határreteg-magasság
met6	Anticiklon Ny-i perem, nappal, növekvő hőmérséklet, közepes páratartalom, gyenge déli szél

A meteorológiai háttérmező mellett a modell kezdeti feltételét képezik a kibocsátási adatok. Ezek a központi adatgyűjtő rendszerből automatikusan érhetők el, vagy egyedileg kézzel is megadhatók, ami a gyakorlati modulnál található ábrán (6. ábra) figyelhető meg. A kibocsátási adatoknál fontos megemlíteni azok forrását, melyek mindkét blokk esetén három lehetőséget jelentenek. A reaktorépületből történő kibocsátás 30 méteres magasságban történik, mely a turbinaépület esetén 35 méter. A legmagasabb lehetséges kibocsátási pontot a szellőzőkémények (100 m) jelentik (*ELTE and RTTSz, 2014*).

4. Atomerőművi üzemállapotok

A villamosenergia termelésben bekövetkezett technikai fejlődés az előnyök mellett újabb kockázatokkal is jár. Ezek olyan veszélyforrások lehetnek, melyek a lakosságot, illetve a létesítmény természeti környezetét is érinthetik. Az atomerőmű biztonságos üzemeltetéséhez, illetve a műszaki újításokkal járó kockázatok csökkentéséhez meg kell ismerni az azokat meghatározó tényezőket, majd kategóriákba sorolva rendszerezni azokat.

A nemzetközi gyakorlatban egy hatlépcsős kategorizálási eljárás használatos az atomerőművek üzemeltetése során fellépő üzemzavarok súlyosságának meghatározása során. Itt négy tervezési alapba tartozó (TA1–TA4), illetve két tervezési alapon kívüli (TAK1, TAK2) üzemállapotról beszélhetünk, melyeket a 2. táblázat tartalmaz (NBSz, 2015).

**2. táblázat – Az atomerőművi üzemállapotok, illetve azok bekövetkezésének gyakorisága
(Forrás: NBSz, 2015)**

Üzemállapot	Megnevezés	Esemény gyakorisága (f [1/év])
TA1	Normál üzem	–
TA2	Várható üzemi események	$f \geq 10^{-2}$
TA3	Kis gyakoriságú tervezési üzemzavarok	$10^{-2} > f \geq 10^{-4}$
TA4	Nagyon kis gyakoriságú tervezési üzemzavarok	$10^{-4} > f \geq 10^{-6}$
TAK1	Az aktív zóna vagy a pihentető medence komplex üzemzavara, amely nem jár az üzemanyag (jelentős részének) megolvadásával	–
TAK2	az üzemanyag jelentős részének megolvadásával járó súlyos baleset	–

Az alábbiakban azon üzemállapotok szerepelnek, amelyek a tervezési üzemzavarok körén kívül esnek, több súlyos hiba láncolata idézheti elő őket és olyan következményekkel járnak, melyek nem egyeztethetők össze a tervezési alapba tartozó folyamatokkal.

4.1. TAK1 és TAK2 üzemállapotok

A TAK1 (DEC1 – **D**esign **E**xtension **C**onditions) olyan eseményt jelöl, melyet több, egymástól független hiba eredményezhet. Ez súlyosabb következményekkel járhat, mint amelyek a tervezési alapba tartozó üzemállapotoknál jellemzőek és a fűtőelemek sérülését okozhatják, azok olvadása nélkül. A TAK1 típusú scenáriót a már meglévő atomerőművek esetén tervezési alapon kívüli üzemzavarnak nevezik.

A különböző atomerőművi blokkok esetén meghatározható az egyes üzemállapotokhoz a radioaktív kibocsátás értéke, mely az egyes radionuklidok esetén eltérő értéket mutat. A forrástag változékonysága az adott blokk típusában, illetve a kibocsátás kezdete óta eltelt időben is megmutatkozik (3. táblázat). A 3. táblázatban az élettani hatások jelentősége és az elhárítás tervezésében játszott fontos szerepe miatt csupán a ¹³¹I izotópra vonatkozó értékeket mutatja; a gyakorlati szimulációk tárgyalásánál (lásd 5. fejezet) ezeket az értékeket vettem figyelembe. Az adatok az újonnan létesítendő atomerőművi blokkokra vonatkoznak.

3. táblázat – TAK1 scenárió esetére meghatározott kibocsátási értékek [Bq] egységben egy atomerőművi blokkhoz ¹³¹I radionuklidra vonatkozóan
(Forrás: MVM Paks II. Zrt., 2015)

Megjelenési forma	Kibocsátás szellőzőkéményen keresztül (100 m)			Felszíni kibocsátás		
	1 nap	10 nap	30 nap	1 nap	10 nap	30 nap
Molekuláris jód	1,1E+08	5,9E+08	8,7E+08	2,3E+11	2,4E+11	2,4E+11
Szerves jód	2,5E+09	1,7E+10	2,8E+10	1,8E+09	1,2E+10	2,0E+10

A TAK2 olyan tervezési alapon kívüli esemény megjelölése, mely legsúlyosabb külső hatásokat eredményező baleseti állapot. Ebbe a kategóriába azok a folyamatok tartoznak, melyek az erőmű energiatermelését biztosító hasadóanyag jelentős olvadását okozzák, illetve bekövetkezésük a baleseti határértéket átlépő szennyezőanyag kibocsátáshoz vezet. A TAK2 üzemállapothoz meghatározott ¹³¹I kibocsátási adatait az új erőművi blokkokra vonatkozóan a 4. táblázat tartalmazza (MVM Paks II. Zrt., 2015).

**4. táblázat – TAK2 scenárió esetére meghatározott kibocsátási értékek [Bq] egységben egy atomerőművi blokkhoz ¹³¹I radionuklidra vonatkozóan
(Forrás: MVM Paks II. Zrt., 2015)**

Megjelenési forma	Felszíni kibocsátás időtartama			Szellőzőkéményen keresztüli (100 m) kibocsátás időtartama	
	0–1 nap	1–7 nap	7–30 nap	1–7 nap	7–30 nap
Molekuláris jód	9,4E+12	4,1E+11	–	3,5E+11	–
Szerves jód	1,8E+12	8,4E+11	4,7E+11	4,5E+12	4,7E+12
Aeroszol	4,5E+13	6,8E+12	–	6,1E+11	–

5. Numerikus szimulációk

Diplomamunkám gyakorlati részét egy numerikus szimulációkon alapuló tanulmány képezi, melyben a 3. fejezetben bemutatott MONTEE terjedésszámítási szoftver időjárási helyzetekre való érzékenységet vizsgáltam.

Minden egyes modell szimulációnál a forrástagot a ^{131}I izotóp képezte, melyhez a kibocsátási értékek a 4. fejezetben ismertetett TAK1, illetve TAK2 üzemállapotokra vonatkoznak. A kibocsátás minden szimulációnál időben állandó intenzitású volt, az eredeti adatszolgáltatásban megadott időbeli változásokat nem vettem figyelembe. Ezzel egyszerűsíteni tudtam a futtatásokat, ugyanakkor a végeredményben konzervatív irányban (a legkedvezőtlenebb helyzetet feltételezve) tévedtem, ami sugárvédelmi szempontból megengedhető. Minden számítást kéménykibocsátásokkal végeztem. A TAK1 eseményekre vonatkozó számításoknál a 30 napos összegzett kibocsátási értékkel számoltam, míg a TAK2 számításoknál a tervezett atomerőművi blokkra vonatkozó megjelenési formától függetlenül és kibocsátási időtartamonként összegeztem. Ez TAK1 esetén $2,9\text{E}+10$ Bq, míg TAK2-nél $1,1\text{E}+13$ Bq radioaktivitást jelentett. Ezek a kibocsátási mennyiségek „pöff”-önként 1000 db részecske feltételezésével alkották a szennyezőanyag-csóvát (ezzel a beállítással elfogadható futtatási sebességet tudtam elérni).

A radionuklidok kibocsátási forrásaként az 1. blokk 100 m magas szellőzőkéményét (Ész. $46,58^\circ$; Kh. $18,85^\circ$) adtam meg. A számítási területet az erőmű tervezet telephelyét körülvevő 30 km sugarú kör belterülete alkotta.

Az elemzés elvégzéséhez hét meteorológiai mintát választottam, amelyeket a 2015-ös év meghatározó meteorológiai eseményei alkotnak. Az egyes helyzetek kiválasztásánál a következő szempontokat vettem figyelembe:

- uralkodó szélirány, mely Pakson ÉNy-i,
- csapadékos időjárási helyzetek, amelyek a kibocsátott szennyezőanyag nedves kimosódását eredményezik,
- anticiklonok, melyek esetén a napsütéses órák száma nagy, így segítve közvetett úton az alsó légréteg turbulens átkeveredését, illetve a száraz ülepedés folyamatát
- konvektív szituációk, amelyek vertikális átkeveredést biztosítanak.

Az előbbieken felsoroltakat figyelembe véve, egy januári, két márciusi, két májusi, egy júliusi, illetve egy augusztusi időjárási helyzetet választottam. Ezek bemutatásához az OMSZ által minden nap publikált napijelentés kiadványában elérhető fronttérképeket

használtam (http://met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/), míg a rádiószondás felszállásokat a Wyoming-i Egyetem honlapján értem el (<http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>).

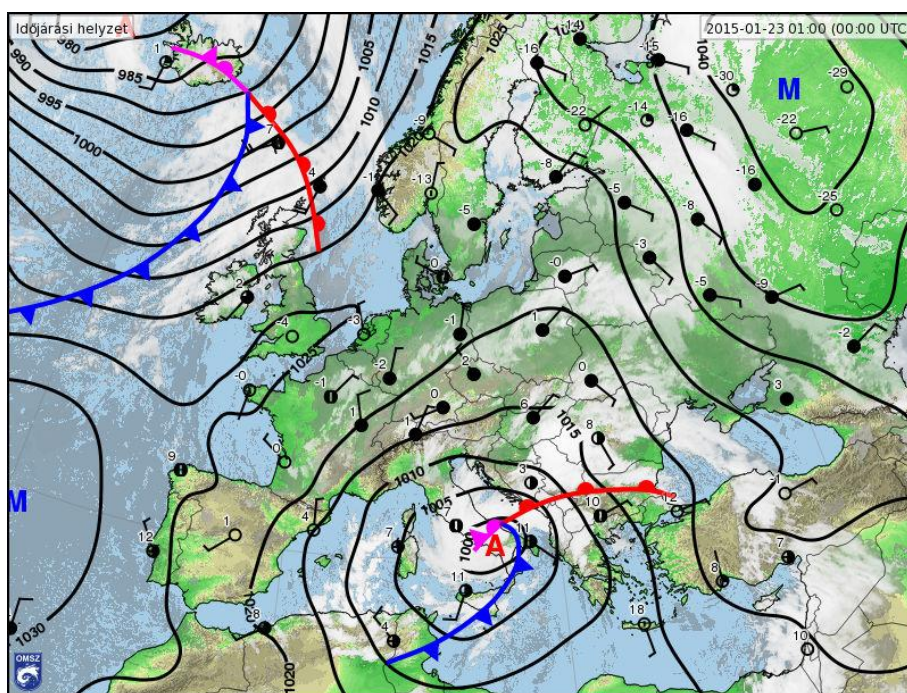
Minden egyes szimuláció 72 órás időszakra vonatkozóan, 60 perces időlépcsővel végeztem, melyekhez a meteorológiai háttérrel a GFS modell output mezői képezték. A számítások minden egyes alkalommal 00 UTC-től 00 UTC-ig tartó periódusra készültek. A TAK1 és TAK2 üzemállapotok kibocsátási adataival az összes meteorológiai helyzetre végeztem el a MONTEE modell futtatását, így 14 különböző szimuláció készült.

Az eredmények kiértékelésénél a számított aktivitás-koncentrációk mellett az azokból származtatott különböző dózisokat vizsgáltam. A modell a 30 km-es zónán belül több, mint 80 település esetén határozza meg ezek értékét, melyek közül az alábbiakban a maximumokat mutatom be.

A hét meteorológiai mezőhöz tartozó TAK1, illetve TAK2 modellfutások kiértékelését a következő fejezetekben foglaltam össze (*lásd 5.1–5.7. fejezet*). Az eredmények időben történő változását a levegőben, illetve a talajon mérhető aktivitás-koncentrációk esetére vizsgáltam, illetve a dózis fogalmaknál az inhalációs dózist választottam, amely a belégzésből származó sugárterhelés mértékét adja meg. ¹³¹I izotóp esetén kiemelten fontos ennek ismerete, ugyanis légzés útján a szervezetbe jutó jódtól a pajzsmirigyre gyakorolhat hatást, blokkolhatja annak működését. Az ehhez készített diagramoknál nem lineáris skála-beosztást használtam, ugyanis a legmagasabb értékeket akartam kiemelni a 72 órás időszakokon belül. A kiértékelések utáni szakaszban vontam le következtetéseimet az időjárás hatásaival kapcsolatban (*lásd 5.8. fejezet*).

5.1. 2015. január 23–25.

A vizsgált időszak előtt egy mediterrán ciklon alakult ki a Földközi-tenger nyugati medencéje felett, melynek előoldalán január 23-tól nagy nedvességtartalmú levegő áramlott a Kárpát-medencébe (7. ábra). A melegfronti felhőzethez kiterjedt csapadéközóna tartozott, mely nagy mennyiségű, országos esőt okozott. A ciklon előoldalán az északkeleti szél megélénkült, amit erős lökések kísérték.



7. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. január 23-án. A Földközi-tenger nyugati medencéje felett kimélyült mediterrán ciklon melegfrontja elérte a Kárpát-medencét, melyhez nagy mennyiségű eső, illetve élénk ÉK-i szél kapcsolódott (Forrás: met.hu)

Az alacsony nyomásközpont fokozatosan kelet felé helyeződött át, így annak hátoldalán kezdetben északi, majd északnyugati széllel hideg levegő áramlott hazánk térségébe. A szimulációs időszak második, illetve harmadik napján az advektálódó hideg levegő következtében a csapadék halmazállapotának változása volt megfigyelhető, az esőt gyenge, megszakításokkal kísért havazás váltotta fel.

Pakson 23-án borult volt az ég. Kezdetben páráos volt a levegő, majd a reggeli óráktól eleredt az eső, amely kisebb megszakításokkal az egész napon jellemző volt. A csapadék mennyisége éjjelre elérte a 36 mm-t. A mérsékelt ÉK-i szelet időnként élénk, olykor erős lökések kísérték. A legalacsonyabb hőmérséklet 5,3 °C volt, míg a nappali maximum a 7,2 °C-os értéket vette fel.

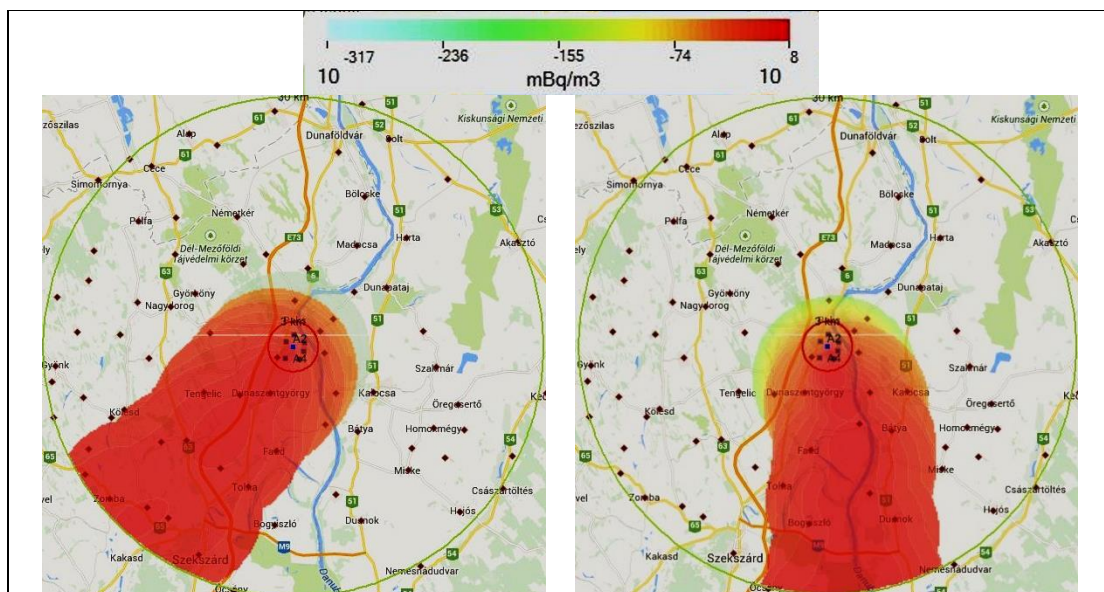
24-én szitálás, illetve eső volt jellemző kisebb megszakításokkal, ugyanakkor a napközben fokozatosan csökkenő léghőmérséklet hatására a csapadék halmazállapota megváltozott és az esti óráktól az esőt havazás váltotta fel. A csapadék mennyisége 11,5 mm volt. Az É-i, ÉNy-i szél gyenge, illetve mérsékelt maradt. A legalacsonyabb, illetve a legmagasabb hőmérséklet is 3 °C volt, ugyanis napközben a ciklon hátoldalán a magasban beáramló hideg levegő hatására a hőmérséklet folyamatos csökkenése volt jellemző, így a maximum is reggel 6 UTC időpontban állt be.

Gyenge havazás, illetve ismétlődő hózáporok voltak jellemzőek 25-én, melyekből a talajon hólepel alakult ki. Az É-i szél mérsékelt maradt. A legalacsonyabb hőmérséklet 0,2 °C volt, mely napközben 0,5 °C-ig emelkedett.

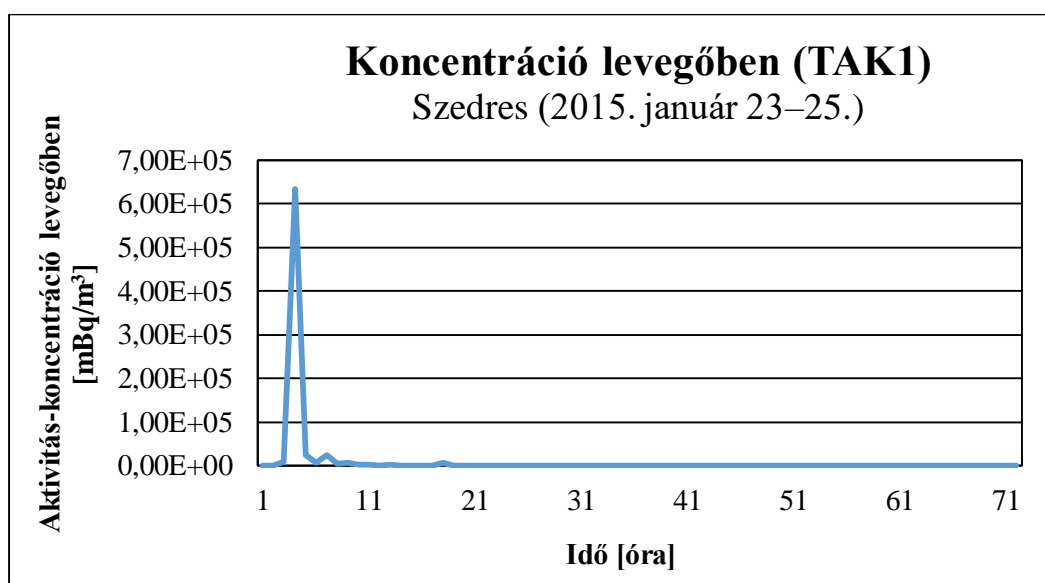
5. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson január 23–25. időszakban (Forrás: met.hu)

	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
<i>Január 23.</i>	5,3 °C	7,2 °C	36 mm	ÉK-i mérsékelt, élénk lökések
<i>Január 24.</i>	3,0 °C	3,0 °C	11,5 mm	É–ÉNy-i mérsékelt
<i>Január 25.</i>	0,2 °C	0,5 °C	1,5 mm/hólepel	É-i mérsékelt

Az előbbieken ismertetett időjárási helyzet mellett, TAK1 üzemállapot feltételezésével készített szimuláció grafikus eredménye a 8. ábrán látható, a kibocsátás utáni 12., illetve 30. órában. A térképeken az emittálódott ¹³¹I aktivitás-koncentrációja látható, ami a vizsgálati időszakban uralkodó széliránynak megfelelően délnyugati, majd déli irányban terjedt, a szimuláció során a két legjellemzőbb széliránynak megfelelően. Mérhető koncentráció értékek a telephelytől délre elhelyezkedő településeken adódtak. A legmagasabb, levegőben mérhető aktivitás-koncentráció érték a telephelytől megközelítőleg 20 km-es távolságra, délnyugatra elhelyezkedő Szedresen volt tapasztalható 6,34E+05 mBq/m³ értékkel, amely a számítás 4. órájában jelentkezett (9. ábra).

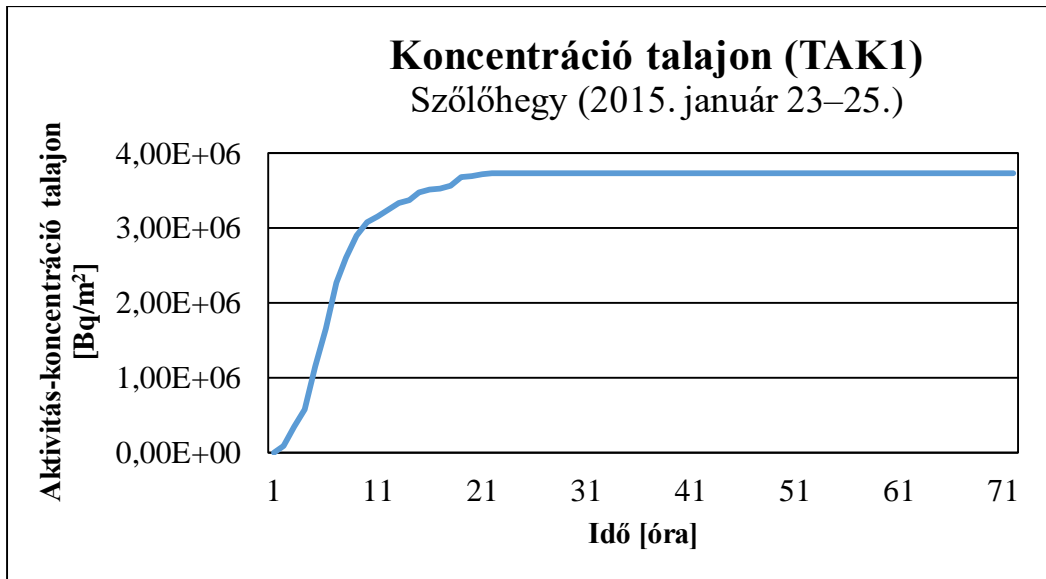


8. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemállapotra szimulált szennyezőanyag felhő a számítási időszak 12., illetve 30. órájában. Az északias szél hatására a csóva az erőmtől délre fekvő településeket érintette



9. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Szedresen [mBq/m³] egységben. Maximális értéke 6,34E+05 mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 4. órájában jelentkezett

Szedres mellett kiemelkedően magas érték a vele szomszédos Fácánkerten, illetve a telephelytől délre elhelyezkedő Dunaszentgyörgyön adódott. A talaj aktivitás-koncentrációjának maximuma szintén a vizsgált terület délnyugati negyedében volt, azonban ez nem az előbb felsorolt települések esetén jelentkezett, hanem az erőmtől 10 km-re, délnyugatra fekvő Szőlőhegyen. Értéke a modellfutás 72. órájára elérte a 3,73E+06 Bq/m²-t (10. ábra).

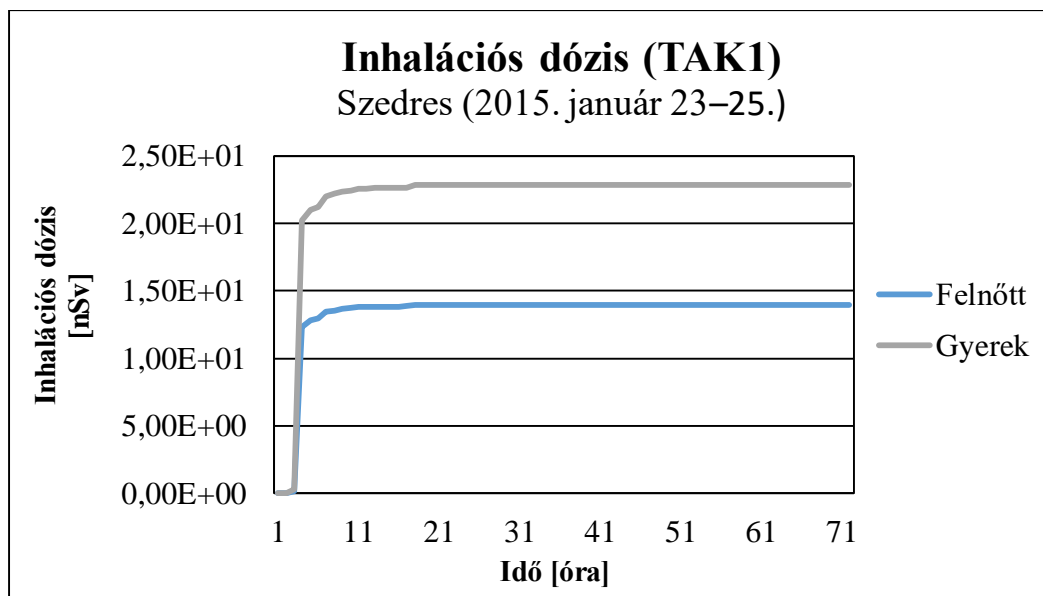


10. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Szőlőhegyen [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte a 3,73E+06 Bq/m²-t

A számított aktivitás-koncentrációból meghatározható inhalációs dózis a belézésből származó sugárterhelést számszerűsíti, és az alábbi formula szerint számolható:

$$E = \sum_{j=1}^n \left(V \cdot K_j \cdot f_{1,j} \cdot F \cdot \int_{t_1}^{t_2} C_j(P, t) dt \right). \quad (25)$$

Itt K_j az j -edik izotóp inhalációs dózistényezője [Sv/Bq], V a légzés intenzitása, $f_{1,i}$ a tüdő visszatartó képessége az j -edik radionuklidra vonatkozóan, F a szabadban, illetve az épületben való tartózkodás arányát és az épület árnyékoló hatását kifejező redukciós tényező, $C_j(P, t)$ pedig az adott izotóp aktivitás-koncentrációja P helyen t időpillanatban (*MVM Paks II. Zrt.*, 2015). Értéke a levegőben terjedő szennyezőanyag aktivitásától függ, így a maximuma Szedres esetén volt tapasztalható. Felnőtt korosztály esetén a szimuláció 72. órájára 1,40E+01 nSv érték adódott, mely gyerekek esetén a 2,29E+01 nSv-et érte el (*11. ábra*).



