

3 Radioaktív szennyezés terjedésének modellezése

3.1 Bevezetés

Ha radioaktív, illetve kémiai mérgező anyagok nukleáris reaktorbaesetet követő kibocsátását modellezzük, akkor egyetlen pontforrásból kiinduló, hosszú távú transzportfolyamatot kell vizsgálnunk. A modellnek pontosan előre kell jeleznie a szennyeződés várható útját, hogy mikor és milyen maximális koncentrációval érinti a lakott településeket és azt, hogy az adott területeken milyen mértékű ülepedésre lehet számítani. A szimulációnak nagy pontosságúnak kell lennie és természetesen a valós időnél gyorsabbnak ahhoz, hogy annak alapján megalapozott óvintézkedéseket lehessen tenni. Az integrált modellek, mint például a *RODOS*, összekapcsolják az előrejelzési modellt a döntéshozó és tanácsadó szoftverrel, és ezek kulcsfontosságú adatokat szolgáltatnak vészhelyzet esetén a megfelelő védelmi stratégia kidolgozásához (Galmarini *et al.*, 2001; Whicker *et al.*, 1999; Baklanov *et al.*, 2002). Sikeres és költségtakarékos stratégia tervezéséhez, egy balesetet követően rendkívül pontosan kell meghatározni a szennyeződés helyét és koncentrációját. Amennyiben alábecsüljük egy adott térségben a radionuklidok koncentrációját, az komoly egészségügyi következményekkel járhat. Ha valahol túlságosan nagy dózist becsülünk, az egy esetleges evakuációt követően súlyos társadalmi és gazdasági problémákat és károkat okozhat. A pontos előrejelzésre tehát igen nagyok a tudományos és társadalmi igények.

A csernobili katasztrófa után Európa legtöbb országa kifejlesztett olyan számítógépes modellt, amely nukleáris balesetben kialakult radioaktív felhő terjedését szimulálja, és ezeket időjárás-előrejelzéssel kapcsolták össze. Ezek a modellek igen változatos típusúak és felbontásúak, így például 2001-ben egy tanulmányban (Garmani *et al.*, 2001) 22 ilyen modellt soroltak fel. Számos modell eredményeit összehasonlították az *ETEX* (European Tracer Experiment) elnevezésű európai előrejelző kísérlettel (Van Dop *et al.*, 1998). Az *ETEX* egy nemzetközi akció volt (<http://rem.jrc.cec.eu.int/etex/>), melynek során egy kémiai inaktív anyagot (perfluor-ciklohexán) bocsátottak ki a franciaországi Monterfilben (földrajzi koordinátái: 48°03'30" északi szélesség, 2°00'30" nyugati hosszúság) egy 8 m magas kéményből 1994. október 23-án 16.00 órától október 24-én 3.50-ig összesen 340 kg mennyiségben. A kibocsátott anyag koncentrációját Európa 168 meteorológiai állomásán mérték folyamatosan a kibocsátástól számított három napon keresztül. A második *ETEX* kísérletet 1994. november 14-én 15.00 órától november 15-én 2.45-ig hajtották végre az előzővel azonos helyen és módon. Az Európában működtetett valamennyi nukleáris terjedési

modell már a kísérlet ideje alatt megpróbálták előre jelezni az egyes mérőállomásokon majd mért koncentrációkat, de az első *ETEX* kísérlet mérési adatait a legtöbb program rosszul beszülte. A második *ETEX* kísérlet során már sokkal jobban megegyeztek a mért és szimulált értékek. Az eredményes szimulációk ellenére továbbra is nyitott a kérdés, hogy melyik a legmegfelelőbb stratégia a hatások előrejelzésére. Az *ETEX* adatok felhasználása a terjedési modellek jelentős fejlesztését tette lehetővé, így finomították a kiindulási adatokat (pl. a háromdimenziós szélmezők és a határrétegek leírását), a modellek felépítését, a numerikus megoldási módszereket és az eredmények térbeli felbontását.