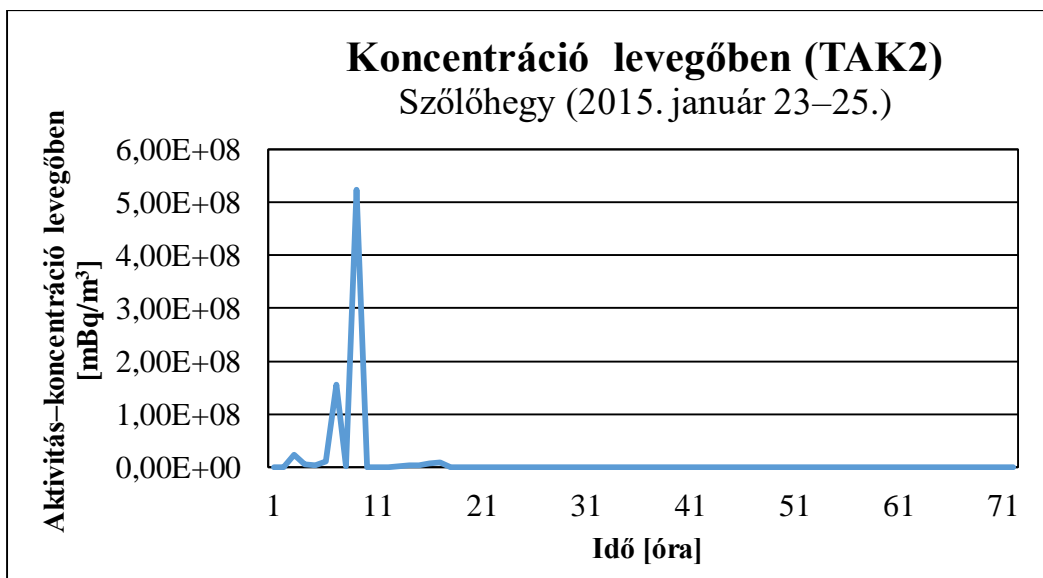
11. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Szedresen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkozóan. Értéke a felnőttek esetén az 1,40E+01 nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkoztatva a 2,29E+01 nSv-et jelentette.

A levegő, illetve a talaj radioaktivitásának ismeretében meghatározhatók további dózis típusok is, amelyekből a legmagasabb értékeket elérő településeket a 6. táblázat tartalmazza. A felhőből eredő külső dózis kivételével két korcsoportra adhatók meg, amelyek összegéből teljes dózis állítható elő. A legnagyobb jódból származó dózisok Szedresre vonatkozóan születtek, melyek felnőtt korosztály esetén 2,93E+02 nSv-et, míg gyerekeknél 4,79E+02 nSv értéket jelentettek.

6. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

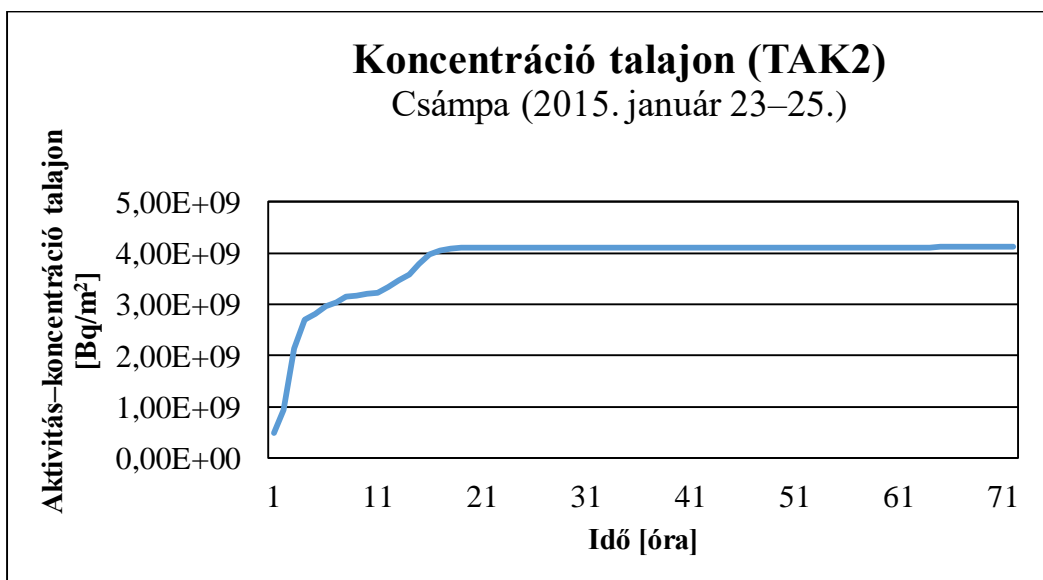
TAK1 (2015. január 23-25.)	Szedres	Fácánkert	Dunaszentgyörgy
Inhalációs dózis felnőttekre	1,40E+001	1,05E+001	1,33E+001
Inhalációs dózis gyerekekre	2,29E+001	1,71E+001	2,18E+001
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	2,80E+002	2,09E+002	2,66E+002
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	4,56E+002	3,41E+002	4,34E+002
Talajból eredő dózis felnőttekre	7,56E-004	5,99E-004	1,35E-003
Talajból eredő dózis gyerekekre	7,56E-004	5,99E-004	1,35E-003
Felhőből eredő dózis	5,16E-002	3,62E-002	4,60E-002
Teljes dózis felnőttekre	2,93E+002	2,20E+002	3,98E+001
Teljes dózis gyerekekre	4,79E+002	3,59E+002	4,56E+002

TAK2 üzemállapot mellett Szőlőhegyre vonatkozóan született a szimuláció maximális levegőbeli aktivitás-koncentráció értéke. Ez a számítási időszak 9. órájában jelentkezett, és az 5,23E+08 mBq/m³-t érte el (12. ábra).



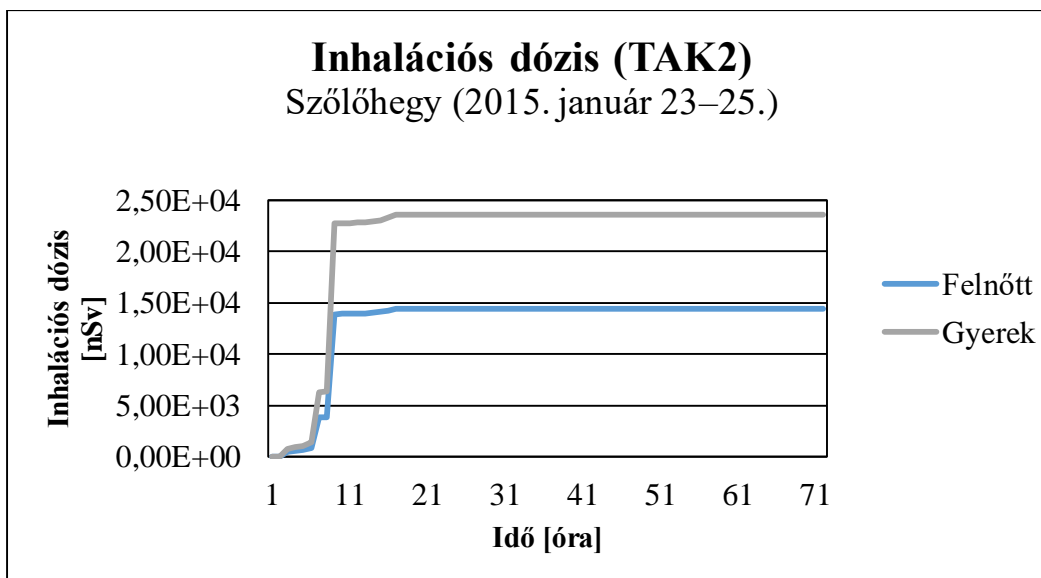
12. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Szőlőhegyen [mBq/m³] egységben. Maximális értéke 5,23E+08 mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 9. órájában jelentkezett

Szőlőhegy után Ócsény és Tengelic települések esetén volt tapasztalható a legmagasabb radioaktivitás a levegőben. Talajon az erőmű 5 km-es körzetén belül fekvő Csámpa községre adódott a legmagasabb érték, amely a szimuláció 20. órájában elérte a 4,11E+09 Bq/m²-t (13. ábra).



13. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Szőlőhegyen [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte a 4,11E+09 Bq/m²-t

Az inhalációs dózis a TAK2-nek megfelelő forrástag alkalmazásával, három nagyságrenddel volt nagyobb, mint a TAK1-es üzemállapot esetén (14. ábra). Szőlőhegyen a felnőtteknél 1,44E+04 nSv, míg gyerek korosztály esetén 2,36E+04 nSv adódott.



14. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Szőlőhegyen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén az 1,44E+04 nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a 2,36E+04 nSv-et jelentette.

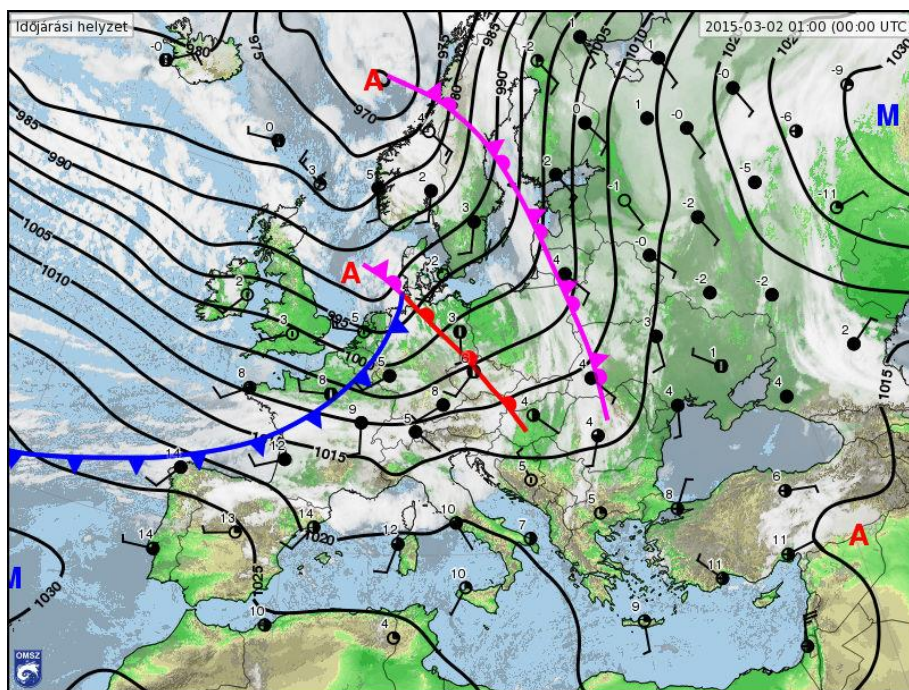
A 7. táblázat a legmagasabb dózisokat elérő településeket tartalmazza. A TAK1-hez hasonlóan ebben az esetben is a vizsgálati tartomány déli, délnyugati területein fekvő települések esetén adódtak a dózis maximumok. Szőlőhegy esetén az összegekből képzett teljes dózis 3,02E+05 nSv volt a felnőttekre, és 4,94E+05 nSv a gyerekekre vonatkozóan. Ezek a két érték az jó inhalációhoz hasonlóan három nagyságrenddel bizonyult nagyobbak a TAK1-re történt szimuláció eredményeinél.

7. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. január 23–25.)	Szőlőhegy	Ócsény	Tengelic
Inhalációs dózis felnőttekre	1,44E+004	4,71E+003	3,00E+003
Inhalációs dózis gyerekekre	2,36E+004	7,70E+003	4,91E+003
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	2,88E+005	9,42E+004	6,01E+004
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	4,70E+005	1,54E+005	9,79E+004
Talajból eredő dózis felnőttekre	5,43E–001	9,92E–002	2,56E–002
Talajból eredő dózis gyerekekre	5,43E–001	9,92E–002	2,56E–002
Felhőből eredő dózis	4,98E+001	1,63E+001	1,04E+001
Teljes dózis felnőttekre	3,02E+005	9,89E+004	6,31E+004
Teljes dózis gyerekekre	4,94E+005	1,62E+005	1,03E+005

5.2. 2015. március 2–4.

Március 2-án egy többközpontú ciklonrendszer örvénylett Észak-Európa felett, melynek déli felén peremciklon képződött, amely a zonális áramlás által gyors mozgással haladt kelet felé. Ennek a peremciklonnak a frontjai a Kárpát-medencét is érintették. A hajnali órákban érkezett meg hazánk térségébe a ciklon pajzs-típusú melegfrontjának vastag felhőtakarója (15. ábra), mely ismétlődő esőt, illetve záporokat okozott a nap során. A melegszektorban csökkent a csapadékhajlam, majd a következő nap hajnalban a hidegfront is megérkezett és újabb esőt eredményezett. A kezdetben élénk DNy-i szél a melegszektorban mérséklődött, majd a hidegfront mögött ÉNy-i irányba fordult és megélénkült, melyhez erős lökések kapcsolódtak.



15. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. március 2-án. Az Északi-tenger térségében kialakult peremciklon frontálzónája közelíti a Kárpát-medencét, melynek hátoldalán zonális áramlás jellemző (Forrás: met.hu)

A frontálzóna áthaladása után egy anticiklon alakult ki, melynek hátoldalán szárazabb, ugyanakkor hűvösebb levegő áramlott hazánk térségébe. 4-én a nagytérségű leszálló légmozgások eredményeként feloszlott a felhőzet, csupán délután volt megfigyelhető gomolyfelhő képződés.

Pakson 2-án, a délelőtti folyamán fokozatosan megvastagodott a felhőzet, majd a délutáni órákban a csapadékszóna is megérkezett. Kisebb megszakításokkal tarkított eső volt

jellemző, mely 6 mm-es napi csapadékösszeget eredményezett. A DNy-i szél napközben megélénkült, melyet 10 m/s-ot meghaladó lökések kísérték. A reggeli hőmérsékleti minimum 1,1 °C volt, mely napközben 14,3 °C-ig emelkedett.

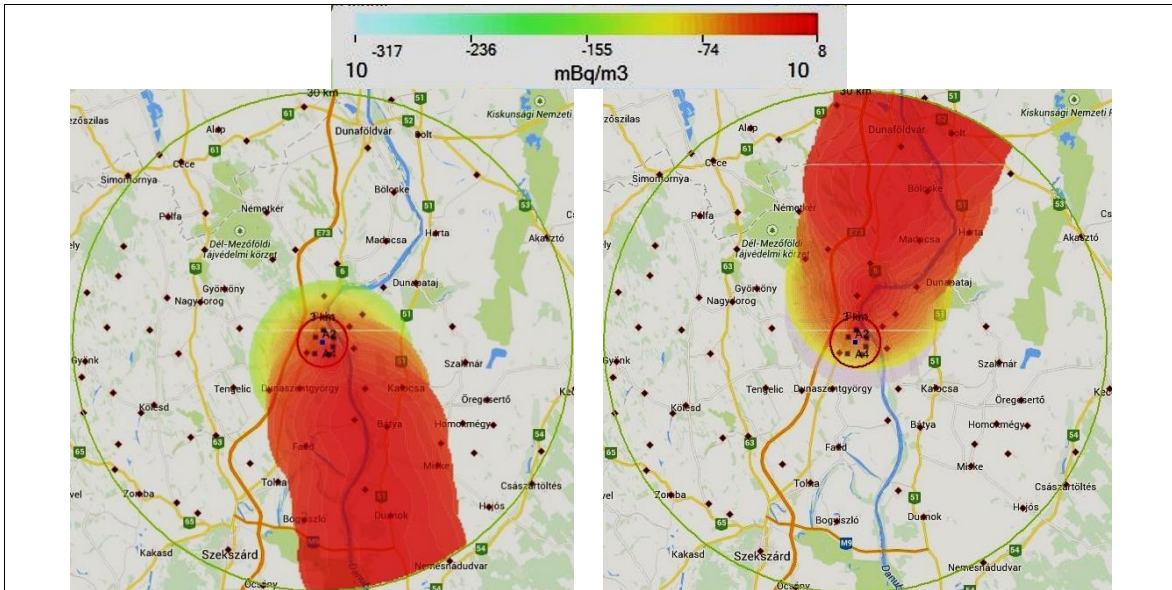
A melegfronti felhőzet az éjszaka során elvonult a város térségéből, így derült, gyengén felhős volt az égbolt, ugyanakkor a kora reggeli órákban megérkezett a hidegfront felhőzete, mely következtében ismét beborult az ég, és újabb eső volt megfigyelhető. A lehullott csapadék mennyisége 2 mm volt. A hidegfront hátoldalán az ÉNy-i szél megélénkült. A hajnali órákban 1,1 °C-ot mértek, míg délután 10,9 °C-ig emelkedett a levegő hőmérséklete, köszönhetően a felszakadozó felhőzetnek.

4-én középszintű felhőzettel borított égbolt volt jellemző, melyhez alacsony szinten gomolyfelhők társultak. Csapadék nem volt a nap során. A kezdetben élénk Ny-i szél É-i irányba fordult és mérséklődött. A nappali hőmérsékletek a –4,6 °C és a 10,5 °C-os értékek között ingadoztak.

8. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson március 2–4. időszakban (Forrás: met.hu)

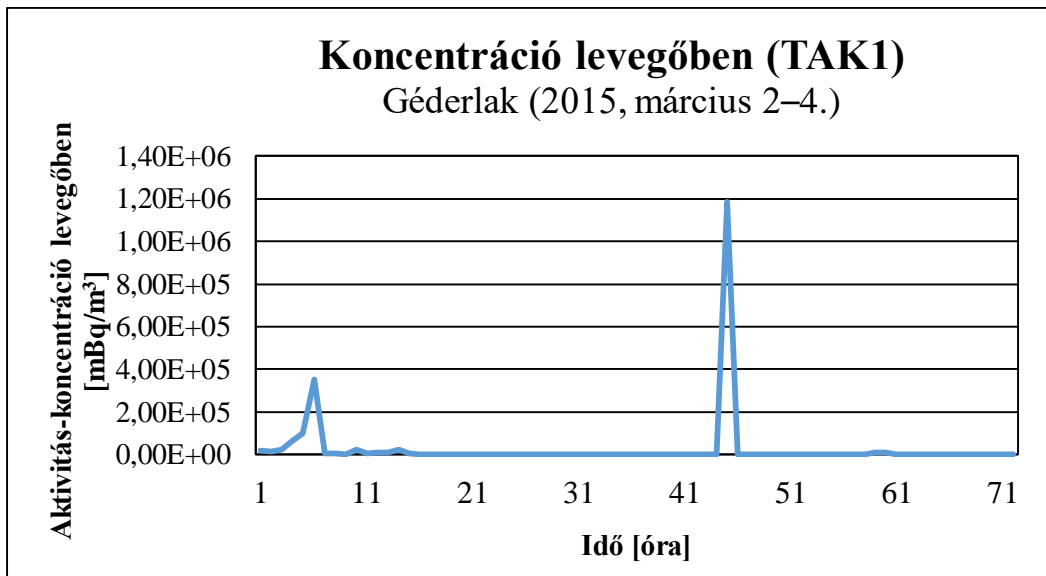
	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
Március 2.	1,1 °C	14,3 °C	6 mm	ÉK-i mérsékelt, élénk lökések
Március 3.	1,1 °C	10,9 °C	2 mm	É–ÉNy-i mérsékelt
Március 4.	–4,6 °C	10,5 °C	0 mm	É-i mérsékelt

Az ismertetett időjárási helyzetre vonatkozó TAK1-es üzemállapottal készített szimuláció grafikus szemléltetését a 16. ábra mutatja. A ¹³¹I aktivitás-koncentrációja rajzolódik ki a térképeken, a szimuláció kezdetétől eltelt 20. illetve 54. órában. A jellemzően északias légmozgás hatására a csóva a vizsgált terület déli felét érintette, viszont néhány óras periódusok esetén megfigyelhető volt a tengelyének keleti, vagy északi irányba fordulása.



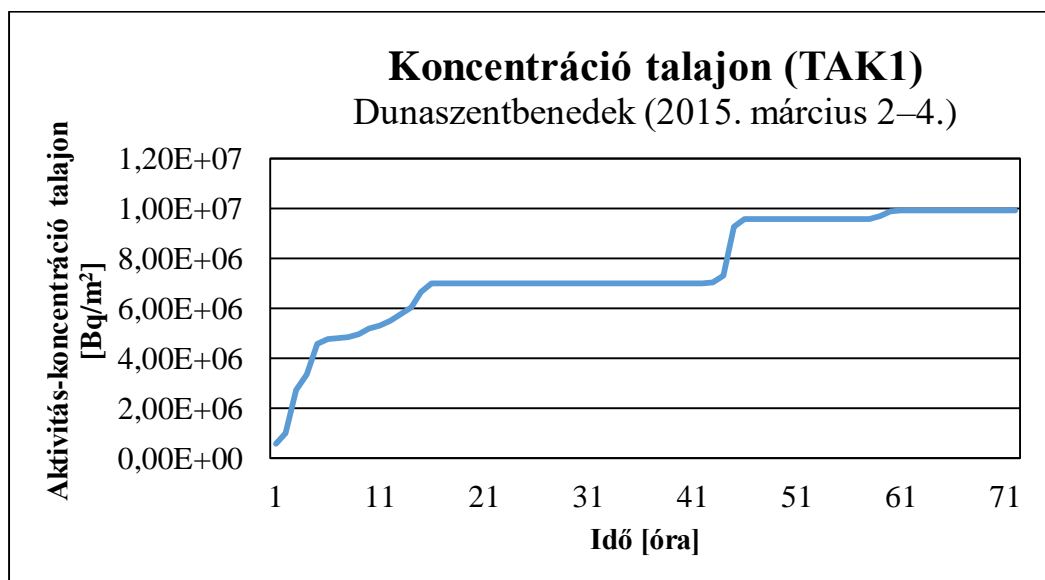
16. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemállapotra szimulált szennyezőanyag csóva a számítási időszak 20., illetve 54. órájában. A kibocsátott radioaktív felhő az északi légmozgás hatására a telephelytől délre elhelyezkedő településeket érintette, viszont néhány óras periódusokon a csóva tengely északias iránya volt megfigyelhető

A számítás során tapasztalt legmagasabb levegőbeli ^{131}I aktivitás-koncentráció érték a telephelytől 5 km-es távolságra, északkeletre elhelyezkedő Géderlak településre adódott (17. ábra). Itt a radioaktivitás maximuma $1,19\text{E}+06 \text{ mBq/m}^3$ volt, mely a szimuláció kezdete óta eltelt 45. órában jelentkezett.



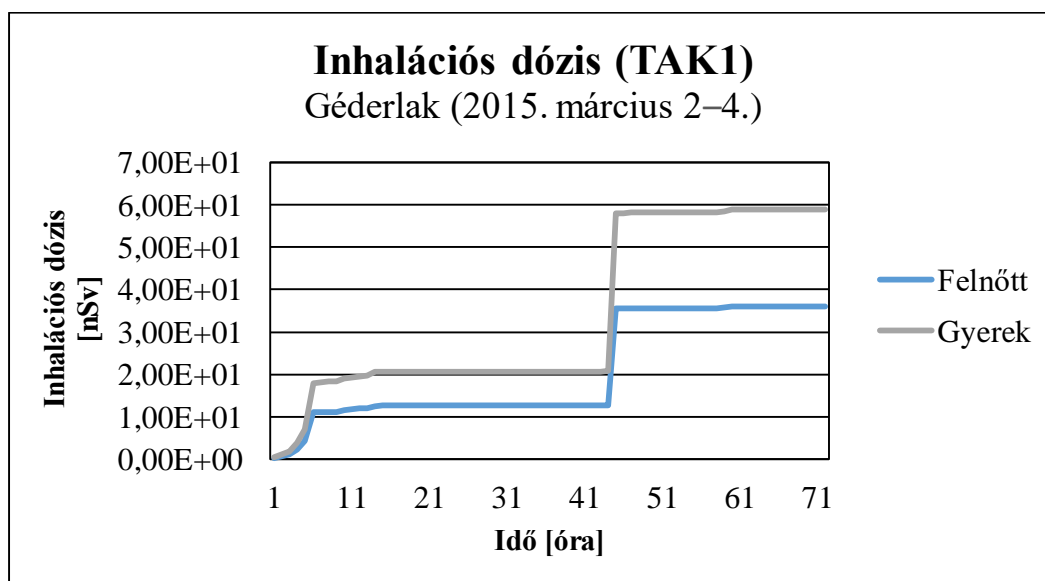
17. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Géderlakon [mBq/m³] egységben. Maximális értéke $1,19\text{E}+06 \text{ mBq/m}^3$ volt, amely a számítási időszak 45. órájában jelentkezett

A talaj aktivitás-koncentrációjának maximuma Paks és Géderlak között elhelyezkedő Dunaszentbenedeken adódott. Értékének emelkedése a számítási időtartam alatt többször volt tapasztalható (18. ábra), mely arra utal, hogy a szennyezőanyag csóva számos esetben rendelkezett keleti irányú tengellyel. A szimuláció végére $9,94\text{E}+06$ Bq/m² lett a koncentráció értéke.



18. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte a $9,94\text{E}+06$ Bq/m²-t

A jódtól származtatott inhalációs dózisokra Géderlakon a felnőtteknél $3,60\text{E}+01$ nSv, míg gyerek korosztály esetén $5,88\text{E}+01$ nSv adódott (19. ábra).



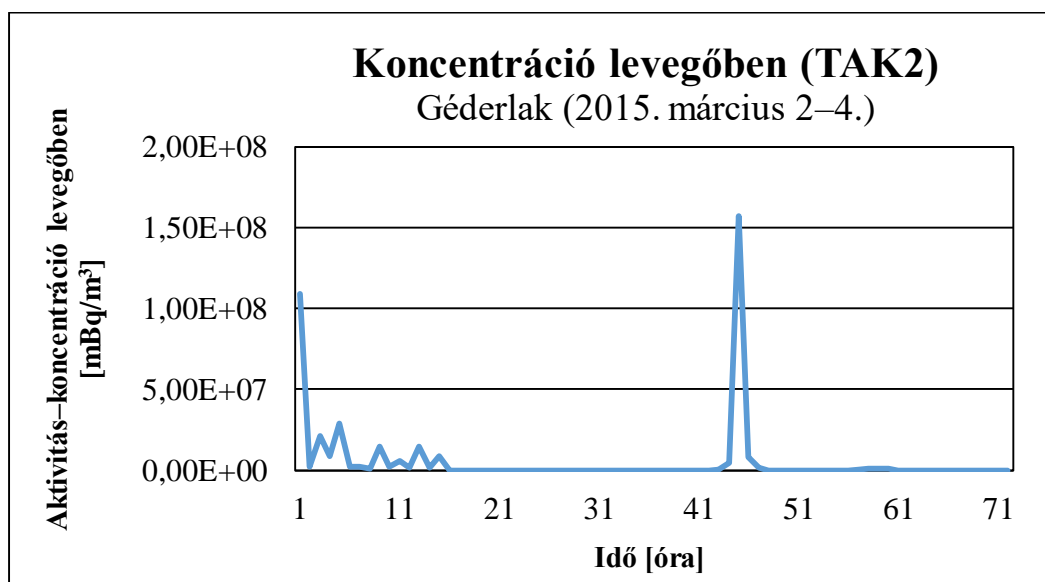
19. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Géderlakon [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a $3,60\text{E}+01$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan az $5,88\text{E}+01$ nSv-et jelentette

A kibocsátott ^{131}I izotóp radioaktivitásából származtatott dózisoskat TAK1 üzemállapot mellett a 9. táblázat tartalmazza. A szimuláció során előfordul dózisosknál a legnagyobb értékeket elérő városok kerültek bemutatásra. Az egyes dózis típusok korcsoportokra történő összegzésével Géderlakon $7,56\text{E}+02$ nSv adódott a felnőtt korosztályra vonatkozóan, mely gyerekek esetén $1,24\text{E}+03$ nSv-et eredményezett.

9. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisosk, illetve az azok összegét képező teljes dózisosk felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

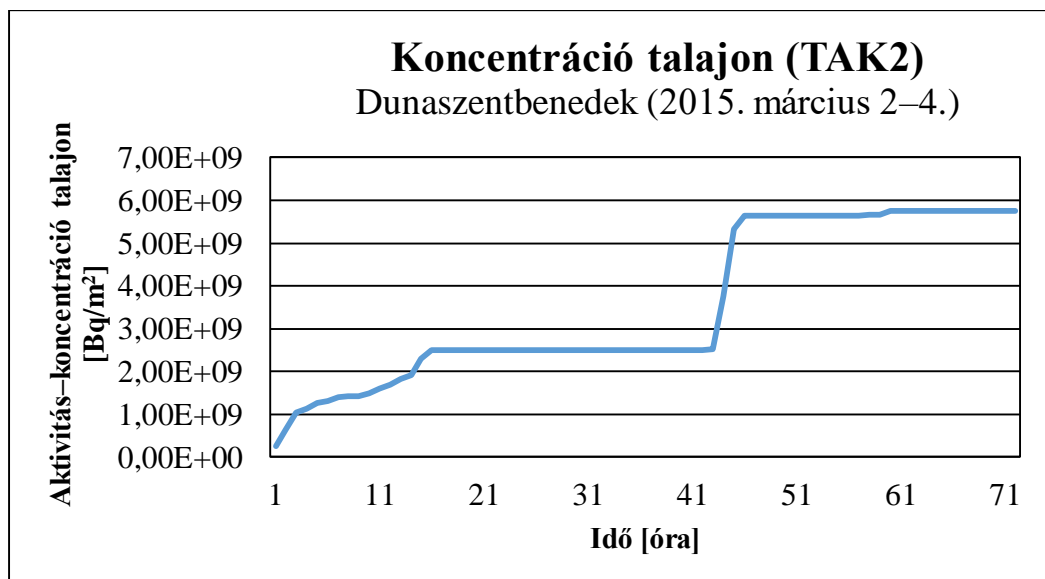
TAK1 (2015. március 2–4.)	Géderlak	Dunaszentgyörgy	Dunaszentbenedek
Inhalációs dózis felnőttekre	3,60E+001	1,46E+001	1,43E+001
Inhalációs dózis gyerekekre	5,89E+001	2,39E+001	2,33E+001
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	7,20E+002	2,93E+002	2,86E+002
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	1,18E+003	4,77E+002	4,66E+002
Talajból eredő dózis felnőttekre	3,14E–003	1,87E–003	3,73E–003
Talajból eredő dózis gyerekekre	3,14E–003	1,87E–003	3,73E–003
Felhőből eredő dózis	1,24E–001	5,05E–002	4,93E–002
Teljes dózis felnőttekre	7,56E+002	3,07E+002	3,00E+002
Teljes dózis gyerekekre	1,24E+003	5,01E+002	4,89E+002

TAK2 üzemállapot alkalmazásával szintén Géderlakon jelentkezett a legmagasabb levegőbeli jódszámítás a szimuláció időtartama alatt (20. ábra). Ez a maximum a TAK1-es számításához hasonlóan szintén a 45. időlépcsőben adódott, értéke $1,57\text{E}+08$ mBq/m³ volt.



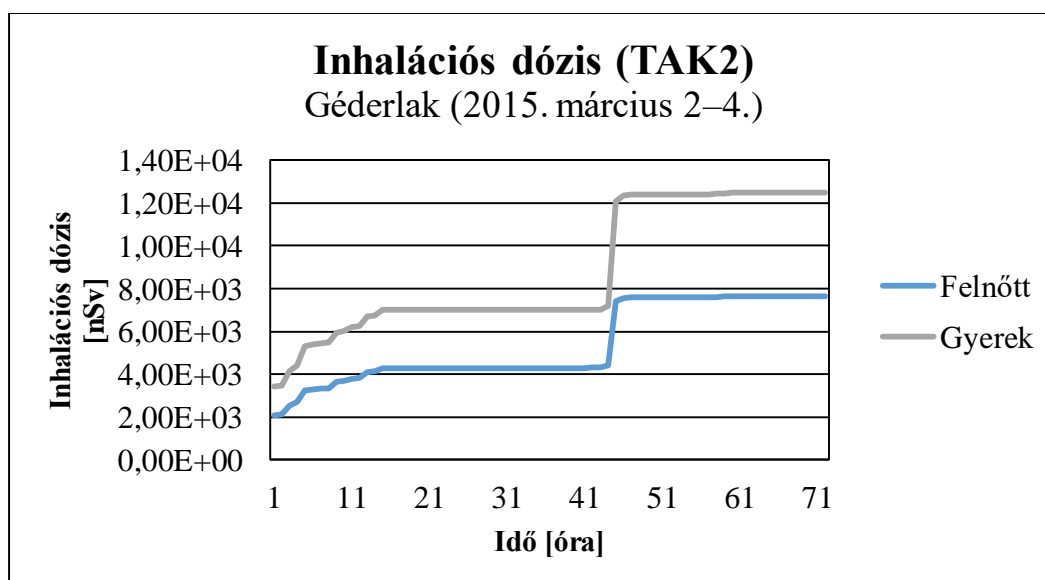
20. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Géderlakon [mBq/m³] egységben. Maximális értéke $1,57\text{E}+08$ mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 45. órájában jelentkezett

A két üzemállapot szimulációi közötti összhang a talaj radioaktivitásánál is jelentkezett, Dunaszentbenedek településen tapasztalható maximummal. Ennek értéke a 60. órában az $5,75E+09$ Bq/m²-t vette fel (21. ábra).



21. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az $5,75E+09$ Bq/m²-t

A jódból inhalációból származó dózisek Géderlakon két nagyságrenddel bizonyultak magasabbnak a TAK1 melletti szimuláció esetén számoltakkal, felnőttekre $7,64E+03$ nSv, míg gyerekekre $1,25E+04$ nSv adódott (22. ábra).



22. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Géderlakon [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a $7,64E+03$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan az $1,25E+04$ nSv-et jelentette

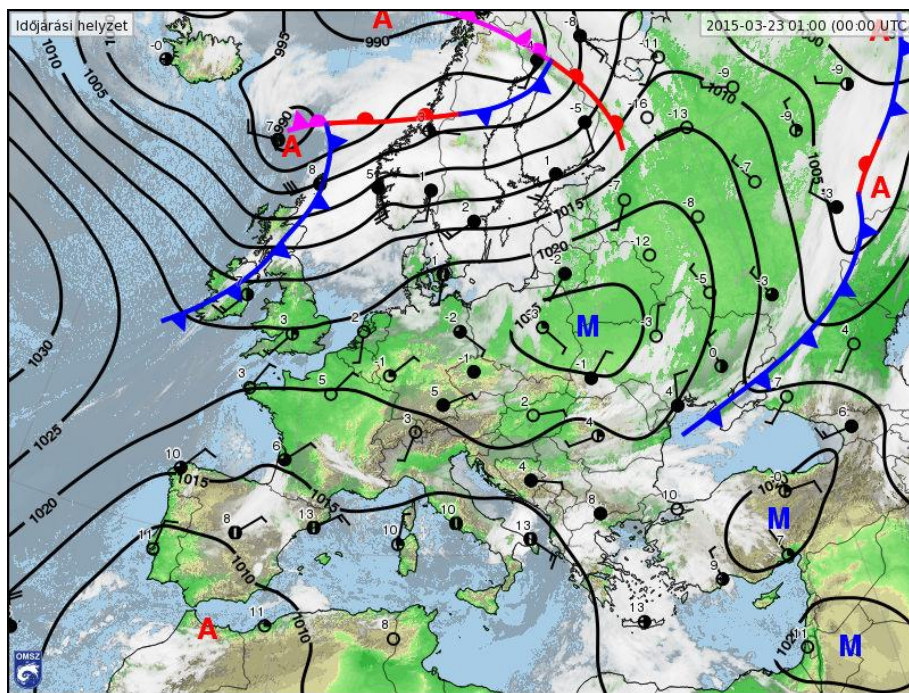
A jódkibocsátásból származtatott dóziszokat a 10. táblázat tartalmazza. Az előzőekben folytatott eljárás alapján ebben az esetben is a három legmagasabb értékekkel rendelkező település került szemléltetésre. Géderlak esetében a teljes dózisa 1,61E+05 nSv adódott a felnőtt korosztályra vonatkozóan, míg gyerekekre a 2,62E+05 nSv érték született. Ezek az eredmények két nagyságrenddel magasabb dózisterhelést jelentenek a TAK1 üzemállapothoz képest.

10. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dóziszok, illetve az azok összegét képező teljes dóziszok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. március 2–4.)	Géderlak	Gerjen	Dunaszentgyörgy
Inhalációs dózis felnőttekre	7,64E+003	3,98E+003	6,67E+003
Inhalációs dózis gyerekekre	1,25E+004	6,51E+003	1,11E+004
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	1,53E+005	7,96E+004	1,35E+005
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	2,49E+005	1,30E+005	2,21E+005
Talajból eredő dózis felnőttekre	1,03E+000	3,39E–001	6,66E–001
Talajból eredő dózis gyerekekre	1,03E+000	3,39E–001	6,66E–001
Felhőből eredő dózis	2,64E+001	1,38E+001	2,34E+001
Teljes dózis felnőttekre	1,61E+005	8,36E+004	1,42E+005
Teljes dózis gyerekekre	2,62E+005	1,37E+005	2,32E+005

5.3. 2015. március 22–24.

Március 22-én gyors mozgású teknő haladt el a Kárpát-medencétől északra, melynek előoldalán szibériai nyomásközponttal rendelkező ciklonhoz kapcsolódó, hosszan elnyúló, hullámzó frontálzóna húzódott. Ennek hidegfronti fázisa súrolta hazánk térségét, mely csak az ország északi felében okozott átmeneti felhősödést. Csapadék nem volt a számítási időszak alatt. Mérsékelt K-i, DK-i irányú volt a légmozgás, melyet időnként élénk lökések kísértek.



23. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. március 23-án. A front hátoldalán kialakuló anticiklon nagytérségű leszálló légmozgása által feloszlatta a felhőzetet a Kárpát-medence térségében (Forrás: met.hu)

A hidegfront áthaladása után egy anticiklon hatására (23. ábra) fokozatosan feloszlott a felhőzet, így a napsütéses órák száma megemelkedett, aminek következtében a határréteg alacsonyabb nyomási szintekig terjedt napközben, mely az alsó, körülbelül 1000 m vastag légréteg turbulens átkeveredését jelentette a nappali órákban. A turbulencia mellett a konvekció biztosított átkeveredést az adott időszakban, melyhez a délutáni órákban gomolyfelhő képződés is társult.

Pakson 22-én a hajnali órákban gyengén felhős égbolt volt jellemző, majd az érkező hidegfront hatására délelőtt megvastagodott a felhőzet. Csapadéktevékenység nem társult a felhőtakaró átmeneti megvastagodásához. A K-i, ÉK-i szél mérsékelt maradt. A legalacsonyabb hőmérséklet $-1,8\text{ °C}$ volt, mely napközben 14 °C -ig emelkedett.

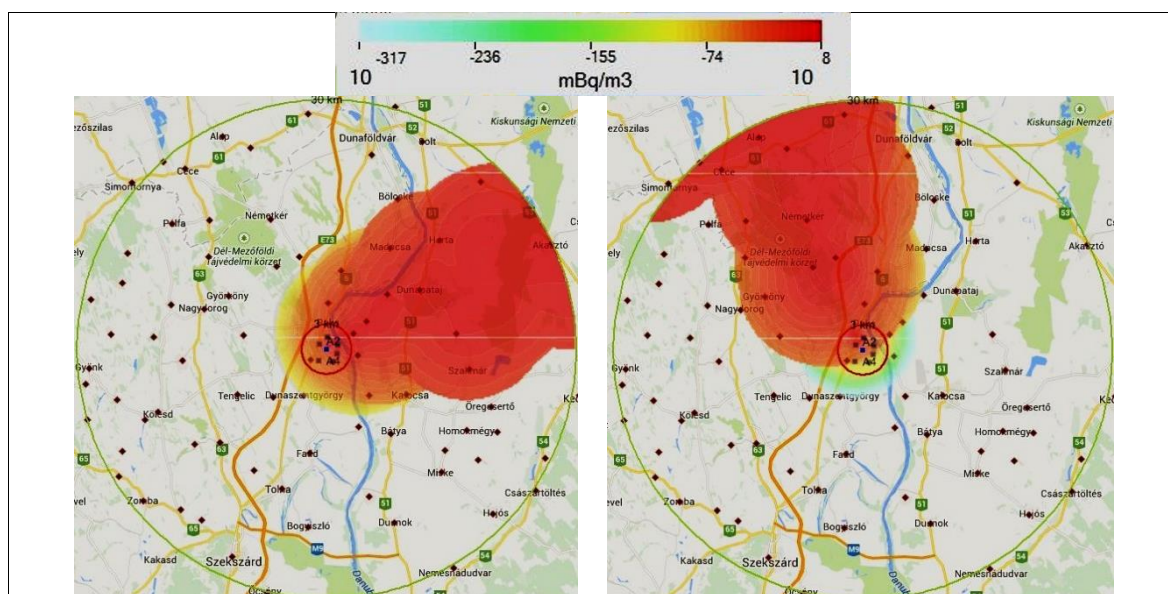
23-án derült, majd felhőtlen égbolt volt Paks térségében jellemző, melyhez gyenge keleties légmozgás párosult. Csapadék nem volt. A hőmérséklet $-3,1\text{ °C}$ és $12,9\text{ °C}$ között változott.

24-én derült, illetve gyengén fátyolfelhős volt az égbolt. Csapadék nem volt. A délies irányú légmozgás gyenge maradt a nap folyamán. A hajnali minimum hőmérséklet $-0,5\text{ °C}$ volt, míg a nappali maximum a $17,4\text{ °C}$ -os értéket vette fel.

11. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson március 22–24. időszakban

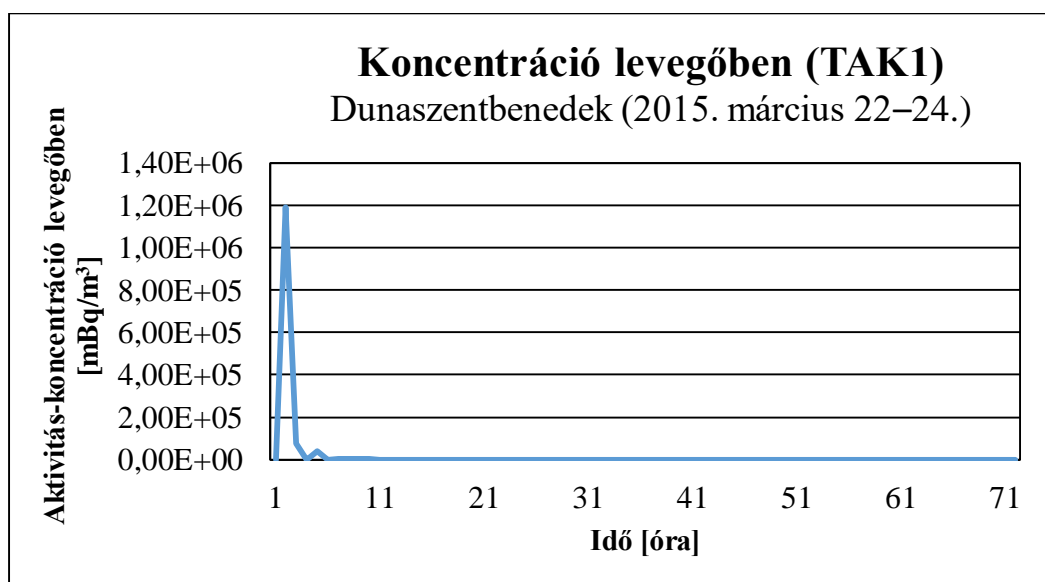
	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
<i>Március 22.</i>	$-1,8\text{ °C}$	$14,0\text{ °C}$	<i>0 mm</i>	<i>K–ÉK-i mérsékelt</i>
<i>Március 23.</i>	$-3,1\text{ °C}$	$12,9\text{ °C}$	<i>0 mm</i>	<i>K–ÉK-i gyenge</i>
<i>Március 24.</i>	$-0,5\text{ °C}$	$17,4\text{ °C}$	<i>0 mm</i>	<i>D–DK-i gyenge</i>

A bemutatott időjárási helyzetre futtatott, TAK1 üzemállapotot feltételező modell szimuláció grafikus eredménye a 24. ábrán látható.



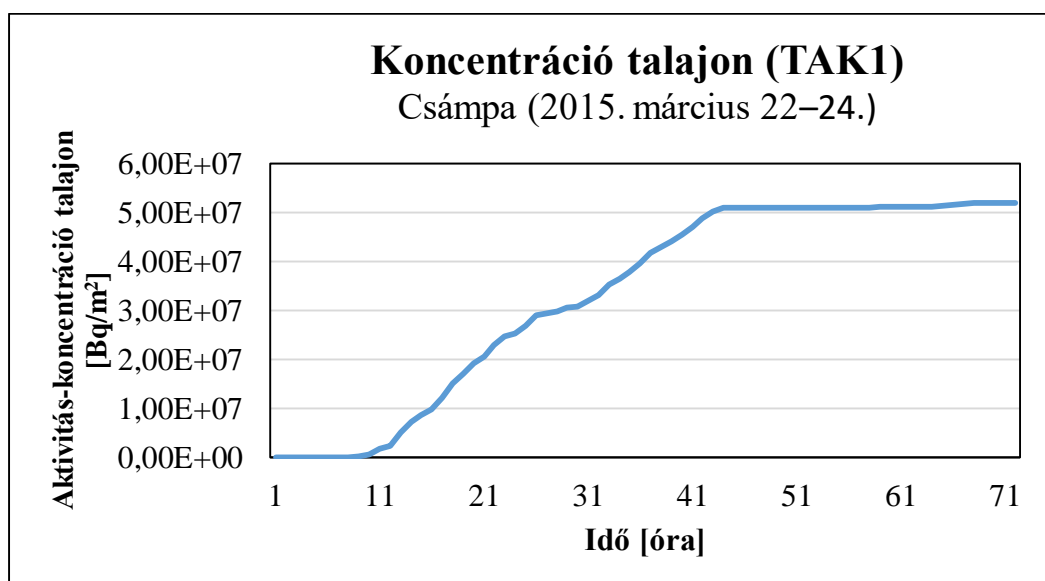
24. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemállapotra szimulált szennyezőanyag csóva a számítási időszak 3., illetve 72. órájában. A kibocsátott radioaktív felhő eleinte a telephelytől keletre fekvő településeket érintette, majd a szimuláció jelentős hányadában a csóva a dunántúli településeket érintette

A szimuláció teljes időtartama alatt a szennyezőanyag csóva tengelye nyugati, északnyugati irányba mutat, megfelelően a meteorológiai háttérmezőt jellemző széliránynak, leszámítva az első néhány órát, melyeket nyugati áramlás jellemzett. Ennek megfelelően adódott a legmagasabb levegőbeli aktivitás-koncentráció érték a telephelytől keletre fekvő Dunaszentbenedek településen (25. ábra), amely a szimulációs időszak 2. órájában jelentkezett $1,19\text{E}+06$ mBq/m^3 értékkel.



25. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [mBq/m^3] egységben. Maximális értéke $1,19\text{E}+06$ mBq/m^3 volt, amely a számítási időszak 2. órájában jelentkezett.

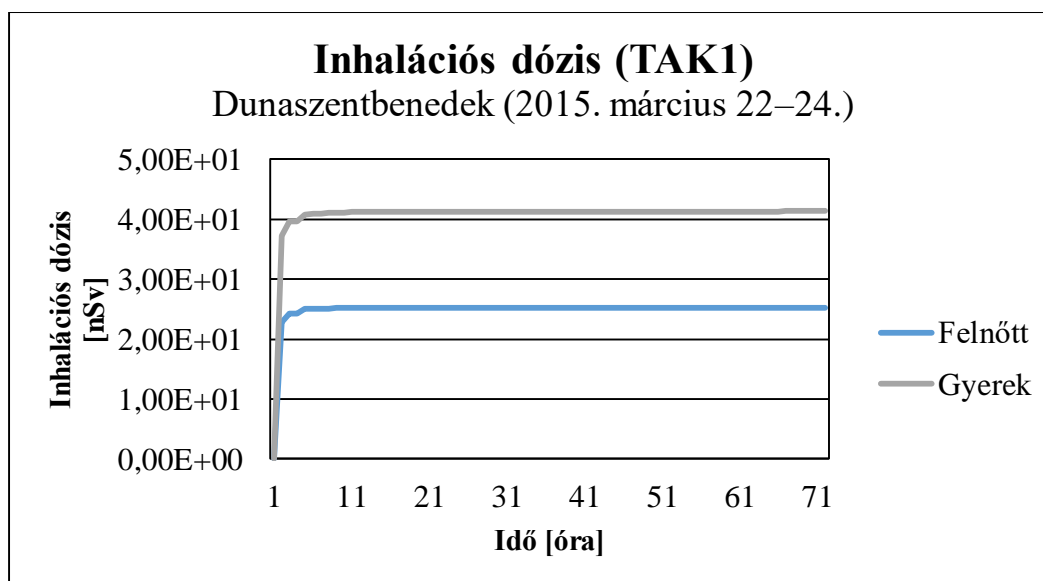
Az I^{131} aktivitás-koncentrációja talajon a 26. ábra szerint alakult.



26. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [Bq/m^2] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az $5,20\text{E}+07$ Bq/m^2 -t

Ennek értéke a vizsgálati időszak alatt Csámpa településen bizonyult a legmagasabbnak, mely a számítás 68. órájára $5,20E+07$ Bq/m²-t eredményezett. A jellemzően keleties légmozgás hatására az érték folyamatos emelkedése volt tapasztalható az időszak első felében a telephelytől nyugatra elhelyezkedő település esetén.

Az aktivitás-koncentrációból származtatott inhalációs dózis időbeli alakulása a 27. ábrán látható. Értéke az első nap reggelére elérte a maximumot, amely felnőttek esetén $2,53E+01$ nSv, míg gyerekeknél $4,13E+01$ nSv-et jelentette.



27. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a $2,53E+01$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a $4,13E+01$ nSv-et jelentette

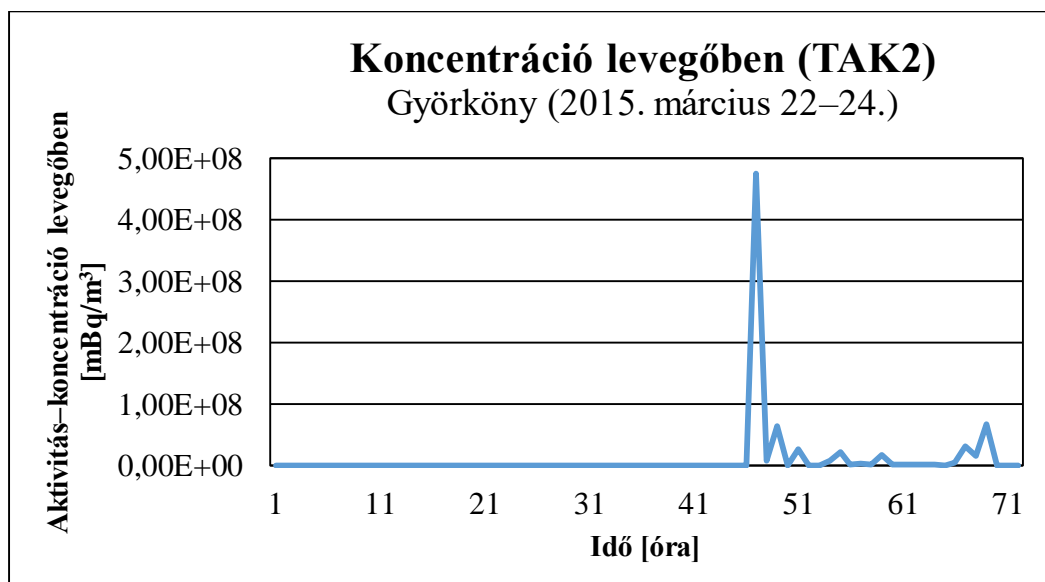
Az I¹³¹ radionuklid aktivitásából számított legmagasabb dózisértékeket tartalmazza a 12. táblázat, amelyben az összegzés után Nagykékes településre adódtak a legmagasabb értékek.

12. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK1 (2015. március 22–24.)	Dunaszentbenedek	Nagykékes	Dunapataj
Inhalációs dózis felnőttekre	$2,53E+01$	$3,05E+01$	$1,61E+01$
Inhalációs dózis gyerekekre	$4,13E+01$	$4,99E+01$	$2,62E+01$
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	$5,06E+02$	$6,12E+02$	$3,22E+02$
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	$8,22E+02$	$9,96E+02$	$5,24E+02$
Talajból eredő dózis felnőttekre	$2,30E-03$	$1,12E-03$	$1,01E-03$
Talajból eredő dózis gyerekekre	$2,30E-03$	$1,12E-03$	$1,01E-03$
Felhőből eredő dózis	$8,76E-01$	$1,06E-01$	$5,55E-02$
Teljes dózis felnőttekre	$5,31E+02$	$6,42E+02$	$3,38E+02$
Teljes dózis gyerekekre	$8,64E+02$	$1,04E+03$	$5,50E+02$

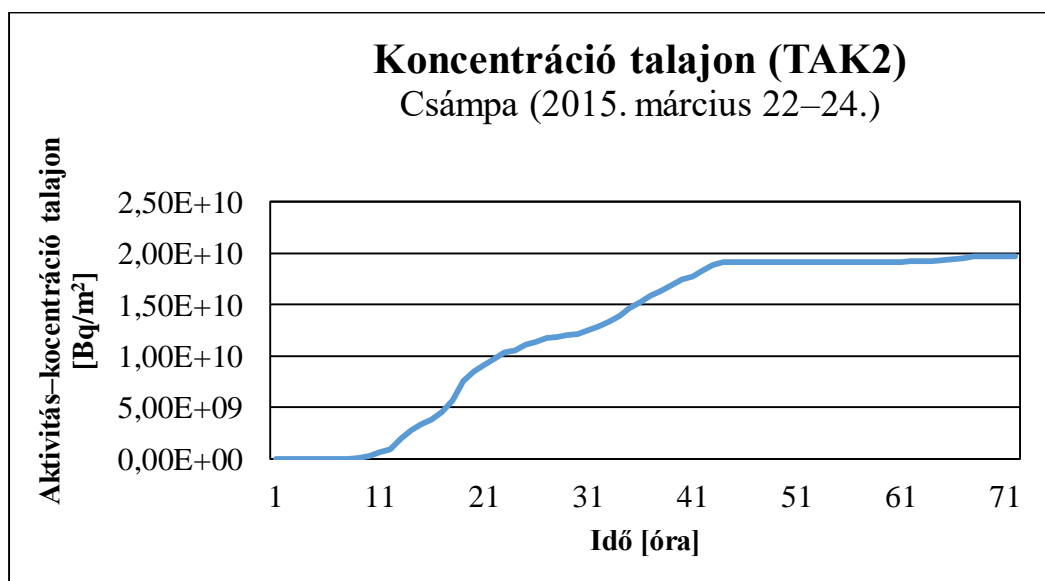
Ez felnőttek esetén $6,42E+02$ nSv teljes dózist jelentett, amely gyerekek esetén $1,04E+03$ nSv lett.

A TAK2 üzemállapot mellett zajlott modell szimuláció a keleties légáramlásnak megfelelően az erőmű telephelyétől 15 km-re, nyugatra elhelyezkedő Györköny esetében határozott meg maximális levegőbeli aktivitás-koncentrációt (28. ábra), amely a feltételezett kibocsátás kezdete utáni 47. órában jelentkezett $4,74E+08$ mBq/m³-es értékkel.



28. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Györköny településen [mBq/m³] egységben. Maximális értéke $4,74E+08$ mBq/m³, amely a számítási időszak 47. órájában jelentkezett

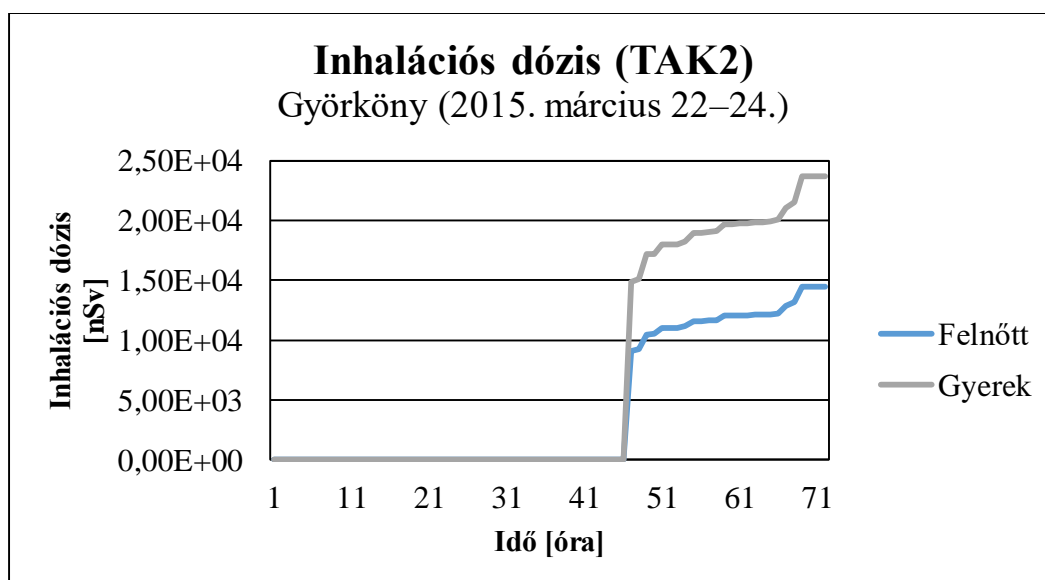
A talajon mérhető aktivitás-koncentrációt a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az $1,97E+10$ Bq/m²-t

A legmagasabb értéket Csámpa estében érte el, amely a számítás 68. órájában $1,97E+10$ Bq/m² volt. A TAK1 melletti modelleredménnyel szinkronban itt is az érték folyamatos emelkedése volt megfigyelhető az időszak első felében, amely a második nap végére megközelítette a maximumot.

Jód aktivitásból számított inhalációs dózis három nagyságrenddel magasabb értékeket eredményezett, mint a TAK1 esetében, azonban fontos megemlíteni, hogy a TAK1 alkalmazásánál telephelytől keletre fekvő Dunaszentbenedek településen adódott a legmagasabb érték, míg ebben az esetben a nyugati Györköny község nagyobb dózisokat eredményezett. Értéke felnőtt korosztályra vonatkozóan $1,45E+04$ nSv, míg gyerekekre $2,37E+04$ nSv lett (30. ábra).



30. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Györköny településen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén az $1,45E+04$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a $2,37E+04$ nSv-et jelentette

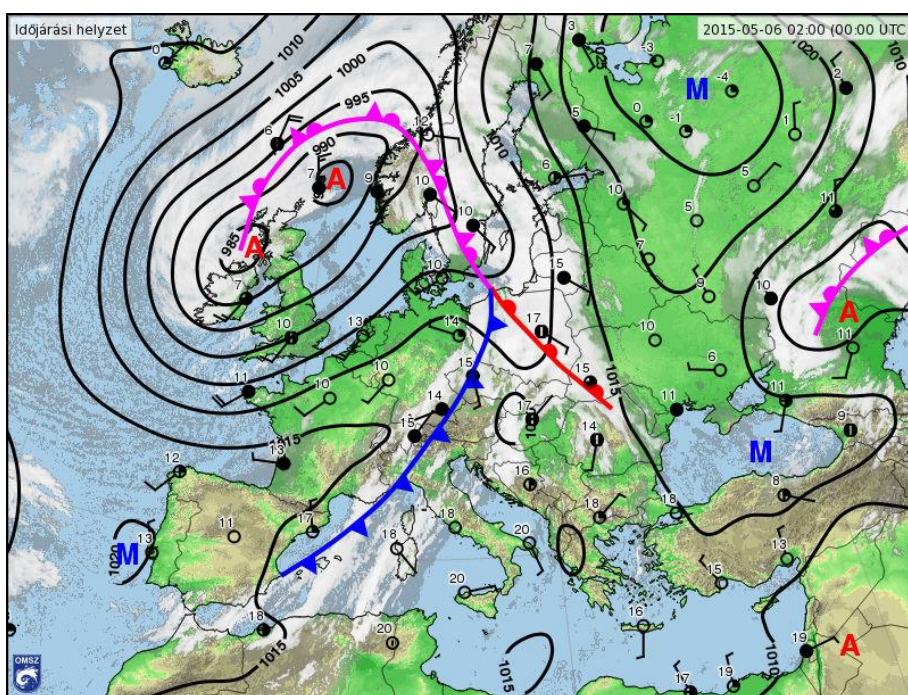
A jódkibocsátásból származtatott dózisok értékeit a következő táblázat (13. táblázat) tartalmazza. Az TAK1 szimulációval ellentétben, ahol a telephelytől keletre elhelyezkedő települések eredményeztek magas dózisokat, itt kizárólag dunántúli települések szerepelnek. Az egyes értékek összegzésével meghatározott teljes dózisok 2–3 nagyságrenddel lettek nagyobbak az előző szimuláció dózisainál. A legmagasabb eredmények Csámpa esetén születtek. Itt a felnőtt korosztályra vonatkozó teljes dózis értéke $1,12E+06$ nSv volt, míg a gyerek korosztályra $1,83E+06$ nSv-nek adódott.

13. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. március 22–24.)	Györköny	Csámpa	Géderlak
Inhalációs dózis felnőttekre	1,45E+004	5,33E+004	8,22E+003
Inhalációs dózis gyerekekre	2,37E+004	8,72E+004	1,34E+004
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	2,89E+005	1,07E+006	1,64E+005
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	4,72E+005	1,74E+006	2,68E+005
Talajból eredő dózis felnőttekre	3,55E–001	7,38E+000	1,08E+000
Talajból eredő dózis gyerekekre	3,55E–001	7,38E+000	1,08E+000
Felhóból eredő dózis	5,00E+001	1,84E+002	2,84E+001
Teljes dózis felnőttekre	3,04E+005	1,12E+006	1,72E+005
Teljes dózis gyerekekre	4,96E+005	1,83E+006	2,81E+005

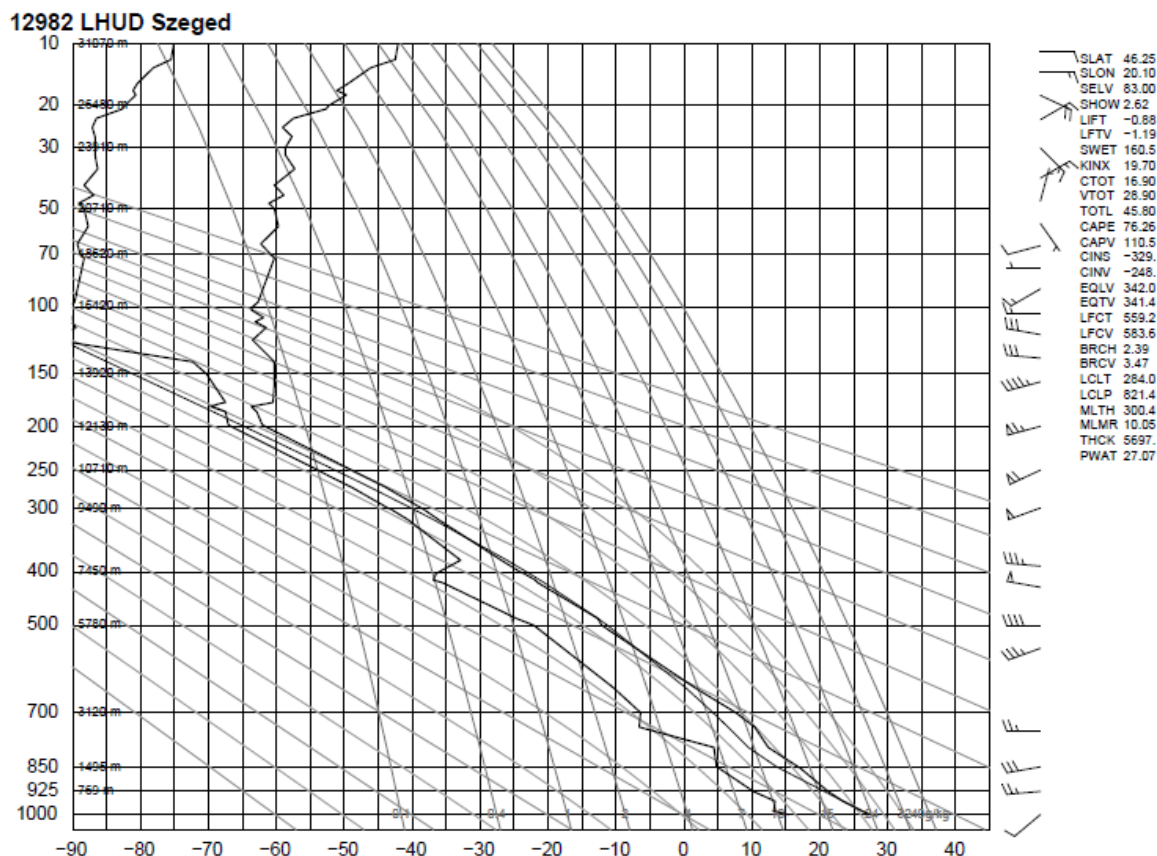
5.4. 2015. május 4–6.

Többközeppponttal rendelkező ciklonrendszer örvénylett a Brit-szigetek térségében, melynek hosszan elnyúló frontálzónája hatást gyakorolt Közép-Európa időjárására. Május 4-én egy melegfront súrolta hazánk térségét, mely mögött a magasban meleg levegő áramlott a Kárpát-medencébe. A két front között a melegszektorban (31. ábra) konvergencia vonal alakult ki 6-án a lassan mozgó hidegfront előtt, melyen több, hosszú életű zivatarcella, úgynevezett szupercella fejlődött. Ezek a cellák nagy áthelyeződési sebességgel rendelkeztek, ugyanakkor fizikai karakterisztikájuk által rövid idő alatt nagy mennyiségű csapadékot okoztak az ország több régiójában.



31. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. május 6-án. A többközepppontú ciklonrendszer hosszan elnyúló frontálzónája elérte a Kárpát-medencét (Forrás: met.hu)

A 32. ábrán a május 6-án 12 UTC időpontban történt szegedi rádiószondás mérés eredménye látható. A konvektív paraméterek nem utaltak erős labilitásra a régióban, ugyanakkor a magasban viharos szél volt jellemző, melynek következtében kialakuló szélnyírás erős triggerhatást biztosított a konvektív folyamatokra vonatkozóan. A vertikális szélnyírás a Bernoulli-törvény értelmében kialakuló szívóhatás mellett vízszintes tengelyű örvényességet is eredményezett, melyet a feláramlás függőleges irányba fordított, mely örvénylő feláramlási csatornát eredményezett az ország több pontján. Ez a folyamat vezetett a szupercellák kialakulásához.



32. ábra – A Szegedi Magaslégköri Observatórium 12 UTC-s rádiószondás mérési adataiból rajzolt emagram 2015 május 6-án. A gyenge talajszelelhez közép szinten viharos Ny-i szél kapcsolódott, mely szívóhatást, illetve horizontális örvény tengelyt eredményezett (Forrás: UWYO Soundings)

Pakson május 4-én fátyolfelhős égbolt volt jellemző, melyhez alacsony szinten kapcsolódtak kisebb gomolyok. Csapadék nem volt. A gyenge, kezdetben Ny-i szél K-i irányba fordult, azonban erőssége nem változott. A legalacsonyabb hőmérséklet 7,5 °C volt, míg a napközben 26,8 °C-os maximumot mértek.

5-én kezdetben erősen felhős égbolt volt jellemző Paks térségében, majd a délután második felétől fokozatosan csökkent a felhőzet mennyisége. Csapadék nem volt. A DNy-i szél mérsékelt maradt. A hőmérséklet reggel 11,5 °C-ig süllyedt, míg napközben 28,7 °C a legmagasabb értéke.

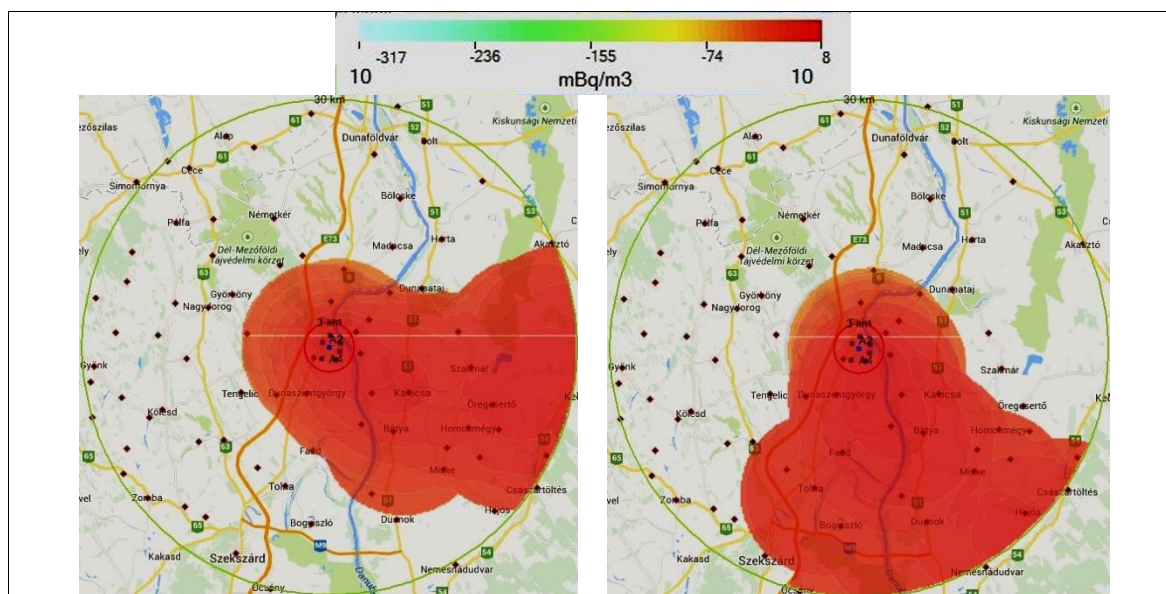
6-án kezdetben fátyolfelhős égbolt volt jellemző, majd a délutáni órákban beindult a gomolyfelhő képződés. Az esti órákban egy, a hidegfront előtti konvergencia vonalon fejlődött HP (High Precipitation) szupercella érte el a várost, melynek hatására rövid idő alatt nagy mennyiségű csapadék hullott. A záporos csapadéktevékenység mellett jégeső is kísérte a zivatarzónát, mely 16 mm-es csapadékösszeget eredményezett. Az ÉNy-i szél mérsékelt volt a nap során, átmeneti szélerősödés csupán a zivatar áthaladásakor volt

tapasztalható. A hajnali minimum hőmérséklet 14,4 °C volt, mely délután 29,1 °C-ig emelkedett.

14. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson május 4–6. időszakban (Forrás: met.hu)

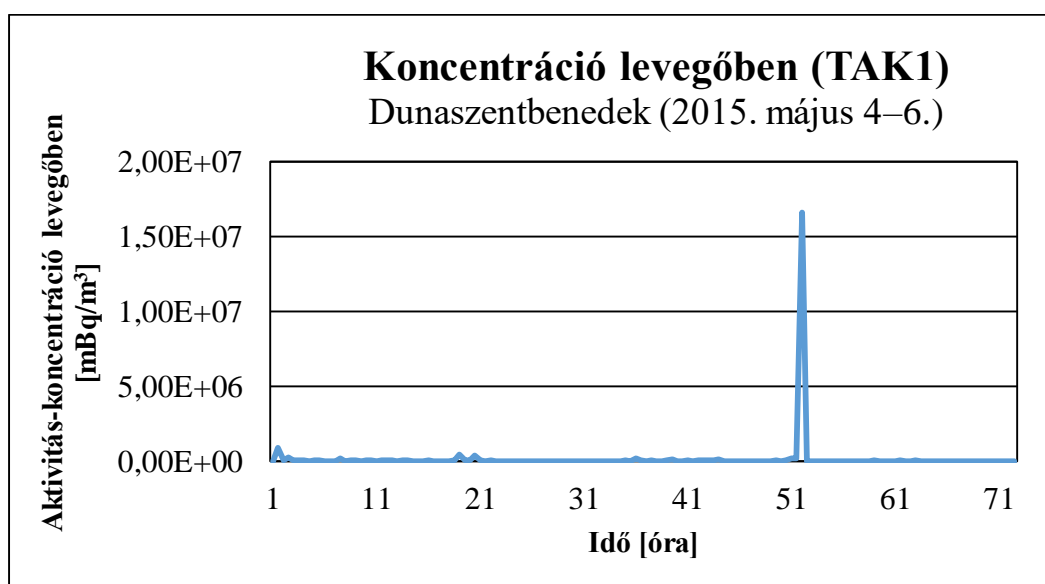
	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
<i>Május 4.</i>	7,5 °C	26,8 °C	0 mm	Ny-i, majd K-i gyenge
<i>Május 5.</i>	11,5 °C	28,7 °C	0 mm	DNy-i gyenge
<i>Május 6.</i>	14,4 °C	29,1 °C	16 mm	ÉNy-i mérsékelt

Az bemutatott meteorológiai háttérmezőre futtatott, TAK1 üzemállapotot feltételező modell szimuláció grafikus eredménye a számítás 12., illetve 58. órájában a 33. ábrán látható. A szimuláció első két napján tapasztalható nyugatias irányú szél hatására a csóva tengelye keletre mutatott, majd a hidegfront érkezésével a telephelytől délkeletre fekvő települések váltak érintetté.



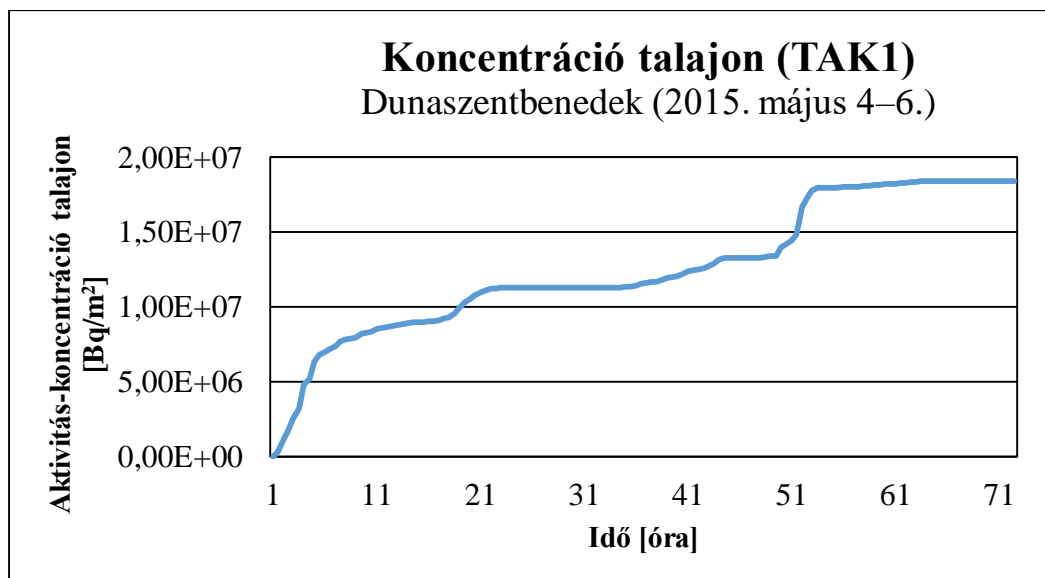
33. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemállapotra szimulált szennyezőanyag csóva a számítási időszak 12., illetve 58. órájában. A kibocsátott radioaktív felhő a vizsgált időszak első két napjában a telephelytől keletre elhelyezkedő területet érintette, majd a szimuláció utolsó napján a hidegfront áthaladása után a csóva-tengely déli irányba fordult

A kibocsátott ^{131}I radionuklid levegőben mérhető aktivitás-koncentrációjának legmagasabb értékei a telephelytől keletre, a Duna túloldalán elhelyezkedő települések esetében adódtak. A maximális koncentráció Dunaszentbenedek esetében jelentkezett a számítás 52. órájában. Ekkor a $1,66\text{E}+07$ mBq/m^3 -es értéket vette fel (34. ábra). Az időbeli meneten a durva felbontású skálázás mellett is megjelennek a szimuláció egészen magasabb, 10^4 nagyságrendű értékek. Magas értékek voltak tapasztalhatóak továbbá Géderlakon, illetve Dunapatajon is, előbbinél $2,11\text{E}+06$ mBq/m^3 , míg utóbbi esetében $1,21\text{E}+06$ mBq/m^3 volt a levegőbeli radioaktivitás maximuma.



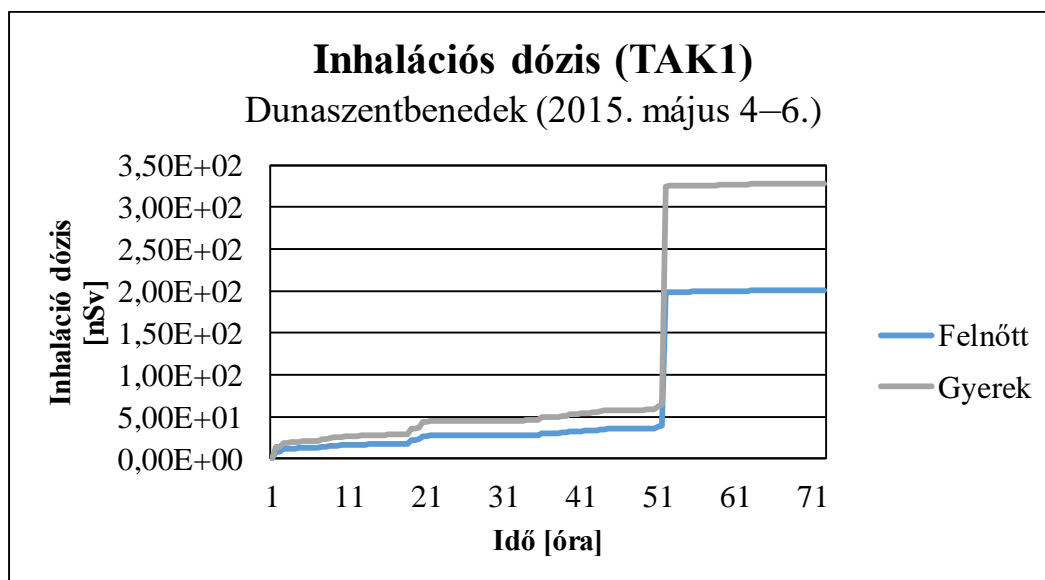
34. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [mBq/m^3] egységben. Maximális értéke $1,66\text{E}+07$ mBq/m^3 volt, amely a számítási időszak 52. órájában jelentkezett.

A talajon mérhető aktivitás-koncentráció esetén is Dunaszentbenedek településen adódott a szimuláció maximuma. Ez a 72. időlépcsőre a $1,84\text{E}+07$ Bq/m^2 értéket jelentette. Időbeli menetén megfigyelhető (35. ábra), hogy a számítási időszak alatt folyamatos emelkedés jellemezte, a maximum érték csupán annak végső stádiumban a 65. órában állt be. Ez a levegőbeli aktivitáskoncentrációnál megfigyelt, a szimuláció során folyamatosan jelentkező, 10^3 – 10^4 nagyságrendű értékek következménye, melyek a vizsgálati időszak egészét jellemezték.



35. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az 1,84E+07 Bq/m²-t

Az aktivitás-koncentrációból származtatott jód inhalációs dózisok Dunaszentbenedek településen a 36. ábra szerint alakultak. A 34. ábrán kirajzolódó maximummal összhangban az 52. óránál tapasztalható az értékek megugrása. Az időszak végére a felnőtt korosztály esetén az 2,01E+02 nSv-et, míg gyerekekre vonatkozóan a 3,28E+02 nSv-et vette fel.



36. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a szimuláció 72. órában felnőttek esetén a 2,01E+02 nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a 3,28E+02 nSv-et jelentette

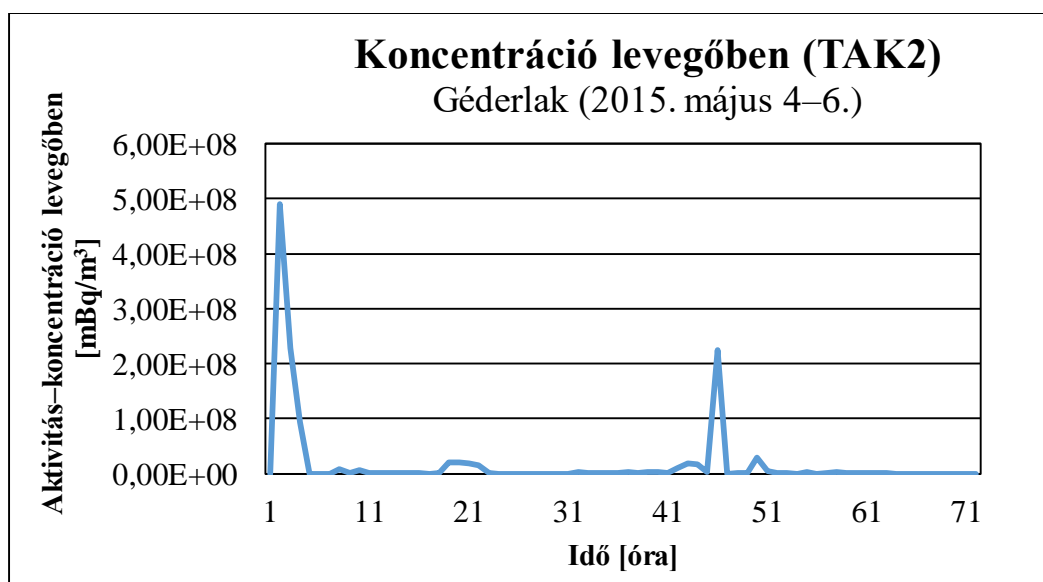
A kibocsátott jód radioaktivitásából származtatott dózisok legmagasabb értékei a Duna túloldalán, az erőmű 10 km-es környezetében elhelyezkedő települések esetén adódtak (15. táblázat). Az ezek összegéből képezett teljes dózis Dunaszentbenedek esetében volt a

legmagasabb, értékére felnőttekre vonatkozóan $4,22E+03$ nSv, míg gyerekeknél $6,84E+03$ nSv-nek adódott.

15. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

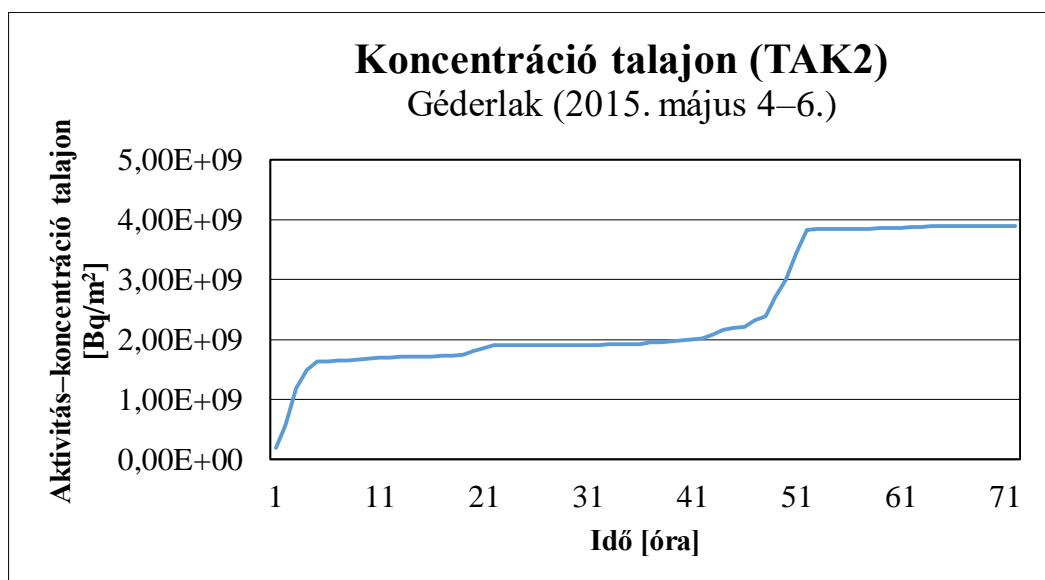
TAK1 (2015. május 4–6.)	Dunaszentbenedek	Géderlak	Dunapataj
Inhalációs dózis felnőttekre	2,00E+002	4,84E+001	3,33E+001
Inhalációs dózis gyerekekre	3,28E+002	7,92E+002	5,44E+001
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	4,01E+003	9,66E+002	6,66E+002
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	6,54E+004	1,58E+003	1,09E+003
Talajból eredő dózis felnőttekre	6,90E–003	4,30E–003	1,67E–003
Talajból eredő dózis gyerekekre	6,90E–003	4,30E–003	1,67E–003
Felhőből eredő dózis	6,96E–001	1,67E–001	1,15E–001
Teljes dózis felnőttekre	4,22E+003	1,01E+003	7,02E+002
Teljes dózis gyerekekre	6,84E+003	1,66E+003	1,14E+003

Kezdeti feltételként TAK2 üzemállapotot feltételezve az előző táblázatban felsorolt Duna menti települések esetén adódnak a legmagasabb levegőbeli aktivitás-koncentráció értékek. A maximum a 2. órában jelentkezett Géderlakon, értéke $4,91E+08$ mBq/m³ volt. A TAK1-hez hasonlóan ebben az esetben is folyamatos volt az adott település sugárterelése, a görbe időbeli menetét vizsgálva (37. ábra) a 46. óránál egy másik csúcs is jelentkezett $2,25E+08$ mBq/m³ értékkel.