A szennyezőanyag terjedési modellek nemcsak előrejelzésre alkalmasak, de gyakran ezek alapján ellenőrizhetjük, hogy mennyire vagyunk tisztában egy adott tudományterülettel, amely a modell alapjait szolgáltatta. Tudásunk fejlődését gyakran azzal tudjuk lemérni, hogy összehasonlítjuk a mérési adatokat az általunk felépített modell eredményeivel. Biztosnak kell lennünk abban, hogy a bemeneti adatokban végrehajtott változtatások (amelyeket az előrejelzés pontosításának érdekében tettünk) nem egyenlítik-e ki a numerikus megoldásból fakadó hibákat. Ebből következik, hogy azoknak a modelleknek, amelyeket környezetvédelmi döntéshozatalra használnak, nemcsak a lehető legjobb tudományos ismereteket és adatokat, hanem a lehető legpontosabb numerikus módszereket is használniuk kell. A környezeti előrejelző programok kidolgozásához szükséges hosszú idő miatt sajnos ezek a programok jelenleg nem mindig a legalkalmasabb numerikus módszereket használják.

Ez a fejezet az adaptív modell egy olyan változatát mutatja be, amellyel a Paksi Atomerőműben egy elképzelt reaktoresemény során a légkörbe kerülő szennyeződés terjedését követjük nyomon. A más rács típusokkal nyert eredményeket és a hozzájuk tartozó számítógépidőket is összehasonlítjuk a modellünk eredményeivel, és megmutatjuk, hogy térbeli adaptív rácsot használva az előrejelzés sokkal pontosabb és gyorsabb.

3.2 *Radioaktív szennyezőanyag terjedési modellek*

Az 1986. április 26-án az ukrajnai Csernobil atomerőművének negyedik blokkjában történt reaktorbaleset és következményei jelentősen ösztönözték a baleseti kibocsátási modellek fejlődését, és számos ilyen modellt dolgoztak ki. Ezek a modellek túlnyomórészt Euler- vagy Lagrange-típusúak. A Lagrange-modellek előnye, hogy térbeli felbontásuk nagy, viszont ilyen modellek használatakor a meteorológiai adatok interpolációjára van szükség, amely számítási hibák forrása lehet és számítógépidő-igényes. A ilyen modellek potenciális hátránya, hogy néhány esetben figyelmen kívül hagynak fontos fizikai folyamatokat, és pontatlanok, amikor

erősen elágazó áramlatokat modelleznek hosszú távon. Baklanov és társai (2002), például egy elképzelt észak-oroszországi balesetet követő radionuklid transzportot szimuláltak Európa és Skandinávia térségében Lagrange-típusú modellel. A modell nagyrészt ugyanazokat az eredményeket adta, mint a nagy felbontású Euler-típusú terjedési modellek. Néhány esetben azonban az Euler-modell olyan helyeken is további ülepedést jósolt, ahol a Lagrange-féle modell egyáltalán nem jelzett szennyeződést a légköri trajektóriák szétválása következtében.

A közelmúltban több Lagrange-típusú modellt dolgoztak ki a radioaktív légszennyezők terjedésének leírására. A *DERMA* modell (Sørensen, 1998) többskálájú diffúzióparametризációt használ. Vízszintes irányban Gauss-féle profilt számít, valamint teljes keveredést tételez fel a keveredési rétegen belül és Gauss-féle profilt felette. A brit Meteorológiai Szolgálat (MET Office) *NAME* modellje (Bryall és Maryon, 1998) és a norvég *SNAP* modell (Saltbones *et al.*, 1998) olyan Lagrange-féle leírást használ, amelyben nagyszámú részecske kibocsátását modellezik, és így lehetőség van a meteorológiai állapotváltozókban jelentkező fluktuációk hatásának a figyelembe vételére. A *NAME* modell háromdimenziós szélmezőket turbulens komponenssel is képes kezelni. A turbulenciát olyan módon szimulálják, amely számos, a turbulens szélmezővel kapcsolatos jelenség leírására alkalmas, az egyszerű turbulens diffúziótól a komplex véletlen utak leírásáig. Ez a módszer nem használ Gauss-közelítést, ezért képes változó szélsébségek és szélirányok, aszimmetrikus turbulencia és változó stabilitási viszonyok kezelésére is. A megközelítés hátránya a nagy számítógép-igény, mert a Gauss-közelítéssel összehasonlítva nagyszámú részecskének kell kibocsátódnia.