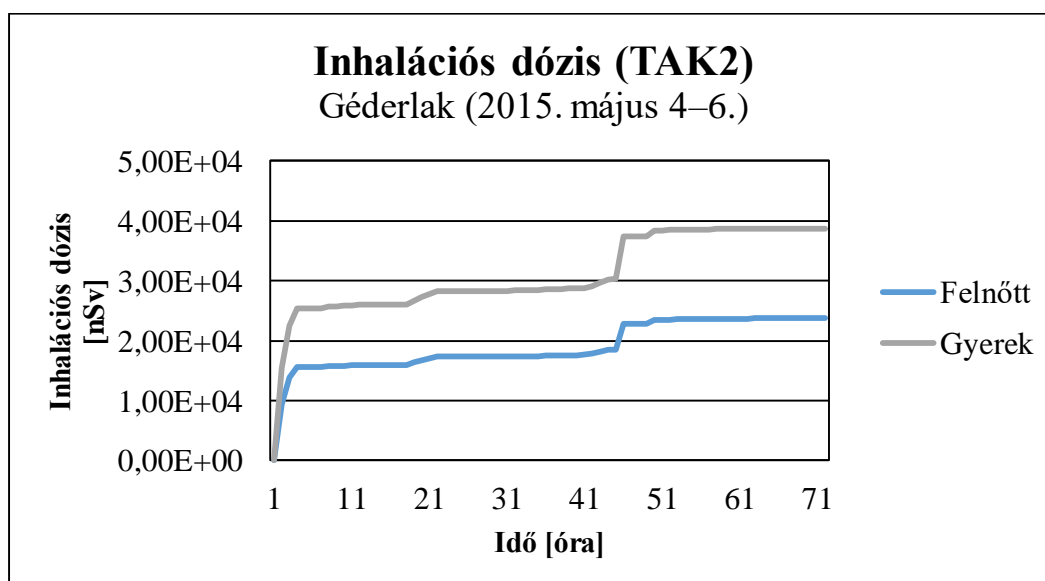
37. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Géderlakon [mBq/m³] egységben. A szimulációs időszak első két napjában a maximális értéke $4,91E+08$ mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 2. órájában jelentkezett

A talajon mérhető radioaktivitás tekintetében szintén Géderlakon adódott a szimuláció legmagasabb értéke. Az időbeli menet (38. ábra) folyamatos emelkedést mutat, amelyet meredekebb megugrások az előbb tárgyalt két maximumnál jellemeztek. A legmagasabb érték a 64. órában állt be, amely $3,89\text{E}+09$ Bq/m² volt.



38. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Géderlakon [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak 48. órájában $2,38\text{E}+09$ Bq/m² volt, mely a 72. órára elérte a $3,89\text{E}+09$ Bq/m²-t

Az ¹³¹I izotóp inhalációs dózis értéke felnőtt korosztályra vonatkozóan $2,37\text{E}+04$ nSv-et, míg gyerekek esetén $3,88\text{E}+04$ nSv-et érte el a számítási időszak végére (39. ábra).



39. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Dunaszentbenedek településen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a $2,37\text{E}+04$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a $3,88\text{E}+04$ nSv-et jelentette

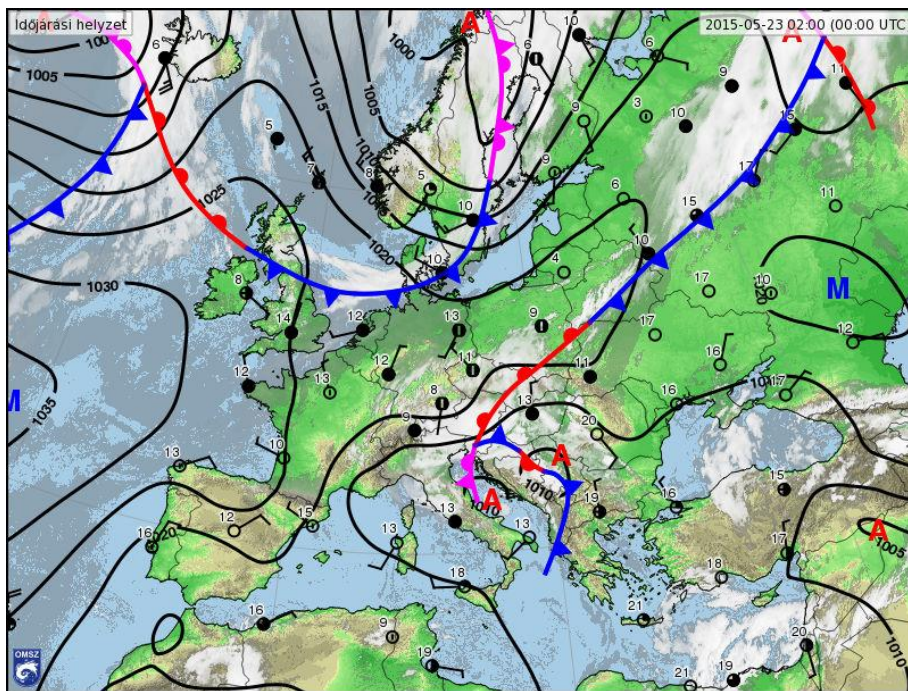
A legmagasabb dózisértékek a TAK1 szimulációval azonos településeken adódtak, azonban itt a maximumok Géderlakon jelentkeztek, ahol a teljes dózis felnőttek esetén $4,98E+05$ nSv, míg gyerek korcsoportra vonatkozóan $8,12E+05$ nSv eredményt adta (16. táblázat).

16. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. május 4–6.)	Géderlak	Dunapataj	Dunaszentbenedek
Inhalációs dózis felnőttekre	2,37E+004	1,40E+004	1,35E+004
Inhalációs dózis gyerekekre	3,88E+004	2,29E+004	2,21E+004
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	4,74E+005	2,80E+005	2,70E+005
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	7,73E+005	4,56E+005	4,40E+005
Talajból eredő dózis felnőttekre	1,46E+000	6,64E–001	2,37E+000
Talajból eredő dózis gyerekekre	1,46E+000	6,64E–001	2,37E+000
Felhőből eredő dózis	8,19E+001	4,83E+001	4,61E+001
Teljes dózis felnőttekre	4,98E+005	2,94E+005	1,84E+005
Teljes dózis gyerekekre	8,12E+005	4,79E+005	4,63E+005

5.5. 2015. május 21–23.

Egy mediterrán ciklon mélyült ki az Appennini-félsziget nyugati partjainál, melynek előoldala lassú keleti mozgással elérte a Kárpát-medence térségét (40. ábra). A ciklon egy teknő előoldalán helyezkedett el, mely közel stacionárius hullámfázisként jelentkezett. A teknőről 23-án egy hidegcsepp szakadt le, mely délnyugat felől megközelítette hazánkat. Mind a mediterrán ciklonhoz, mind a leszakadt hidegcsepphez nagy mennyiségű csapadék kapcsolódott, mely többnapos esős periódust okozott országunkban.



40. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. május 23-án. A teknőről leszakadt a magassági hidegcsepp, mely délnyugati irányból közelítette a Kárpát-medencét (Forrás: met.hu)

Pakson május 21-én borult volt az ég, majd a délutáni órákban megérkezett a mediterrán ciklon csapadékszárnyája. Ismétlődő esők, záporok voltak jellemzőek az adott napon, a lehullott csapadék mennyisége 7 mm volt. Az É-i szél gyenge, illetve mérsékelt maradt. A legalacsonyabb hőmérséklet 12,4 °C volt, míg napközben 15 °C-ig emelkedett a hőmérséklet.

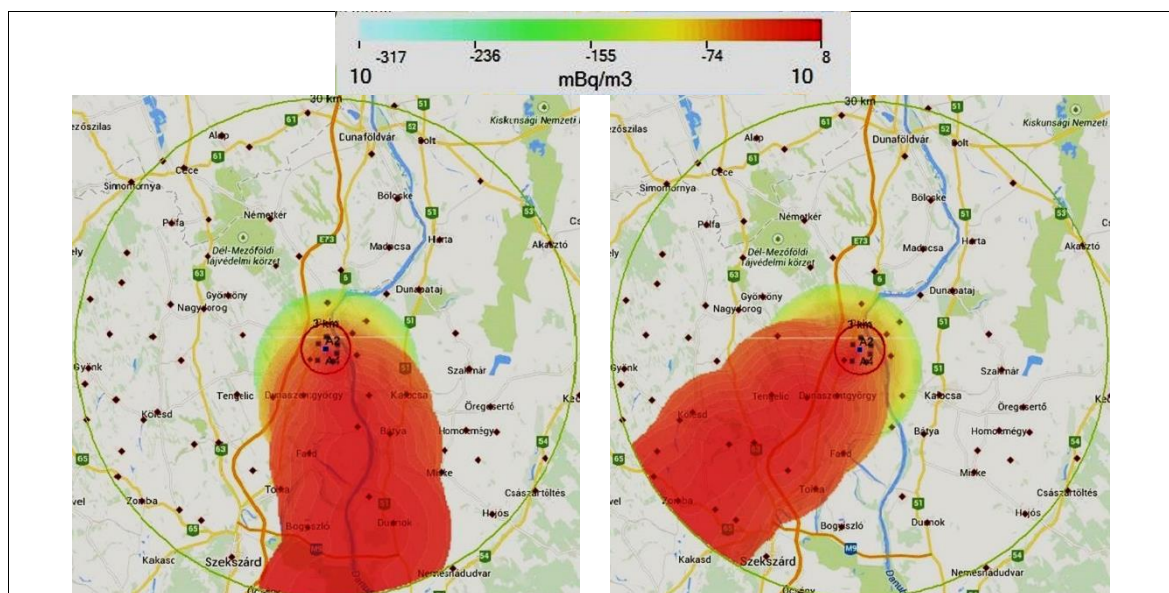
22-én borult égbolt mellett továbbra is ismétlődő eső volt jellemző. A csapadék összege a nap végére 11 mm volt. A mérsékelt ÉK-i szelet időnként élénk lökések kísérték. Hajnalra 11,4 °C-ig csökkent a levegő hőmérséklete, míg délután 15 °C volt a legmagasabb értéke.

23-án kezdetben borult volt az ég, majd a délutáni óráktól fokozatosan felszakadozott a felhőzet. Eső, illetve kisebb záporok a reggeli órákban előfordultak, majd elállt az eső, és a délután folyamán további csapadék már nem volt jellemző. A nap végén 20 mm volt a csapadék összege. Gyenge K-i légmozgás volt jellemző, majd a délután folyamán elállt a szél. A reggeli órákban 12,2 °C volt a levegő hőmérséklete, mely a délutáni órákban a 21,6 °C-os legmagasabb értéket érte el.

17. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson május 21–23. időszakban (Forrás: met.hu)

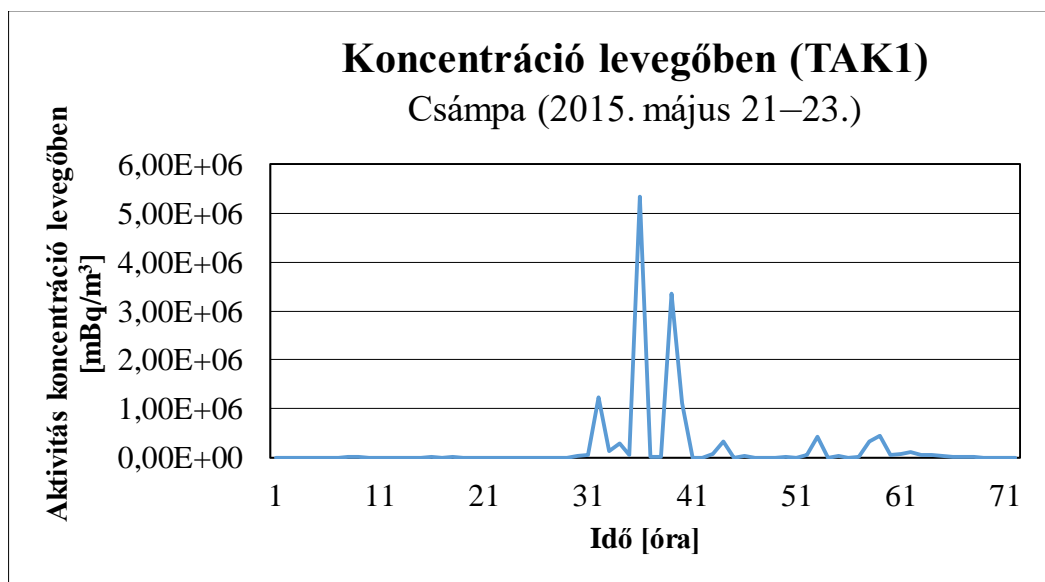
	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
<i>Május 21.</i>	12,4 °C	15,0 °C	7 mm	É-i gyenge, mérsékelt
<i>Május 22.</i>	11,4 °C	15,9 °C	11 mm	ÉK-i mérsékelt
<i>Május 23.</i>	12,2 °C	21,6 °C	20 mm	K-i gyenge

Az ismertetett időjárás helyzetre vonatkozó TAK1-es üzemmállalattal készített szimuláció grafikus szemléltetése a következő illusztráción (41. ábra) látható



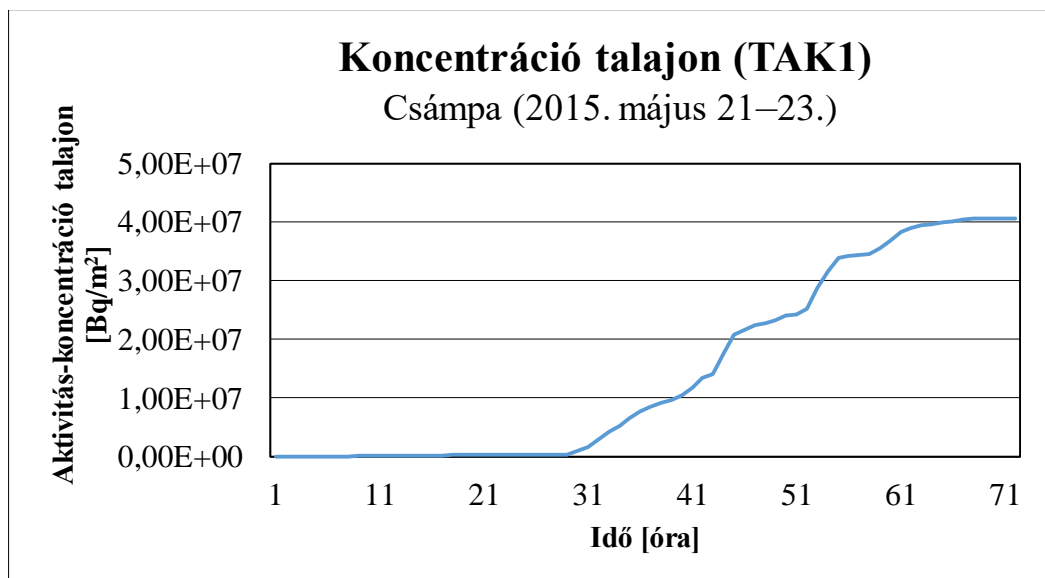
41. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemmállalatra szimulált szennyezőanyag csóva a számítási időszak 3., illetve 48. órájában. A kibocsátott radioaktív felhő a vizsgált időszakban a számítási terület déli, délnyugati felét érintette

A ^{131}I aktivitás-koncentrációja rajzolódik ki a térképeken, a szimuláció kezdetétől eltelt 3. illetve 48. órában. A ciklon előoldalát jellemző északkeleti légáramlás hatására a csóva tengelye jellemzően dél, illetve délnyugati irányt vette fel, így a legmagasabb aktivitás-koncentráció értékek a vizsgálati tartomány bal alsó negyedében jelentkeztek. Kiemelkedő értékek Csámpán voltak tapasztalhatók, melyek közül a maximum $5,33\text{E}+06 \text{ mBq/m}^3$ volt, amely a modellfutás kezdetétől számított 36. időlépcsőben jelentkezett (42. ábra).



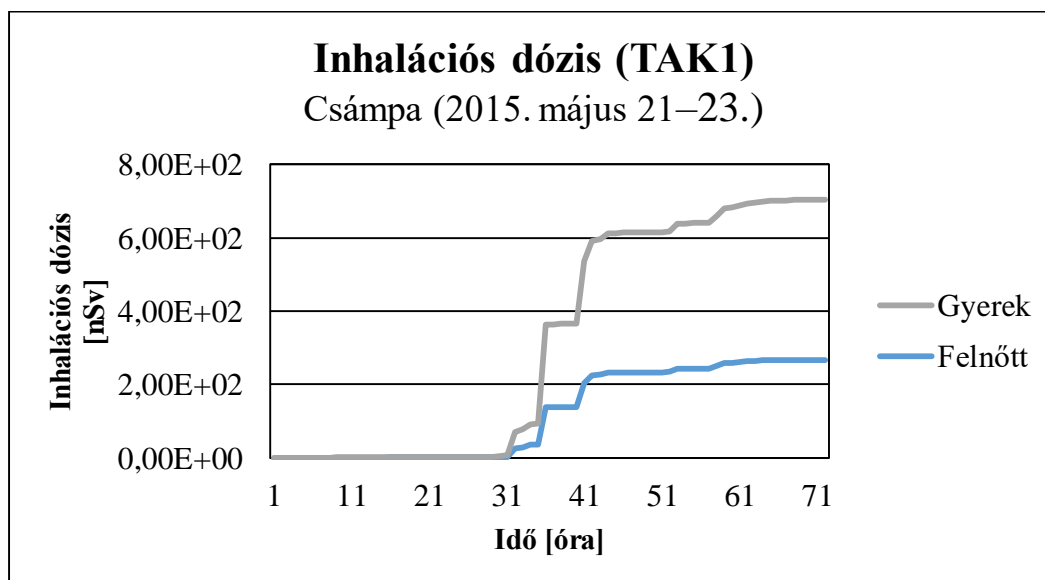
42. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [mBq/m^3] egységben. Maximális értéke $5,33\text{E}+06 \text{ mBq/m}^3$ volt, amely a számítási időszak 36. órájában jelentkezett

A talajkoncentrációs maximum szintén Csámpán jelentkezett. A szimuláció során folyamatos emelkedés jellemezte (43. ábra), melynek végére a $4,06\text{E}+07 \text{ Bq/m}^2$ -t érte el.



43. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte a 4,06E+07 Bq/m²-t.

A jóid levegőbeli aktivitás-koncentrációjából származtatott inhalációs dózis a 42. ábrán megjelenő magasabb értékek következtében a 31. órától kezdett el szignifikáns mértékben emelkedni (44. ábra). Az ezt követő folyamatos növekedés eredményeként a szimuláció végére felnőttek esetén 2,67E+02 nSv, míg gyerekekre meghatározva 4,36E+02 nSv dózis terhelés adódott.



44. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Csámpán [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a 2,67E+02 nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a 4,36E+02 nSv-et jelentette

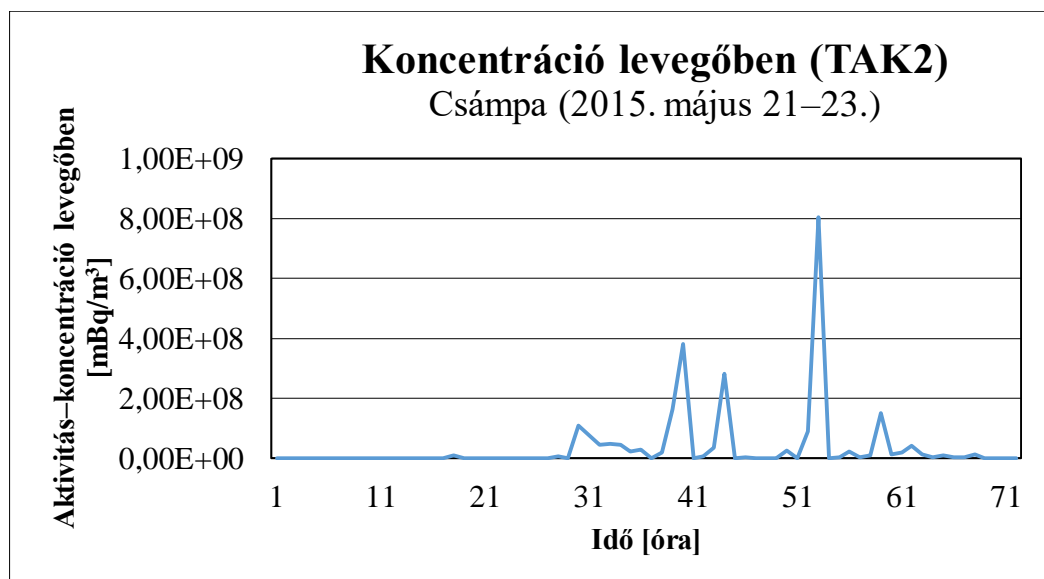
A különböző dózisértékeket meghatározva, azokból a legnagyobbakat kiválogatva Csámpa mellett a telephelytől délnyugatra elhelyezkedő Szőlőhegy, illetve a Duna partján fekvő

Gerjen esetén adódnak magas értékek, azonban ezek egy nagyságrenddel elmaradnak tőle (18. táblázat). A teljes dózisok Csámpán felnőttekre $5,60E+03$ nSv, míg gyerekekre az $9,12E+003$ nSv értéket adták.

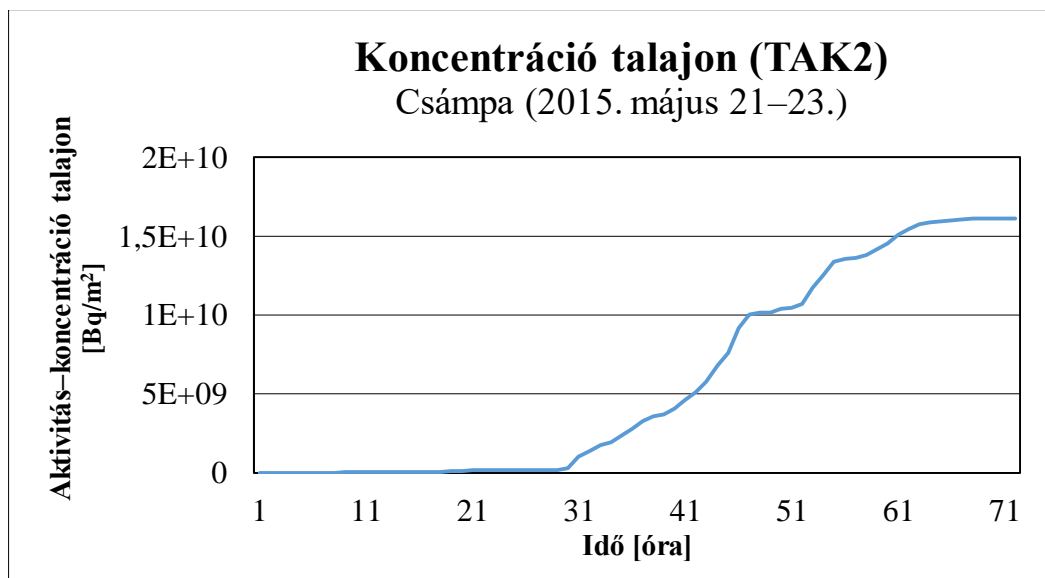
18. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK1 (2015. május 21–23.)	Csámpa	Szőlőhegy	Gerjen
Inhalációs dózis felnőttekre	2,66E+002	2,45E+001	1,12E+001
Inhalációs dózis gyerekekre	4,36E+002	4,00E+001	1,82E+001
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	5,33E+003	4,90E+002	2,23E+002
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	8,70E+003	7,98E+002	3,64E+002
Talajból eredő dózis felnőttekre	1,52E–002	1,95E–003	2,13E–003
Talajból eredő dózis gyerekekre	1,52E–002	1,95E–003	2,13E–003
Felhőből eredő dózis	9,18E–001	8,46E–002	3,85E–002
Teljes dózis felnőttekre	5,60E+003	5,14E+002	2,35E+002
Teljes dózis gyerekekre	9,12E+003	8,38E+002	3,82E+002

TAK2 kezdeti feltétel alkalmazásával szintén Csámpa községre adódtak a legmagasabb radioaktivitás értékek. Levegőben a szimuláció 53. órájában jelentkezett a $8,04E+08$ mBq/m³-es maximum (45. ábra), amely talajon a szimuláció végére az $1,61E+10$ Bq/m²-t vette fel (46. ábra).

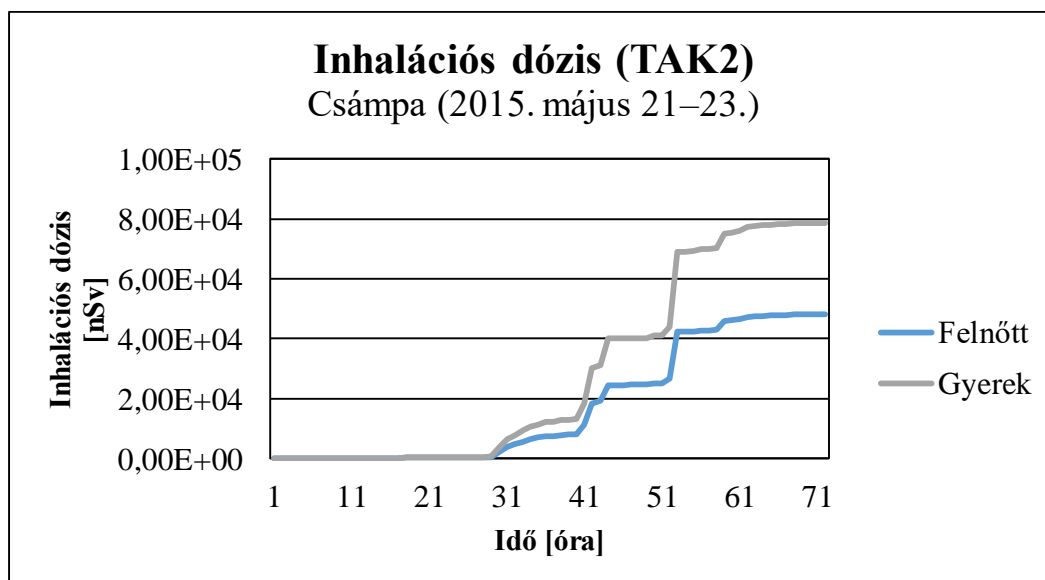


45. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [mBq/m³] egységben. Maximális értéke $8,04E+08$ mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 53. órájában jelentkezett



46. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az 1,61E+10 Bq/m²-t

A józ aktivitás-koncentrációjából származtatott inhalációs dózis időbeli menetében a TAK1-es szimulációhoz hasonlóan a 31. óránál tapasztalható szignifikáns változás (47. ábra). Az értékek felnőtt korosztály esetén 4,81E+04 nSv, míg gyerekeknél a 7,87E+04 nSv-et érték el.



47. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Csámpán [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a 4,81E+04 nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a 7,87E+04 nSv-et jelentette

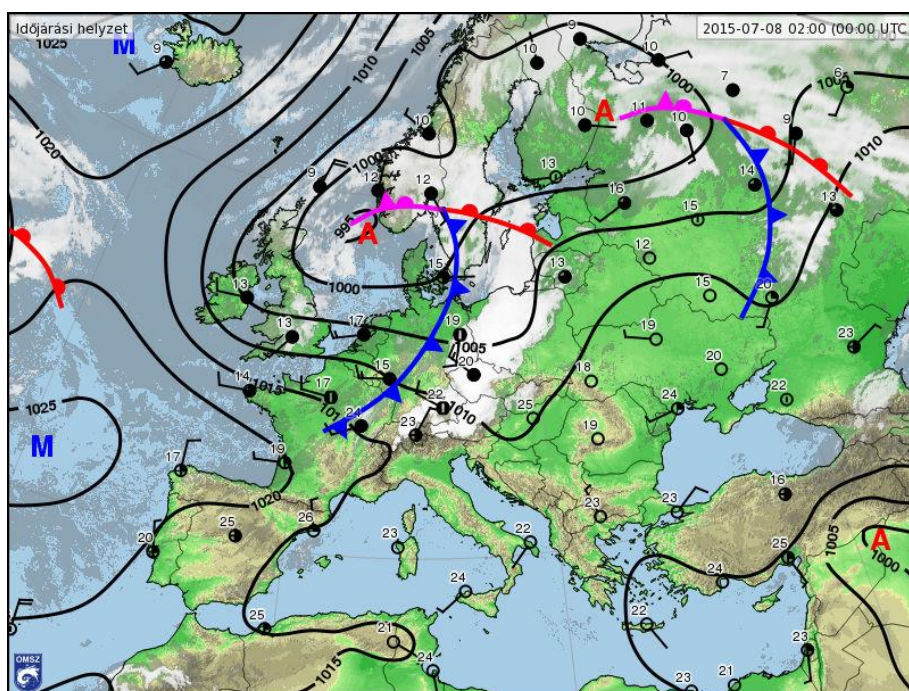
Az összegzés nyomán adódott teljes dózisosok a TAK1 szimulációnál két nagyságrenddel nagyobb értékeket eredményeztek (19. táblázat). Csámpa esetében a felnőtt korosztályra 1,01E+06 nSv, míg a gyerek korosztályra 1,65E+06 nSv került meghatározásra.

19. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. május 21–23.)	Csámpa	Gerjen	Szedres
Inhalációs dózis felnőttekre	4,81E+004	7,90E+003	3,36E+003
Inhalációs dózis gyerekekre	7,87E+004	1,29E+004	5,50E+003
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	9,63E+005	1,58E+005	1,10E+004
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	1,57E+006	2,58E+005	6,73E+004
Talajból eredő dózis felnőttekre	6,05E+000	7,18E–001	3,33E–001
Talajból eredő dózis gyerekekre	6,05E+000	7,18E–001	3,33E–001
Felhóból eredő dózis	1,66E+002	2,73E+001	1,16E+001
Teljes dózis felnőttekre	1,01E+006	1,66E+005	1,65E+004
Teljes dózis gyerekekre	1,65E+006	2,71E+005	7,07E+004

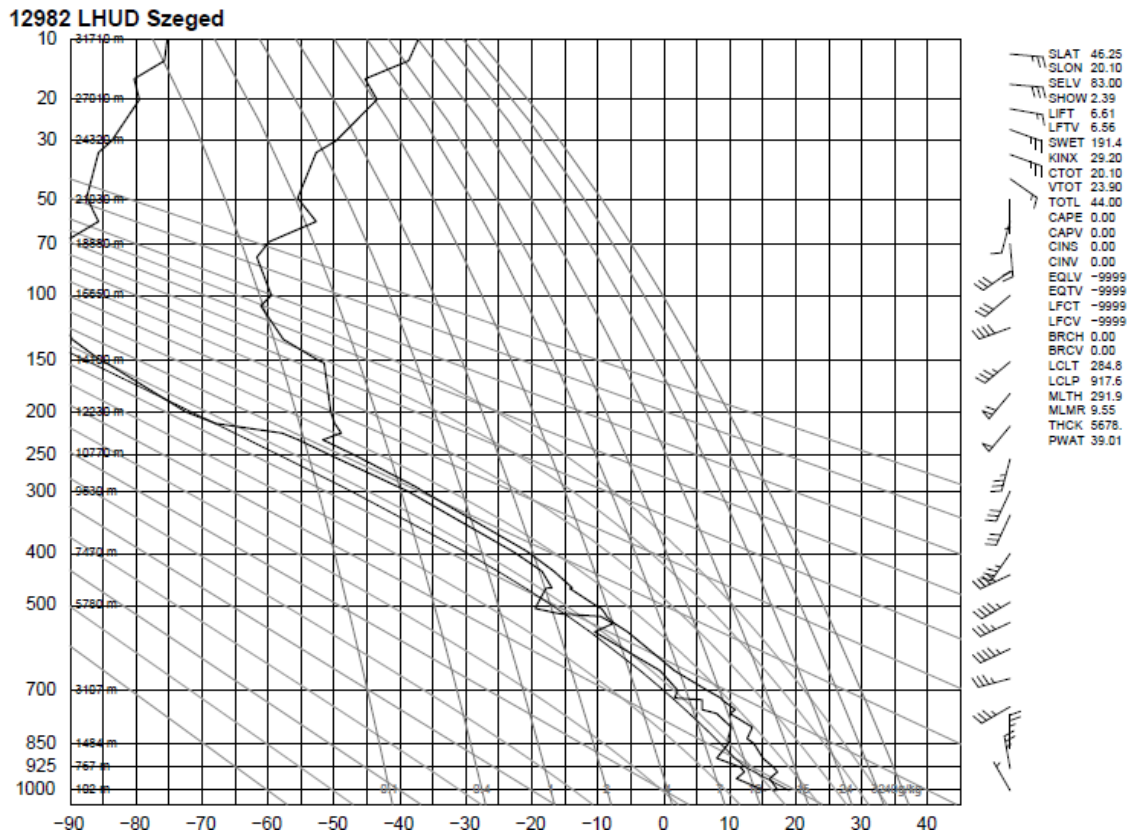
5.6. 2015. július 8–10.

Július 8. egy nyári hőhullám periódus utolsó napja volt a Kárpát-medencében, mely többfelé eredményezett 35 °C-ot meghaladó nappali maximumokat. A hőséget okozó anticiklon fokozatosan kelet felé tolódott, és nyugatról egy erős hidegfront közelítette hazánk térségét, melynek előterében ismétlődő zivatarok képződtek, amelyek átvonulása után a hátoldalon megerősödött az ÉNy-i szél. A posztfrentális helyzetben 9-én és 10-én gyenge záporok előfordultak az országban, azonban ezek nagy mennyiségű csapadékkal nem jártak. 10-én fokozatosan mérséklődött az ÉNy-i légmozgás.



48. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. július 8-án. Az érkező hidegfront felhőzete 00 UTC időpontban Ausztria, Csehország és Lengyelország felett húzódik, hazánkban az elvonuló anticiklon hatására még derült égbolt jellemző. (Forrás: met.hu)

A 49. ábrán a július 9-én 00 UTC időpontban történt szegedi rádiószondás felszállás profilja látható. A hidegfront nyomán a légkör telített volt, ugyanakkor ebben az időpontban a konvektív paraméterek nem rendelkeztek magas értékekkel. A profilon ugyanakkor látszik, hogy a gyenge ÉNy-i talajszélhez középszinten viharos szél kapcsolódik, melyben egy erős szélirány-változás is tapasztalható. Ez a hidegfront felett átfújó Poláris Jet, illetve a meleg nedves szállítószalag (MNSZ) együttes jelenlétére utalhat, melyek erős konvektív helyzetet eredményezhetnek a szélnyírás által, illetve a MNSZ-hez kapcsolódó nagy nedvességtartalmú levegő végett.



**49. ábra – A Szegedi Magaslégköri Observatórium 00 UTC-s rádiószondás mérési adataiból rajzolt emagram 2015 július 9-én. A hidegfront felett átfújó Jet erős szélnyírást eredményez, mely többlethatást képez a konvekcióra vonatkozóan
(Forrás: UWYO Soundings)**

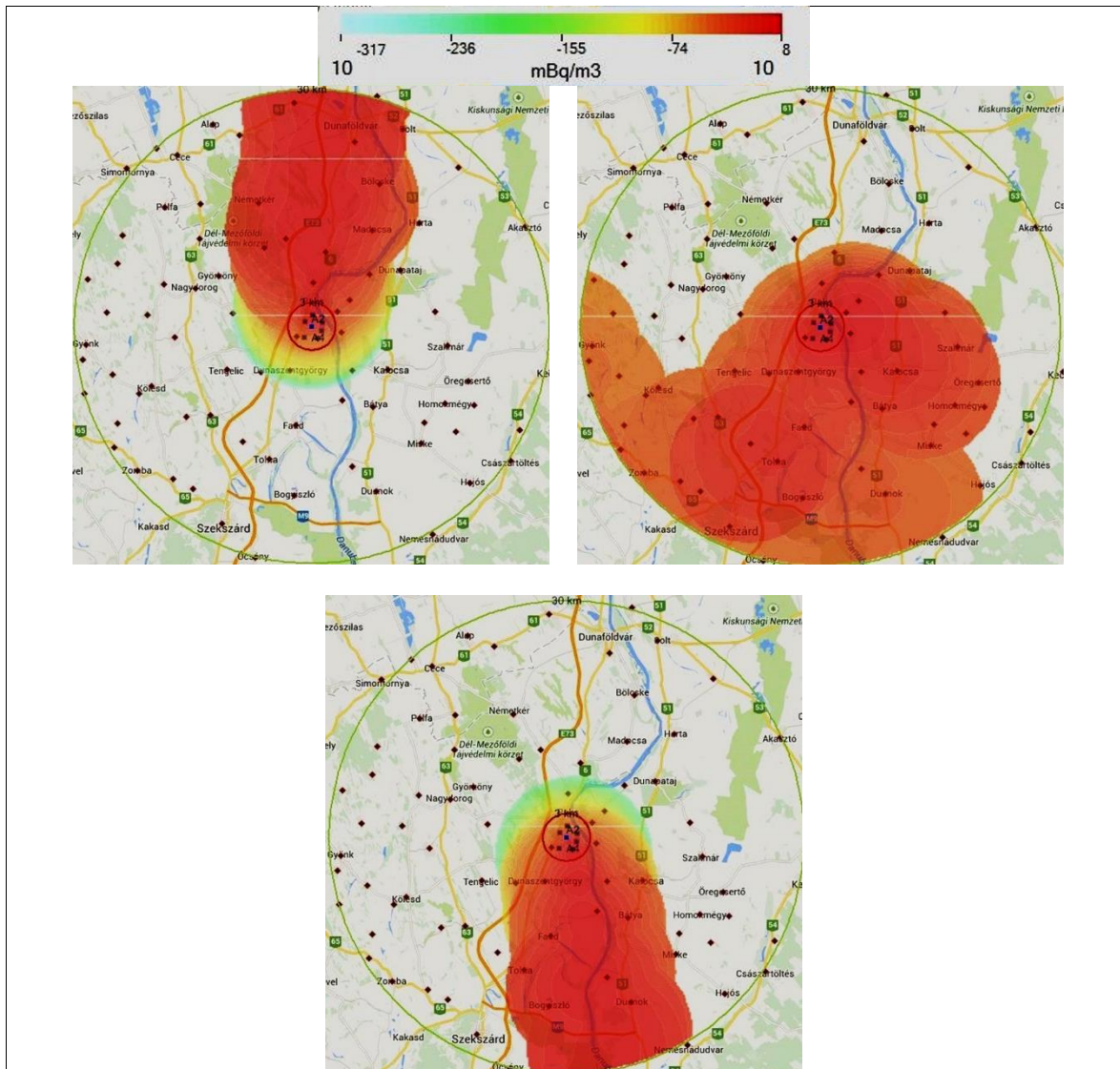
Pakson 8-án kezdetben derült égbolt volt jellemző, majd a délután folyamán nyugat felől fokozatosan megnövekedett a felhőzet. Ismétlődő zivatarok alakultak ki, amelyek rövid idő alatt nagy mennyiségű csapadékot okoztak, melynek összege a nap végére 8 mm volt. A szél ÉNy-i irányba fordult és megerősödött, a város felett átvonuló zivatarok környezetében viharos lökések is előfordultak. A legalacsonyabb hőmérséklet 17,8 °C, a legmagasabb mért érték 36,6 °C volt.

9-én változóan felhős volt az égbolt, kisebb záporok előfordultak a nap folyamán, melyek csupán 0,2 mm-nyi csapadékot okoztak. A Ny-i, ÉNy-i szél mérsékelt maradt. A reggeli minimum 16,9 °C volt, míg a délután folyamán 23,3 °C-ig emelkedett a hőmérséklet.

10-én közepesen felhős volt az ég, majd estétől csökkent a felhőzet mennyisége. Csapadék nem volt. Gyenge nyugatias légmozgás volt jellemző, majd késő délután elállt a szél. A hajnali órákban 13,4 °C-ig süllyedt a levegő hőmérséklete, míg napközben 24,7 °C-os maximum értéket ért el.

20. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson július 8–10. időszakban (Forrás: met.hu)

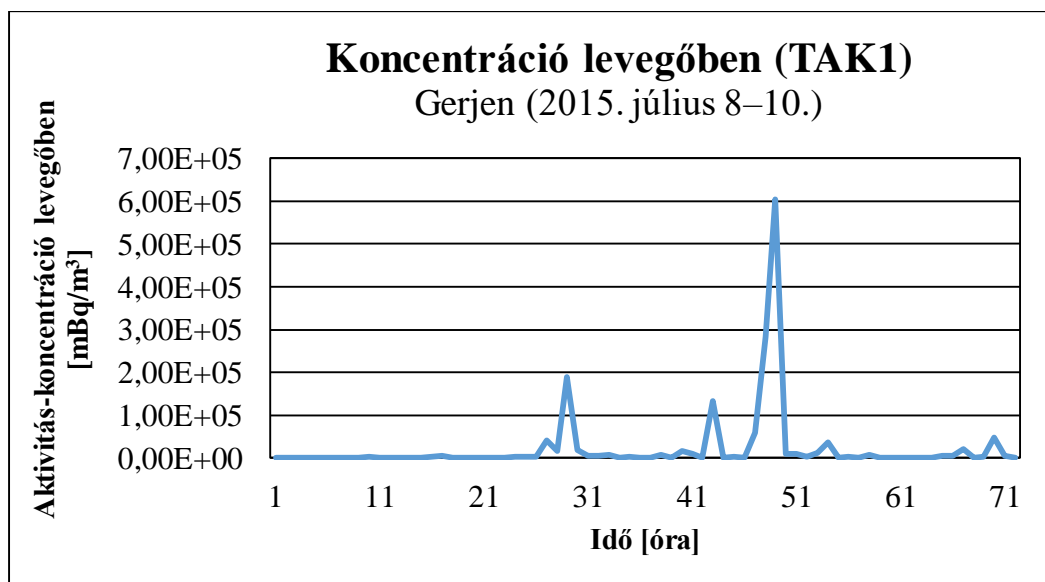
	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
Július 8.	17,8 °C	36,6 °C	8 mm	ÉNy-i élénk, erős
Július 9.	16,9 °C	23,3 °C	0,2 mm	Ny-i, ÉNy-i mérsékelt
Július 10.	13,4 °C	24,7 °C	0 mm	Ny-i gyenge



50. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemállapotra szimulált szennyezőanyag csóva a számítási időszak 6., 16., illetve 48. órájában. A hidegfront előterében mérsékelt délies áramlás volt jellemző, majd annak átvonulása után megerősödő ÉNy-i szél a kezdetben északi irányú csóva déli pozícióba fordulását eredményezte. A szimuláció időtartama alatt ez a délies irány volt domináns.

Az 50. ábrán a júliusi időjárási helyzetre vonatkozó TAK1-es üzemállapottal készített szimuláció grafikus szemléltetése látható, melyen a ^{131}I aktivitás-koncentrációja rajzolódik ki a térképeken, a szimuláció kezdetétől eltelt 6., 16. illetve 48. órában. A bal felső térképen a szennyezőanyag felhő északi irányba terjed, ugyanis ebben az időszakban a front előtt erős délies áramlás volt jellemző. A hidegfront a szimuláció 16. órájában érkezett meg, melynek hatására a jobb felső térképen a szennyezőanyag-csóva irányának módosulása látható. A vizsgálati időszak további részében jellemző ÉNy-i légáramlás hatására a kibocsátott radioaktív felhő a telephelytől dél, délkeleti irányban elhelyezkedő településeket érintette.

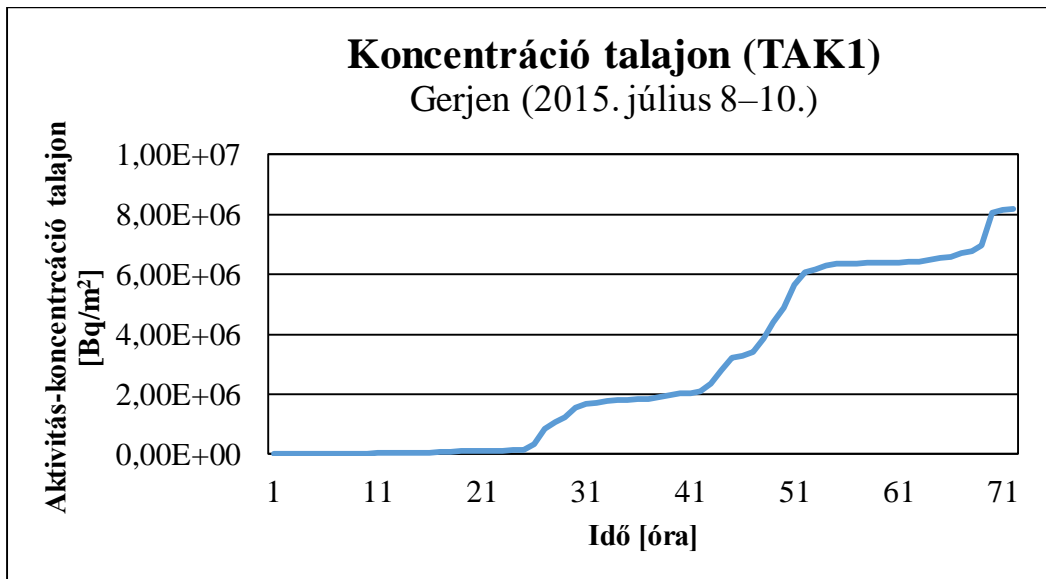
A vizsgálati időszakban uralkodó posztfrontális helyzetnek megfelelően a legmagasabb aktivitás-koncentráció értékek a vizsgált tartomány déli felében elhelyezkedő települések esetén adódtak. A maximális levegőbeli aktivitás-koncentráció a Duna jobb partján fekvő Gerjen esetében adódott. Ennek értéke $6,05\text{E}+05$ mBq/m^3 volt, amely a szimuláció 49. órájában jelentkezett. A levegő radioaktivitásának időbeli változásait vizsgálva több magas érték is kirajzolódik az 51. ábrán, amelyek a 10^5 -es nagyságrendet is elérik. Ezek rendre a szimuláció második, illetve harmadik napján jelentkeztek, a szél ÉNy-i irányba fordulásának következményeként.



51. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Gerjen településen [mBq/m^3] egységben. Maximális értéke $6,05\text{E}+05$ mBq/m^3 volt, amely a számítási időszak 49. órájában jelentkezett

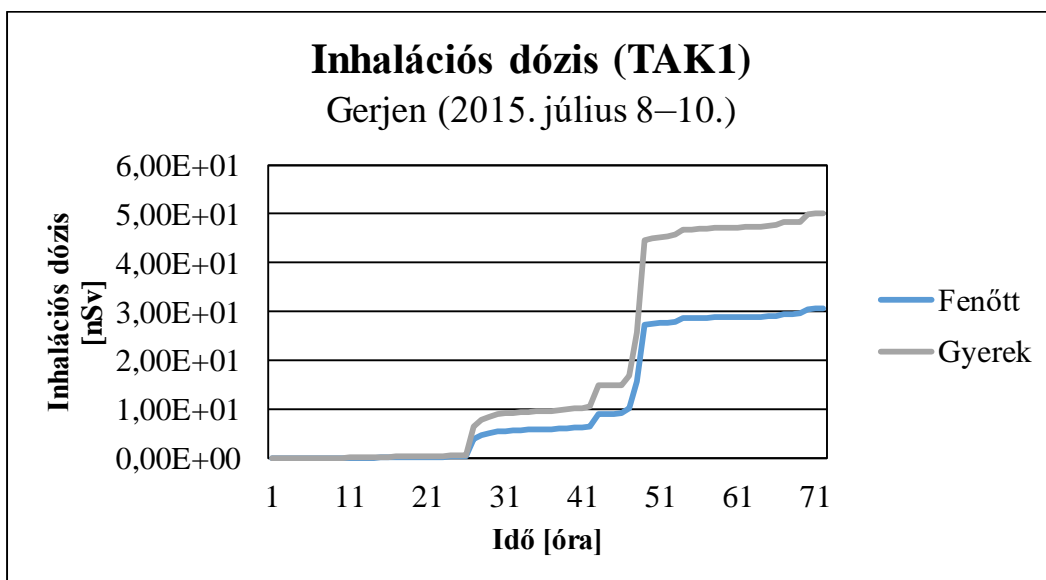
A talajon szintén Gerjen esetében adódott a legmagasabb érték. A görbe időbeli alakulását vizsgálva megállapítható, hogy mérhető értékek a 16. órától kezdődően

jelentkeztek, melyet a talaj aktivitás-koncentrációjának markáns emelkedése követett (52. ábra). A szimuláció végére $8,19\text{E}+06$ Bq/m²-es érték adódott.



52. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Gerjen településen [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte a $8,19\text{E}+06$ Bq/m²-t

A jó inhalációból származó dózis Gerjenben az előbb ismertetett aktivitás-koncentrációk időbeli menetének megfelelően markáns ugrást szenvedett a front átvonulása után. Értéke a szimuláció végére az $3,06\text{E}+01$ nSv-et érte el felnőtt korosztályra vonatkozóan. Ugyanez gyerekek esetén $5,00\text{E}+01$ nSv-es érték volt.



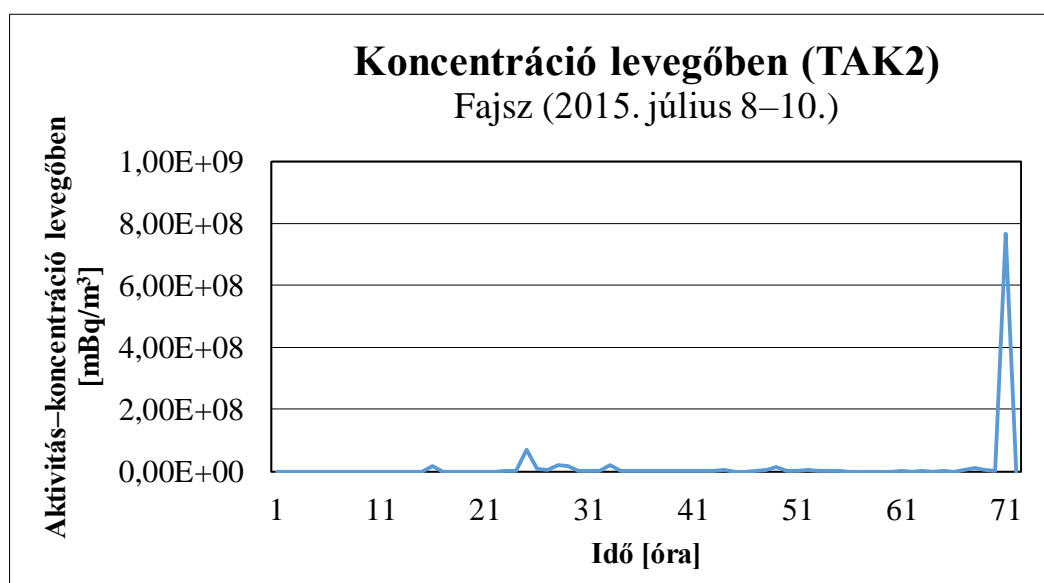
53. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Gerjen településen [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a $3,06\text{E}+01$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan az $5,00\text{E}+01$ nSv-et jelentette

A koncentráció értékekhez hasonlóan a dózisosk esetén is a frontátvonulás utáni időszakban érintett települések esetén adódtak a legnagyobb értékek (21. táblázat). A teljes dózisosk Gerjen estében voltak a legmagasabbak, felnőttekre $6,42E+02$ nSv, míg gyerekekre $1,04E+03$ nSv-es eredmény született.

21. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisosk, illetve az azok összegét képező teljes dózisosk felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

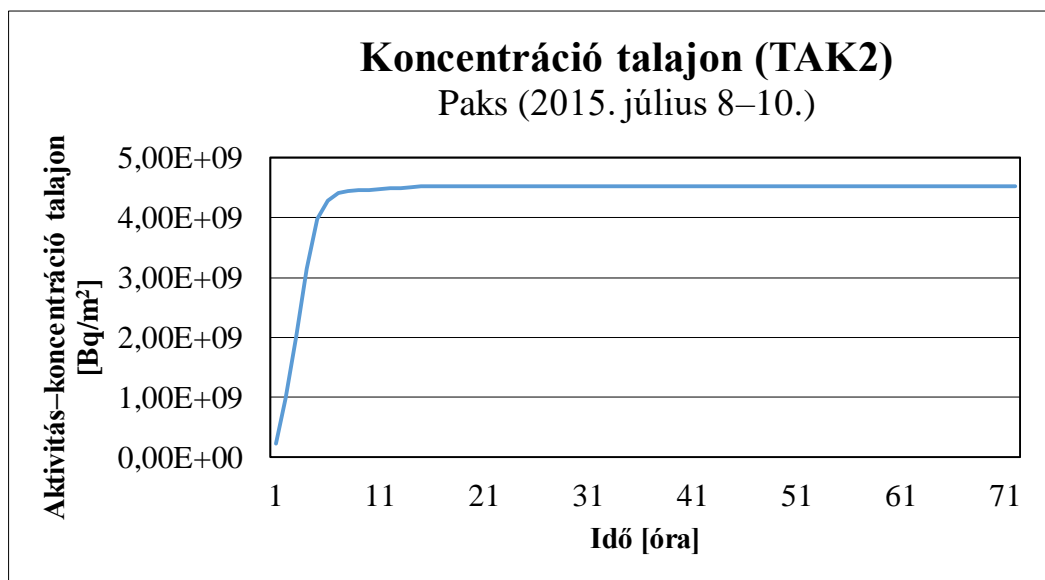
TAK1 (2015. július 8–10.)	Gerjen	Fajsz	Fadd
Inhalációs dózisosk felnőttekre	3,06E+001	1,67E+001	9,84E+000
Inhalációs dózisosk gyerekekre	5,00E+001	2,72E+001	1,61E+001
Pajzsmirigy dózisosk felnőttekre	6,12E+002	3,33E+002	1,97E+002
Pajzsmirigy dózisosk gyerekekre	9,96E+002	5,43E+002	3,22E+002
Talajból eredő dózisosk felnőttekre	3,07E–003	2,55E–003	1,00E–003
Talajból eredő dózisosk gyerekekre	3,07E–003	2,55E–003	1,00E–003
Felhőből eredő dózisosk	1,06E–001	5,75E–002	3,41E–002
Teljes dózisosk felnőttekre	6,42E+002	3,50E+002	2,07E+002
Teljes dózisosk gyerekekre	1,04E+003	5,71E+002	3,38E+002

TAK2 üzemmállapot alkalmazásával a levegőben mérhető aktivitás-koncentráció maximuma az erőműtől körülbelül 20 km-es távolságra, délre, a Duna bal partján elhelyezkedő Fajsz estén volt tapasztalható (54. ábra). A hidegfront átvonulása után több 10^7 nagyságrendű érték volt jellemző, azonban a maximum a szimuláció utolsó előtti időlépésében jelentkezett, $7,68E+08$ mBq/m³-el.



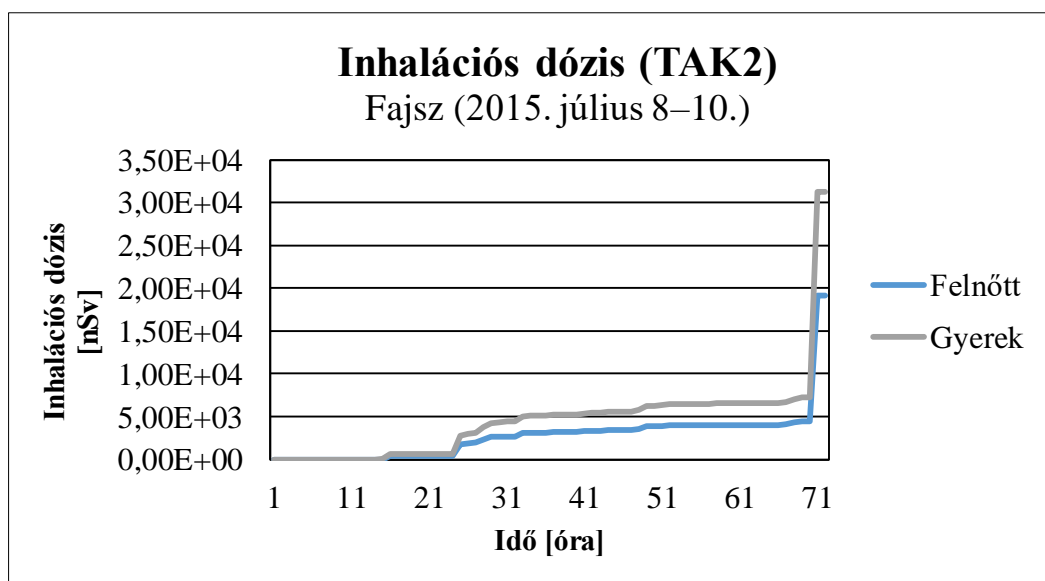
54. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Fajszon [mBq/m³] egységben. Maximális értéke $7,68E+08$ mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 71. órájában jelentkezett

A TAK1 szimulációval ellentétben a ^{131}I izotóp talajon mérhető aktivitás-koncentrációja a telephely északi szomszédságában található Pakson volt a legmagasabb. Itt a maximális érték már a hidegfront előtti 15. órában beállt, a turbulencia által támogatott száraz ülepedés következményeként, $4,53\text{E}+09 \text{ Bq/m}^2$ értékkel.



55. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Pakson [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte a $4,53\text{E}+09 \text{ Bq/m}^2$ -t

Az inhalációs dózis a 16. időlépéstől eredményezett mérhető eredményeket Fajszon (56. ábra), amely a szimuláció végére markáns emelkedéssel a felnőtt korosztály esetén $1,92\text{E}+04 \text{ nSv}$ -et érte el, míg gyerek korosztály esetében a $3,11\text{E}+04 \text{ nSv}$ -et jelentette.



56. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Fajszon [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén az $1,92\text{E}+04 \text{ nSv}$ -et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a $3,11\text{E}+04 \text{ nSv}$ -et jelentette

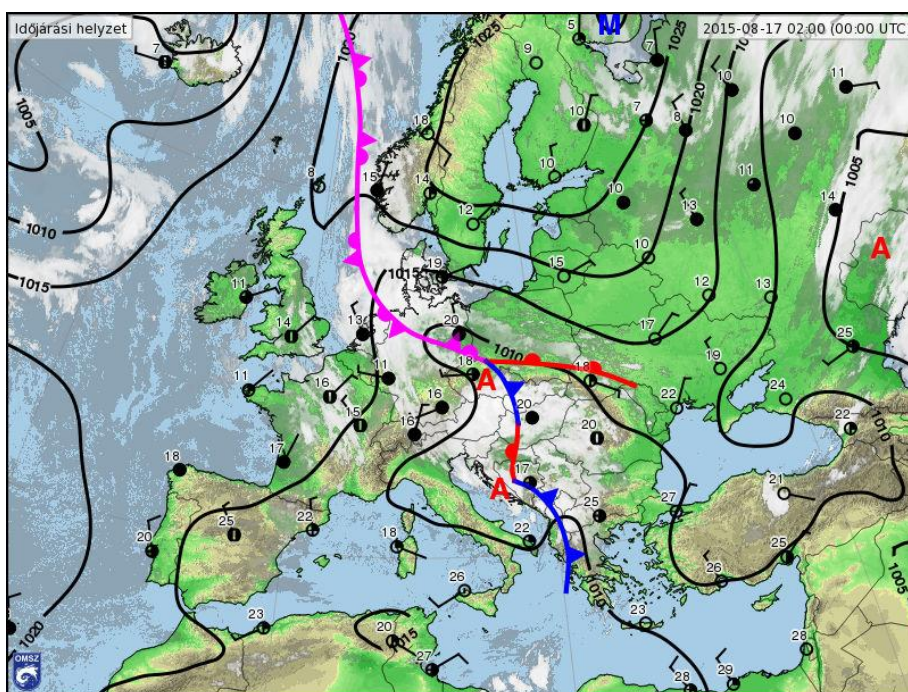
A legmagasabb dózisok TAK2 estében Fajsz mellett Pakson, illetve Dunakömlődön adódtak (22. táblázat). Utóbbi két település a front előtti déli áramlás következtében szenvedett erős sugárterhelést, míg Fajsz esetében a posztfrontális helyzetben jellemző északias szél következtében voltak tapasztalhatóak a maximális értékek. A teljes dózis felnőttekre vonatkozóan $4,02E+05$ nSv, míg gyerekekre számolva $6,55E+05$ nSv értéket adta.

22. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. július 8–10.)	Fajsz	Paks	Dunakömlőd
Inhalációs dózis felnőttekre	1,92E+004	1,03E+004	6,68E+003
Inhalációs dózis gyerekekre	3,13E+004	1,68E+004	1,12E+004
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	3,83E+005	2,05E+005	1,38E+005
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	6,24E+005	3,35E+005	2,24E+005
Talajból eredő dózis felnőttekre	7,89E–001	1,70E+000	4,17E–001
Talajból eredő dózis gyerekekre	7,89E–001	1,70E+000	4,17E–001
Felhőből eredő dózis	6,62E+001	3,55E+001	2,38E+001
Teljes dózis felnőttekre	4,02E+005	2,15E+005	1,45E+005
Teljes dózis gyerekekre	6,55E+005	3,52E+005	2,35E+005

5.7. 2015. augusztus 15–17.

A vizsgált időszakban omega-blocking időjárási helyzet rajzolódott ki Európa térségére vonatkozóan, melyhez tartozó nyugati, izlandi nyomásközponttal rendelkező ciklonhoz hosszan elnyúló, hullámzó frontálzóna kapcsolódott. Blocking révén ezek az időjárási képződmények lassan haladtak kelet felé, maga a front csupán 17-én érte el a Kárpát-medencét (57. ábra), amely előtt több MNSZ is húzódott, amelyek délről nagy nedvességtartalmú és meleg levegőt szállítottak a magasban hazánk térségébe. Ez mindhárom napon ismétlődő zivatarok, mezoléptékű konvektív rendszerek (MKR) kialakulásához vezetett, melyek nagy mennyiségű csapadékot okoztak az ország minden régiójában.



57. ábra – Időjárási háttérhelyzet Európában 2015. augusztus 17-én. Hullámzó frontrendszer húzódott hazánk felett, mely mentén nagy mennyiségű, elsősorban konvektív csapadék volt jellemző (Forrás: met.hu)

Pakson 15-én gyengén felhős volt az ég, majd a délutáni, esti óráktól fokozatosan megnövekedett a felhőzet. Az éjszaka folyamán zivatarok alakultak ki, melyek másnap hajnalban érték el a várost, 15-én éjfélig 0,2 mm csapadék hullott. Gyenge K-i szél volt jellemző a nap során. A legalacsonyabb hőmérséklet 16,1 °C, míg a nappali maximum 36,9 °C volt.

16-án a hajnali órákban elérte a várost az éjszaka fejlődött zivatarzóna, melyet ismétlődő csapadéktevékenység kísért. Napközben erősen felhős volt az ég, majd az esti

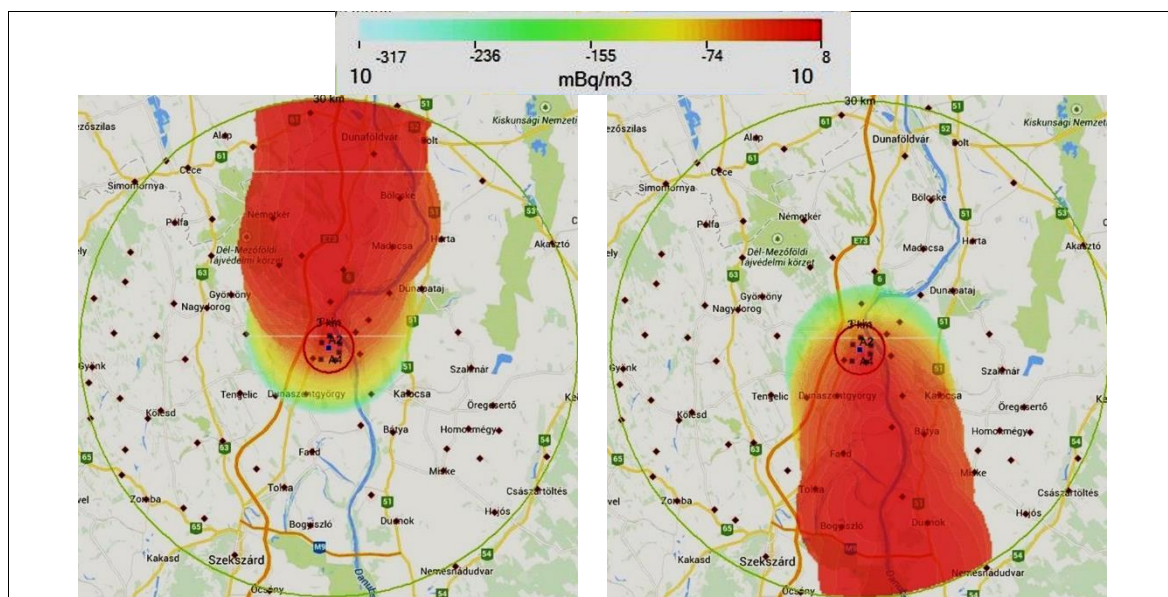
órákban újabb, erős zivatarzóna érte el Paks térségét, mely nagy mennyiségű záporos csapadékkal járt. A napi csapadékösszeg meghaladta a 60 mm-t is. A változó irányú szél mérsékelt maradt. A hajnali minimum hőmérséklet 19,4 °C volt, míg napközben 31,1 °C-ig emelkedett a hőmérő higanyszála.

17-én erősen felhős, borult volt az ég, melyhez a délutáni órákban zivatartevékenység párosult. A nap során 7 mm csapadék hullott. A Ny-i, majd ÉNy-i szél mérsékelt maradt. A legalacsonyabb hőmérséklet 19 °C volt, míg délután 25,7 °C volt a napi maximum.

23. táblázat – Jellemző meteorológiai értékek a paksi szinoptikus mérőállomáson augusztus 15–17. időszakban (Forrás: met.hu)

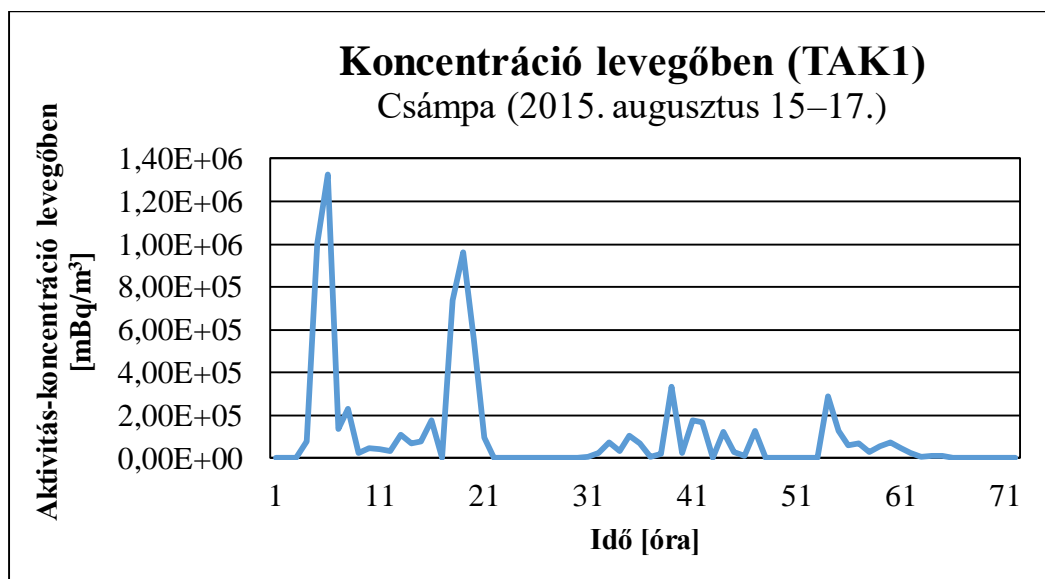
	Tmin	Tmax	Csapadék	Szél
<i>Augusztus 15.</i>	16,1 °C	36,9 °C	0,2 mm	K-i gyenge
<i>Augusztus 16.</i>	19,4 °C	31,1 °C	60 mm	Változó, mérsékelt
<i>Augusztus 17.</i>	19,0 °C	25,7 °C	7 mm	Ny-i, ÉNy-i mérsékelt

A vizsgált időszakot változó irányú szél jellemezte, így a kibocsátott szennyezőanyag-felhő illusztrálásához két, a szimuláció alatt gyakran jelentkező csóvairányt választottam, amelyek például a 16. illetve a 72. órában is jelentkeztek (58. ábra).



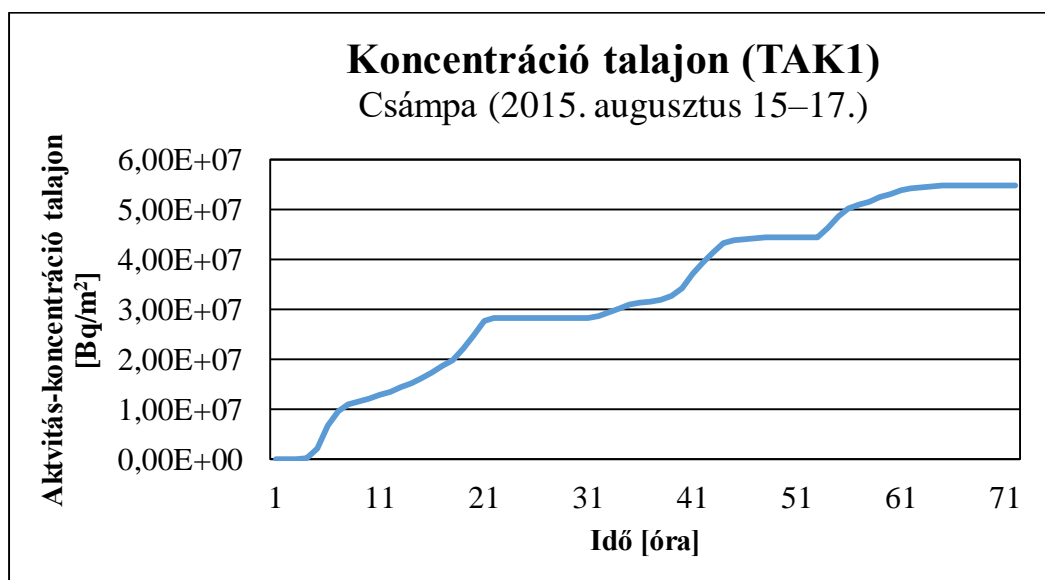
58. ábra – A MONTEE által TAK1 üzemállapotra szimulált szennyezőanyag csóva a számítási időszak 16., illetve 72. órájában.

A legmagasabb levegőben mérhető aktivitás-koncentráció érték Csámpa esetében jelentkezett. Ez a 6. szimulációs időlépcsőben a $1,33\text{E}+06$ mBq/m^3 értéket eredményezte.



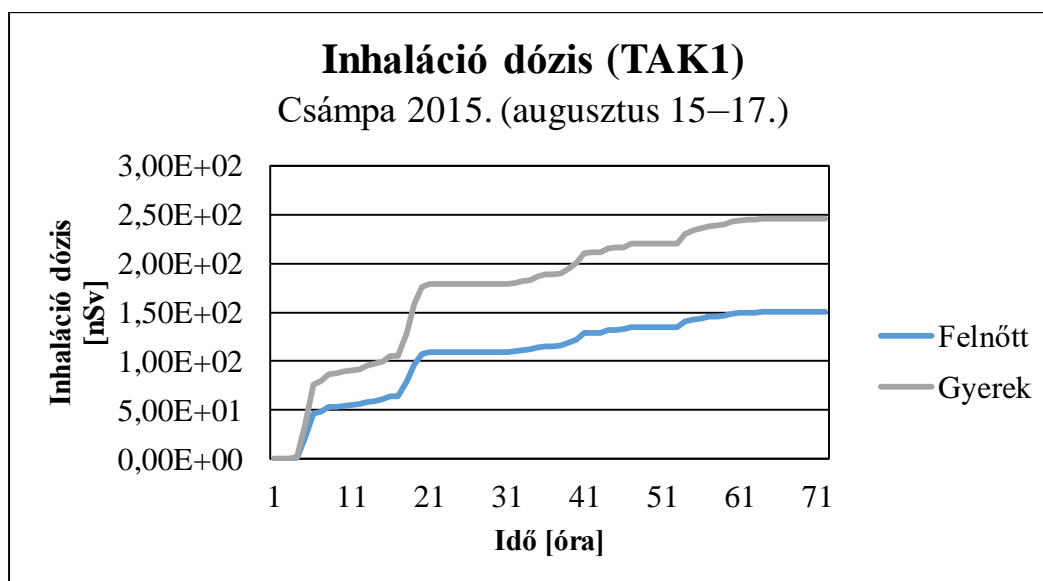
59. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán $[\text{mBq}/\text{m}^3]$ egységben. Maximális értéke $1,33\text{E}+06$ mBq/m^3 volt, amely a számítási időszak 6. órájában jelentkezett

A talaj radioaktivitása Csámpa estében folyamatos emelkedést mutatott a szimuláció során. Legmagasabb értéke $5,48\text{E}+07$ Bq/m^2 , amelyet a 66. órában ért el (60. ábra).



60. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán $[\text{Bq}/\text{m}^2]$ egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az $5,48\text{E}+07$ Bq/m^2 -t

A levegő aktivitás-koncentrációjából származtatott inhalációs dózis az előző grafikonnal egyező módon folyamatos emelkedést produkál. Felnőtt korosztályra vonatkoztatott értéke $1,50E+02$ nSv-et, míg a gyerekekre származtatva $2,46E+02$ nSv-et érte el.



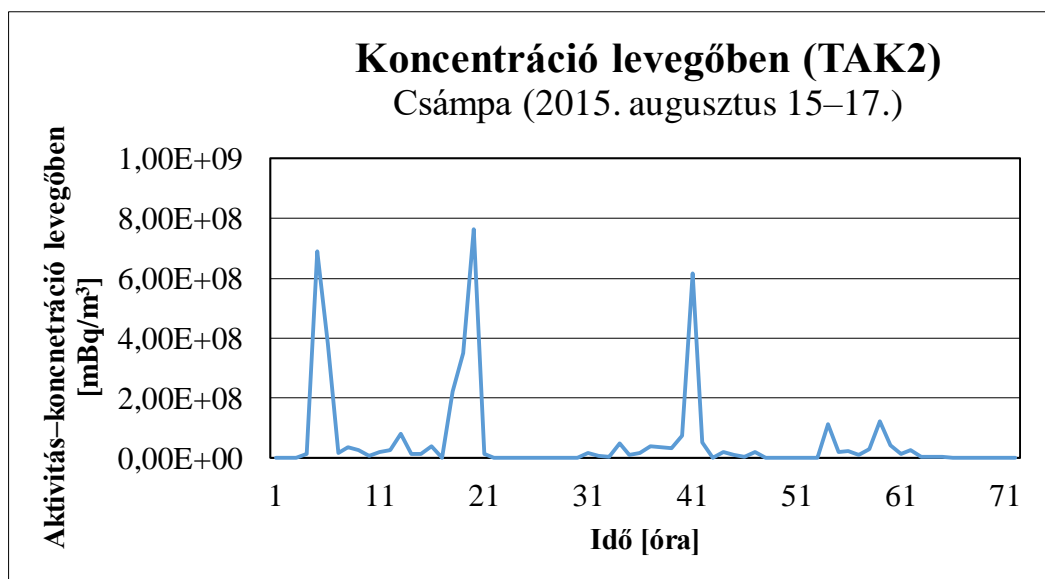
61. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Csámpán [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén az $1,50E+02$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan a $2,46E+02$ nSv-et jelentette

A legmagasabb dózisértékek az erőmű közvetlen környezetében elhelyezkedő Csámpa és Paks települések mellett a telephelytől 10 km-re délkeletre elhelyezkedő Bátya településen adódtak. A teljes dózis maximuma felnőttek esetén $3,16E+03$ nSv-et, míg gyerekeknél $5,15E+03$ nSv értéket eredményezett.

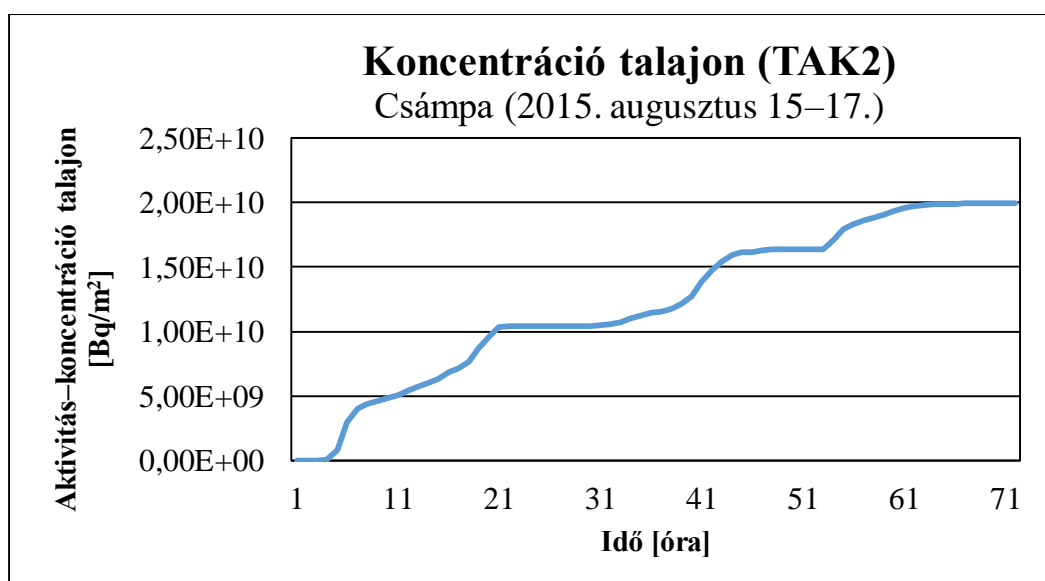
24. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK1 (2015. augusztus 15–17.)	Csámpa	Bátya	Paks
Inhalációs dózis felnőttekre	$1,50E+02$	$2,44E+01$	$7,86E+00$
Inhalációs dózis gyerekekre	$2,46E+02$	$4,00E+01$	$1,28E+01$
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	$3,01E+03$	$4,88E+02$	$1,57E+02$
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	$4,91E+03$	$7,98E+02$	$2,57E+02$
Talajból eredő dózis felnőttekre	$2,05E-02$	$2,18E-03$	$9,00E-04$
Talajból eredő dózis gyerekekre	$2,05E-02$	$2,18E-03$	$9,00E-04$
Felhőből eredő dózis	$5,20E-01$	$8,46E-02$	$2,72E-02$
Teljes dózis felnőttekre	$3,16E+03$	$5,13E+02$	$1,65E+02$
Teljes dózis gyerekekre	$5,15E+03$	$8,40E+02$	$2,69E+02$

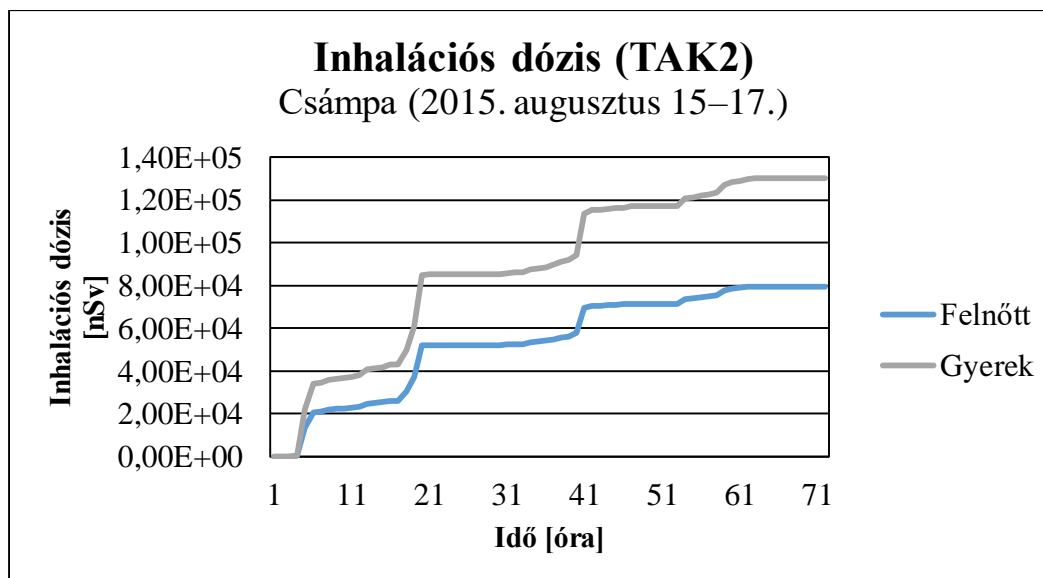
TAK2 alkalmazásával mindhárom mennyiség csámpai maximummal rendelkezik (62. ábra; 63. ábra; 64. ábra).



62. ábra – Levegő aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [mBq/m³] egységben. Maximális értéke 7,63E+08 mBq/m³ volt, amely a számítási időszak 20. órájában jelentkezett



63. ábra – Talaj aktivitás-koncentrációjának időbeli alakulása Csámpán [Bq/m²] egységben. Értéke a számítási időszak végére elérte az 1,99E+10 Bq/m²-t



64. ábra – Inhalációs dózis időbeli alakulása Csámpán [nSv] egységben, két korcsoportra vonatkoztatva. Értéke a felnőttek esetén a $7,97E+04$ nSv-et érte el, míg gyerekekre vonatkozóan az $1,30E+05$ nSv-et jelentette

A legmagasabb teljes dózis Csámpán adódott felnőttek esetén $1,67E+06$ nSv, míg gyerekek esetén $2,73E+06$ nSv értékkel. Emellett két Duna parti településen adódtak a legmagasabb dózis értékek (25. táblázat).

25. táblázat – Aktivitás-koncentrációból származtatott különböző dózisok, illetve az azok összegét képező teljes dózisok felnőtt, illetve gyerek korcsoportra vonatkozóan [nSv] egységben. A táblázatban a legmagasabb értékeket elérő települések szerepelnek

TAK2 (2015. augusztus 15–17.)	Csámpa	Gerjen	Foktő
Inhalációs dózis felnőttekre	$7,97E+04$	$1,84E+04$	$1,23E+04$
Inhalációs dózis gyerekekre	$1,30E+05$	$3,02E+04$	$2,02E+04$
Pajzsmirigy dózis felnőttekre	$1,59E+06$	$3,69E+05$	$2,47E+05$
Pajzsmirigy dózis gyerekekre	$2,60E+06$	$6,01E+05$	$4,03E+05$
Talajból eredő dózis felnőttekre	$7,47E+00$	$1,02E+00$	$1,72E+00$
Talajból eredő dózis gyerekekre	$7,47E+00$	$1,02E+00$	$1,72E+00$
Felhőből eredő dózis	$2,75E+02$	$6,37E+01$	$4,27E+01$
Teljes dózis felnőttekre	$1,67E+06$	$3,87E+05$	$2,59E+05$
Teljes dózis gyerekekre	$2,73E+06$	$6,31E+05$	$4,23E+05$

5.8. Összegzés

Munkám során arra kerestem a választ, hogy milyen mértékben befolyásolhatja a terjedésszámítás folyamatát a meteorológiai háttérmező változékonysága. A numerikus szimulációk bevezetőjében röviden összefoglaltam, hogy melyek azok az időjárási elemek, amelyek a szennyezőanyagok diszperzióját befolyásolják. Ezeket érdemes a meteorológia különböző térskálájú elemein keresztül tanulmányozni.

Nagyterségű folyamatok esetén a ciklonális, illetve az anticiklonális időjárási helyzetek azok, amelyeknél érdemes a szimulációs eredmények meteorológiai befolyásoltságát megvizsgálni. Anticiklon esetén a nagyterségű leszálló légmozgás felhőoszlató hatással bír, illetve stabil rétegződés jellemzi gyenge légmozgással. Az ilyen időjárási helyzet fennállása esetén az emittálódott szennyezőanyag-felhő hamar szétterül, annak száraz ülepedése már a forrás közvetlen környezetében lejátszódik, a relatíve magas, 100 m-es szellőzőkémény esetén is. Anticiklonális helyzet jellemezte a 3. meteorológiai helyzetet (*lásd 5.3. fejezet*), ahol csapadék nem volt jellemző, és a napsütéses órák magas számához gyenge erősségű, változó irányú szél társult. A levegő, illetve a talaj aktivitás-koncentrációjának maximuma is a telephely 5 km-es körzetén belüli településekre esett. TAK1 üzemállapotot alkalmazva az előbbi esetén Dunaszentbenedek községhez tartozott a maximum $1,19\text{E}+06$ Bq/m³ értékkel (*lásd 25. ábra*), míg utóbbinál Csampa esetében adódott a legnagyobb eredmény $5,20\text{E}+07$ Bq/m²-el (*lásd 26. ábra*).

Ciklon jelenléte csapadékos időjárást eredményez, amelyhez nagyobb szélerősség társulhat. Ennek megfelelő időjárási helyzet volt jellemző az 1. időjárási helyzetben is, ahol egy mediterrán ciklon szerepelt nagy mennyiségű csapadékkal (*lásd 5.1. fejezet*). A legnagyobb aktivitás-koncentráció értékek az északias irányú, élénk erősségű szél következtében mind TAK1, mind TAK2 esetén olyan településekre adódtak, amelyek az erőmű 10 km-es körzetén kívül helyezkednek el.

Ciklontevékenységhez kapcsolóan meg kell említeni a frontátvonulásokat is, amelyek közül a legkarakteresebb a 6. időjárási szituációban jelentkezett (*lásd 5.6. fejezet*). Itt a hidegfront mögött száraz időjárási körülményekhez élénk, olykor erős ÉNy-i szél tartozott, így a levegőbeli aktivitás-koncentráció maximumok olyan településeken (Gerjen, illetve Fajszy) születtek, amelyek a telephely 10 km-es körzetén kívül találhatók (*lásd 51. és 54. ábra*). A nagyobb szélesebbesség értékek hatására a szennyezőanyag csóva csupán keskeny sávot érintett, illetve a szennyezőanyag a 100 m-es forrástól távolabb eső területek esetén tudott hatékonyan a talaj közelébe lekeveredni. Ez látható a talaj radioaktivitásának időbeli

menetén is, ahol TAK1 üzemállapot mellett a maximumot Gerjen esetében érte el (*lásd 52. ábra*).

Nagy térségű folyamatok mellett azok lokális hatásait is vizsgálhatjuk. A szennyezőanyagok transzportját, illetve légkörben való tartózkodását a száraz, illetve nedves ülepedés folyamata befolyásolhatja. Száraz ülepedés hatékony végbemeneteléshez, azaz a radionuklidok talajra való kikerüléséhez olyan időjárási helyzet szükséges, amikor a horizontális, illetve a vertikális légmozgás karakterisztikus léptéke összemérhető. Ilyen szituáció olyan esetben állhat fenn, amikor napközben a melegebb felszíni réteg és a magasabban található légrétegek között fennálló vertikális hőmérsékleti gradiens hatására a kiszélesedő határretegben turbulens átkeveredés zajlik. Ez a 4. vizsgált időjárási helyzet esetén jelentkezett (*lásd 5.4. fejezet*), ahol a szimuláció első két napján a front előtt a változó felhőborítottsághoz csapadék nem tartozott. A gyenge légmozgás, illetve a keverési rétegben zajló turbulencia hatására az erőmű közvetlen környezetében (Géderlak, illetve Dunaszentbenedek) adódtak a maximális aktivitáskoncentráció értékek mindkettő üzemállapot esetén (*lásd 34., 35., 37., illetve 38. ábrák*). Nedves ülepedés hatása elemezhető az 5. időjárási helyzet szimulációinak eredményeivel (*lásd 5.5. fejezet*). A száraz ülepedésnél tárgyalt szimuláció talajra vonatkoztatott eredményeivel összevetve látható, hogy itt magasabb értékek tapasztalhatók, TAK2 estében a radioaktivitás egy nagyságrenddel magasabb (*lásd 46. ábra*). A csapadék hatása térben vizsgálva azonos a turbulencia hatásával, a kimosódás már a telephely közvetlen környezetében hatékonyan zajlik le. Ez a 2. időjárási szituáció esetében is elmondható (*lásd 5.2. fejezet*).

Az előzőekben tárgyaltak mellett fontos paraméter lehet még a légkör stabilitása is. Instabil rétegződéshez kapcsolódó konvekció vertikális átkeveredést biztosíthat, amely szélsőséges esetekben akár a troposzféra felhő határáig transzportálhatja az emittálódott részecskéket. A konvekció feláramlás mellett leáramlási komponenssel is tartozik, így az a turbulenciához hasonló átkeveredést biztosít. Instabil időjárási helyzet kínálkozott a 7. helyzetben bemutatott hullámzó frontrendszer esetén (*lásd 5.7. fejezet*). A nagymértékű átkeveredés hatására ebben az esetben is az erőmű közvetlen környezetében adódtak a maximum értékek, levegő, illetve talaj radioaktivitásának szempontjából is. Látható, hogy Csámpán a talaj közeli légrétegben a szimuláció időtartama alatt magas értékek jelennek meg (*lásd 59., illetve 62. ábrák*).

A vizsgálat végén a származtatott dózisos összegét adó teljes dózisos alapján megállapítható, hogy kulcsfontosságú szerepe van a légköri szennyezőanyagok terjedésénél az uralkodó szélirány mellett a légoszlop vertikális átkeveredésének, illetve a nedves

kimosódásnak is, hiszen a lakosság szempontjából érdekelt felszín közeli légrétegbe, illetve a talajra a nehézségi erőter szerepe mellett e folyamatok útján jutnak le a különböző aeroszol részecskék. TAK1 üzemállapot alkalmazásával a május 21–23. időszakban adódtak a legmagasabb dózis értékek. Ezekből a teljes dózis felnőttekre $5,60E+03$ nSv, míg gyerekekre $9,12E+03$ nSv lett. TAK2 esetén az augusztusi időjárási helyzetben adódtak a legmagasabb értékek. A teljes dózis itt felnőttekre $1,67E+06$ nSv, míg gyerekekre $2,73E+06$ nSv-et eredményezett. Megállapítható tehát, hogy a légmozgás szerepe kulcsfontosságú a szennyezőanyagok terjedésénél. Alacsonyabb szélességek esetén a horizontális hígulás nem biztosított, ugyanakkor vertikálisan ennek mértéke nagy, azaz lokálisan adódhatnak nagy értékek. Magas szélesség értékek esetén a csóva horizontálisan képes hígulni, szélfordulásokkal nagy területet érinteni, azonban esetében a kiüledés nem olyan jelentős mértékű, mint turbulencia esetén.

6. Észrevételek

A MONTEE programcsomaggal végzett vizsgálatok során a szoftver alkalmasnak bizonyult a terjedésszámítási, illetve szennyezőanyag-ülepedési feladatok ellátására. A számítások elvégzése, és az eredmények kiértékelése közben azonban felmerültek olyan hiányosságok, illetve modellhibák, amelyek kiküszöbölésével a program operatív alkalmazása gördülékenyebbé tehető. Az ezekkel kapcsolatos észrevételek az alábbiakban foglalom össze, amelyekhez konkrét javaslatok is tartoznak.

6.1. Technikai észrevételek

A szimulációk során a ^{131}I izotóp került alkalmazásra kibocsátott szennyezőanyagként a rendelkezésre álló négy radionuklid közül. Elérhető volt még a ^{88}Kr , ^{41}Ar és ^{135}Xe izotóp (65. ábra), a jódot annak élettani kockázata miatt választottam. Egy atomerőművi üzemzavar esetén azonban több radioaktív szennyezőanyag típus kerülhet ki a légkörbe, melyekkel számolni kell az emisszió hatásvizsgálata során.

Kibocsátott elemek:

Mérési adatok (SCADA)

Egyedi adatok [Bq]

I-131: 1.E3

Kr-88: 13.E13

Ar-41: 16.E16

Xe-135: 19.E19

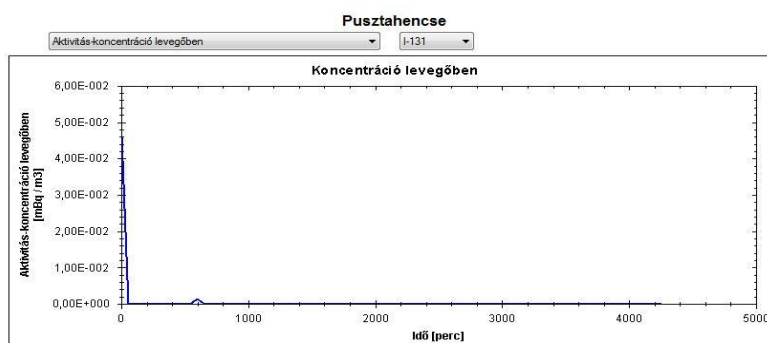
65. ábra – A MONTEE-ban egyedileg megadható a kibocsátott elemek típusa. Jelenleg ^{313}I , ^{88}Kr , ^{41}Ar és ^{135}Xe radionuklidok emissziója lehetséges.

A forrástag meghatározásánál javaslom olyan adatbázis alkalmazását, amely teljes lefedettséget biztosít az egyes üzemállapotok során kibocsátott radioaktív izotópok fajtáira, összetételére, illetve minőségére vonatkozóan. Itt szóba jöhet akár a Paksi Atomerőműnél futtatott TREX terjedésszámító szoftver által figyelembe vett 118 db izotóp (Jobbágy *et al.*, 2008), illetve figyelembe veendő az izotópok fizikai-kémiai tulajdonságaira vonatkozó aktuális UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) adatbázis is. A szoftvernek alkalmazhatónak kell lennie az új blokkok mellett a régiéket esetén is, melyhez azt kompatibilissé kell tenni a Paksi Atomerőmű és az MVM Paks II. Zrt. informatikai és adatgyűjtő rendszerével is.

Az 5. fejezetben ismertetett numerikus feladatok egy izotóp-típus mellett 72 óras időtartamra zajlottak, 60 perces időlépcsővel, 1000 darab szennyezőanyag részecske feltételezésével. A számítás időtartama e feltételek mellett másfél, két órát vett igénybe. Ez az időtartam több radionuklid alkalmazásával, illetve az időlépcső finomításával megnyúlhat, főképp, ha a vizsgálati tartomány egy, a telephely 30 km-es körzeténél nagyobb zónára kerül kiterjesztésre. Baleseti helyzeteknél fontos a modell futtatások gyorsasága, azok lehető leggyorsabb kiértékelése, ugyanis egy ilyen szituációban ezek az eredmények a környező lakosságra vonatkozó óvintézkedések, esetleges evakuálási tervek alapjai lehetnek. Ezek figyelembe vételével javaslom a MONTEE modell futtatására szolgáló számítástechnikai eszközök hardver-szintű fejlesztését, fejlett alaplapi architektúra-kihasználással rendelkező processzorok alkalmazását, amelyekkel a számítási kapacitás megsokszorozható.

A szimulációk precizitásának kulcsa a szoftver által felhasznált időjárás adatok tér- és időbeli felbontása, meteorológiai mezők részletessége. A szoftver jelenleg a GFS globális időjárás-előrejelző modell analízis és előrejelző mezőit alkalmazza, melyeken kívül a 3. fejezetben ismertetett hat darab meteorológiai helyzet áll még rendelkezésre. Ezek mellett a számítási pontosságot növelheti korlátos tartományú, esetleg nem-hidrosztatikus modell-mezők (pl. WRF) használata is.

Az output adatokat a MONTEE access alapú adatbázis-kezelő rendszeren tárolja. Az eredmények 10 típusra (aktivitás-koncentrációk, dózisok) lebontva érhetőek el, az egyes települések esetén, radionuklidonként. Az adatokat innen táblázatkezelő szoftverbe átmásolva lehet feldolgozni, amely időigényessé teszi azok vizsgálatát. A futás eredményét ábrázoló térképen elérhető a vizsgálati zónába eső települések esetén az output mezők időbeli alakulása diagram formátumban (66. ábra), amely onnan csupán képfájlként menthető.



66. ábra - Pusztahencsére vonatkozó diagram, amelyet a modellen belül közvetlenül a futtatás után lehet elérni. A MONTEE-ban kiválasztható az egyes településekre meghatározott output mező, illetve a kibocsátott izotóp típusa is. A diagramokat a szoftverből kép formátumban lehet elérni.

Az output adatok vizsgálati folyamatának felgyorsításához javaslom a riportálási felület excel alapúvá tételét, amelyet alkalmazva rugalmasabbá válik a modelleredmények feldolgozása, a kiugró értékek megkeresése, illetve időbeli változást megjelenítő ábrák készítése is.

A számítás eredményeként kapott szennyezőanyag-csóvát lehetőségünk van térképes felületen megjeleníteni. Ehhez a modell a 2 m-es referencia szintre kapott aktivitás-koncentráció értékeket alkalmazza. A sugárvédelmi szakemberek számára azonban többletinformációt nyújthat a radioaktív szennyeződések vertikális irányú diffúziójának időbeli lefolyása, illetve a talajra történő kiülepedés térbeli lefedettsége is. Ezeknek a hiányosságoknak az áthidalására egy 3 dimenziós megjelenítő rendszer kidolgozását javaslom, ami forgatható a térben, így több perspektívából megfigyelhető a részecskék terjedése. Nagy felezési idővel rendelkező radionuklidok esetén fontos azok száraz, illetve nedves ülepedésének ismerete, amelynek szemléltetéséhez javaslom a térképes grafikába beépíteni ezek megjelenítését is.

Összefoglalás

Diplomamunkámban az atomerőművi blokkokhoz kapcsolódó radioaktív kibocsátás szimulációjával foglalkoztam. A dolgozat első harmadában a nemzetközi tudományos gyakorlatban aktuálisan alkalmazott eljárásokat gyűjtöttem össze, azok fizikai felépítése szerint. Ezek bemutatása mellett kitértem a Paksi Atomerőmű jelenleg üzemelő négy blokkjára alkalmazott terjedésszámító szoftverekre, illetve azok alkalmazási területére. Bemutattam a két új blokkra adaptált, lagrange-i szemléleten alapuló MONTEE terjedésszámítási szimulátort, és az általa elvégezhető feladattípusokat gyűjtöttem össze.

Dolgozatomban a gyakorlati munkát az előbb említett szoftver érzékenységi vizsgálata jelentette, amelyet különböző időjárási szituációkra végeztem el. Ehhez kibocsátási forrásként az épülő atomerőmű 1. blokkjának 100 m magas szellőzőkéményét választottam, és forrástagként a ^{131}I izotópot határoztam meg. A kibocsátás körülményeit az erőmű üzemállapotai határozzák meg. A nemzetközi gyakorlatban is alkalmazott hat üzemállapot közül a két legsúlyosabbat (TAK1, TAK2) választottam, amelyekhez hozzárendelt, ^{131}I radionuklidra vonatkoztatott aktivitás értékeket használtam. A meteorológiai háttérmező biztosításához hét különböző, 72 órás időszakot választottam. Az időszakokra vonatkozó GFS időjárás előrejelző modell analízis és előrejelző mezői képezték az inputot a terjedési szimulációk számára.

A modellfuttatásokat az erőmű 30 km sugarú környezetére végeztem, majd az így kapott eredményeket a vizsgálati zónába eső települések esetén tanulmányoztam. Az elemzés végrehajtásához a levegő és a talaj aktivitás-koncentrációját választottam, illetve az ezekből származtatott dózisokat használtam. Az adatok közül a legmagasabb értékeket szűrtem ki. A bemutatott szimulációk összefoglalásaként a nagyskálájú meteorológiai képződmények (ciklonok, anticiklonok) befolyását vizsgáltam, tanulmányoztam, hogy egy front átvonulása után megerősödő szél hogyan hat a szennyezőanyag felhőre, illetve a száraz, vagy nedves ülepedést kiváltó folyamatokat gyűjtöttem össze.

A szoftver a szimulációk során megfelelt a követelményeinknek, azonban felmerültek olyan technikai hiányosságok, amelyek baleseti szituáció esetén kulcsfontosságúak lehetnek. Ezekkel kapcsolatosan fogalmaztam meg észrevételeimet, amelyekhez konkrét javaslatokat is rendeltem. Ezeket a *6. fejezetben* foglaltam össze.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, *Dr. Dombóvári Péternek* a dolgozat során nyújtott rengeteg segítséget és a biztató szavakat. Mindig számíthattam rá, ha a modellezés során, illetve sugárvédelmi fogalmak tisztázásával kapcsolatosan kérdések merültek fel bennem.

Köszönöm belső konzulensemnek, *Dr. Mészáros Róbertnek* a sok hasznos tippet és szakmai tanácsot, illetve a lelkesedésem alábbhagyása során az ösztönzést, melyek nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

Köszönet illeti az *MVM Paks II. Zrt. Vegyészeti, Sugár-és Környezetvédelmi Osztály* munkatársait is, akik rendelkezésemre bocsátották a MONTEE terjedésszámító szoftvert, illetve helyet és informatikai háttérrel biztosítottak számomra a diplomadolgozat gerincét képező szimulációk elvégzéséhez.

Hálával tartozom *családomnak* és *barátaimnak* is, akik egyetemi tanulmányaim, illetve jelen dolgozat elkészülése során mindvégig támogattak.

Irodalomjegyzék

- Bájhóber, E.L., 2014: A CMAQ – többléptékű közösségi levegőminőségi – légköri terjedési modell felépítése, MSc szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék
- Bollhöfer, A., Schlosser, C., Ross, J.O., Sartorius, H., Schmid, S., 2014: Variability of atmospheric krypton-85 activity concentrations observed close to the ITCZ in the southern hemisphere, *Journal of Environmental Radioactivity*, 127, 111–118.
- Brennan, M., Skvortsov, A., Gailis, R., 2010: HPAC (Hazard Prediction and Assessment Capability) <> jSWAT (Joint Seminar Wargaming Adjudication Tool) Integration; A Technical Solution, Defence Science and Technology Organisation, *Department of Defence, Australian Government*
- Csurgai, J., Deme, S., Dombóvári, P., Ferenczi, Z., Kantavári, A., Máté, K., Solymosi, J., Szántó, A., 2011: A nukleáris balesetek esetén hazánkban használt légköri terjedés- és dózisszámító szoftverek összehasonlítása, *Tanulmány, Budapest*
- Connan, O., Solier, L., Hébert, D., Maro, D., Lamotte, M., Voiseux, C., Laguionie, P., Cazimajou, O., Cavelier, S.L., Godinot, C., Morillon, M., Thomas, L., Percot, S., 2014: Near-field krypton-85 measurements in stable meteorological conditions around the AREVA NC La Hague reprocessing plant: estimation of atmospheric transfer coefficients, *Journal of Environmental Radioactivity*, 137, 142–149.
- Dombóvári, P., 2006: Baleseti kibocsátás modell, Kezelési útmutató, Paks
- Draxler, R., Arnold, D., Chino, M., Galmarini, S., Hort, M., Jones, A., Leadbetter, S., Malo, A., Maurer, C., Rolph, G., Saito, K., Servranckx, R., Shimbori, T., Solazzo, E., Wotawa, G., 2015: World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 172–184.
- Eslinger, P.W., Bowyer, T.W., Achim, P., Chai, T., Deconninck, B., Freeman, K., Generoso, S., Hayes, P., Heidmann, V., Hoffman, I., Kijima, Y., Krysta, M., Malo, A., Maurer, C., Ngan, F., Robins, P., Ross, J.O., Saunier, O., Schlosser, C., Schneeopper, M., Schrom, B.T., Seibert, P., Stein, A.F., Ungar, K., Yi, J., 2016: International challenge to predict the impact of radionuclide releases from medical isotope production on a comprehensive nuclear test ban treaty sampling station, *Journal of Environmental Radioactivity*, 157, 41–51.
- Eslinger, P.W., Bowyer, T.W., Achim, P., Chai, T., Deconninck, B., Freeman, K., Generoso, S., Hayes, P., Heidmann, V., Hoffman, I., Kijima, Y., Krysta, M., Malo, A., Maurer, C., Ngan, F., Robins, P., Ross, J.O., Saunier, O., Schlosser, C., Schneeopper, M., Schrom, B.T., Seibert, P., Stein, A.F., Ungar, K., Yi, Saito, K., Shimbori, T., Draxler, R., 2015: JMA's regional atmospheric transport model calculations for the WMO technical task team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 185–199.

- Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE), Radioökológiai Tisztaságért Társadalmi Szervezet (RTTSz), 2014: MONTEE Léggöri Terjedési Szimulátor, Kezelési Útmutató
- Nukleáris Biztonsági Szabályzatok (NBSz), 2015: Általános tervezési elvek új atomerőművek és rendszereinek tervezéséhez, Országos Atomenergia Hivatal, N-3a.12. sz. útmutató
- Földi, A., Mészáros, M., Sági, L., Deme, S., Dombóvári, P., Szántó, A., Tóth, K., Petőfi–Tóth, K., 2010: Léggöri terjedésszámító szoftverek összehasonlítása, Összehasonlító elemzés, Budapest
- Guttikunda, S.K., Jawahar, P., 2014: Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India, *Atmospheric Environment*, 92, 449–460.
- Halse, A.K., Eckhardt, S., Schlabach, M., Stohl, A., Breivik K., 2013: Forecasting long-range atmospheric transport episodes of polychlorinated biphenyls using FLEXPART, *Atmospheric Environment*, 71, 335–339.
- Ichige, H., Fukuchi, S., Hatano, Y., 2015: Stochastic model for the fluctuations of the atmospheric concentration of radionuclides and its application to uncertainty evaluation, *Atmospheric Environment*, 103, 156–162.
- Jobbágy, V., Kávási, N., Kovács, T., Somlai, J., Lagzi, I., Mészáros, R., Vince, Cs., Molnár, F., Szakály, T., 2018: A terjedésszámítási szoftver lakossági dózisok meghatározására kidolgozott radioökológiai modelljének ismertetése, Veszprém
- Kocsis, Zs., Ferenczi, Z., Faragó, I., 2009: Operator splitting in the Lagrangian air pollution transport model, *Időjárás*, 189–202.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, Gy., Leelőssy, Á., 2013: Atmospheric Chemistry, Egyetemi jegyzet, ELTE Meteorológiai Tanszék
- Solazzo, E., Galmarini, S., 2015: The Fukushima-¹³⁷Cs deposition case study: properties of the multi-model ensemble, *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 226–233.
- Leadbetter, S.J., Hort, M.C., Jones, A.R., Webster, H.N., Draxler, R., 2015: Sensitivity of the modelled deposition of Caesium-137 from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant to the wet deposition parameterisation in NAME, *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 200–211.
- Mészáros, R., Leelőssy, Á., Kovács, T., István, Lagzi, 2016: Predictability of the dispersion of Fukushima-derived radionuclides and their homogenization in the atmosphere, *Scientific Reports*,
- Mészáros, R., Leelőssy, Á., Lagzi, I.L., 2015: Levegőkémiai modellezés az ELTE Meteorológiai Tanszékén, *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 26., 64–69.
- MVM Paks II., 2015: Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen, *Környezeti Hatástanulmány*, Paks

- Paatero, J., Vira, J., Siitari-Kauppi, M., Hattaka, J., Holmén, K., Viisanen, Y., 2012: Airborne fission products in the high Arctic after the Fukushima nuclear accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, 41–47.
- Rolph, G. D., Ngan, F., Draxler, R. R., 2014: Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model, *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 41–55.
- Srinivas, C.V., Venkatesan, R., Baskaran, R., Rajagopal, V., Venkatraman, B., 2012: Regional scale atmospheric dispersion simulation of accidental releases of radionuclides from Fukushima Dai-ichi reactor, *Atmospheric Environment*, 61, 66–84.
- Takács, D., 2013: A 2012. április 29-i bugaci erdőtüz modellezése, szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék
- Tang, M.L., Tsuang, B.J., Kuo, P.H., 2016: Dose estimation for nuclear power plant 4 accident in Taiwan at Fukushima nuclear meltdown emission level, *Journal of Environmental Radioactivity*, 155–156, 71–83.
- Túri, M., 2013: Nukleáris anyagtranszport szoftveres vizsgálata a Paksi Atomerőmű telephelyén, BSc szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék
- Turner, R., Moore, S., Pardo, N., Kereszturi, G., Uddstrom, M., Hurst, T., Cronin, S., 2014: The use of Numerical Weather Prediction and a Lagrangian transport (NAME-III) and dispersion (ASHFALL) models to explain patterns of observed ash deposition and dispersion following the August 2012 Te Maari, New Zealand eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 437–451.
- Várkonyi, T., 1982: A levegőszennyeződés, Műszaki Kiadó, Budapest
- Winiarek, V., Bocquet, M., Duhanyan, N., Roustan, Y., Saunier, O., Mathieu, A., 2014: Estimation of the caesium-137 source term from the Fukushima Daiichi nuclear power plant using a consistent joint assimilation of air concentration and deposition observations, *Atmospheric Environment*, 82, 268–279.
- Witham, C., Webster, H., Hort, M., Jones, A., Thomson, D., 2012: Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions, *Atmospheric Environment* 48, 219–229.

Internetes források

http://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/

<http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>