Az Euler-modellek rácsalapú módszereket használnak, és nagy előnyük, hogy a trajektóriák helyett a háromdimenziós meteorológiai mezőket vehetik figyelembe (Wendum, 1998; Langner *et al.*, 1998). Nagy térbeli gradiensek esetén azonban, ha fix rácsfelosztású Euler-modellt használunk, akkor jelentős lesz a megoldás hibája. Ez különösen nagy probléma a pontforrásokból származó légszennyezők esetében, hiszen ekkor a kibocsátás helyének közelében igen nagy a koncentráció-gradiens. Ha durva rácsfelosztást használunk, akkor a kibocsátás azonnal nagy területre átlagolódik, ami szétkeni a meredek gradienst, és nagy numerikus diffúziót okoz. Ennek következtében a földközeli csóvában alábecsüljük a maximális koncentrációt és túlbecsüljük a csóva szélességét. A forráshoz közel finomabb felosztást használva ez a hiba jelentősen csökken.

A hibát más módszerrel is lehet csökkenteni, például Brandt és társai (1996) a *DREAM* modell kifejlesztése közben egy Lagrange-féle mezoskálájú modellt egy hosszútávú Euler-modellel egyesítettek. Ez a közelítés interpolációt igényel, amikor a szennyezőanyag

terjedését az Euler-féle modellel írjuk le. Hasonló ötletet használtak a svéd *MATCH* Euler-modellben (Lagner, 1998). A *MATCH* modell Lagrange részecskemodellt használ a kibocsátás első 10 órájában a függőleges transzportra, míg ugyanezen időtartam alatt Euler-féle közelítéssel írja le a vízszintes transzportot. Igen nagy számú részecskét kell kibocsátani ahhoz, hogy a vízszintes transzport előrejelzésének hibáját csökkenteni lehessen, és ez nyilvánvalóan több gépidőbe kerül. Ezek a multiskálájú közelítések jelentősen javították az előrejelzés pontosságát a nagyobb felbontás miatt a forrás közelében. Ennél a módszernél is fennmarad az a probléma, hogy amint a csóva elhagyja a forrás közelét, újra átlagolni kell a koncentrációkat a nagyobb Euler-féle rácsra. Brandt és társai (1996) úgy gondolták, hogy amint a csóva elhagyja a pontforrás közelét, a gradiensek olyan finommá válnak, hogy a módszer kis numerikus diffúzió okozta hibát eredményez. A tapasztalat azonban az, hogy mezoskálájú folyamatok esetén meredek koncentráció-gradiensek létezhetnek a csóva határain.

Az adaptív Euler-modell várhatóan nagyon alkalmas pontforrások kibocsátásának leírására, mivel automatikusan képes a rácsot ott finomítani, ahol nagy az anyagfajták koncentráció-gradiense. Sokkal alkalmasabb, mint a pontforrás környezetére kifesztett alrácsot alkalmazó modellek, mivel csak azokon a területeken finomítja a térbeli rácsot, ahol az valóban szükséges. A program csak olyan területeken finomítja a rácsot, ahol nagy numerikus hiba keletkezne, és olyan területeken nem, ahol azt a számolási pontosság nem kívánja meg.

Minden terjedési modellnél a leglényegesebb bemeneti adatok a meteorológiai adatok, mint például a szélmező, a hőmérséklet, a relatív páratartalom, a borultság. Ezek döntően meghatározzák a pontforrásból származó anyagfajták terjedését. Már az első *ETEX* kísérlet is megmutatta, hogy mennyire lényeges az, hogy a meteorológia adatok felbontása jó legyen függőleges irányban és hogy a modellek megfelelően használják fel ezeket az adatokat (Nasstrom és Pace, 1998). Sok numerikus szimuláció alapján megmutatták, hogy nagy felbontású szélmező-adatokra van szükség, és ilyeneket a mezoskálájú időjárás-modellezés nyújthat. Sørensen és társai (1998) képesek voltak reprodukálni az *ETEX* csóva kettős szerkezetét, amikor mezoskálájú időjárás-előrejelzést használtak, viszont nem, ha a durvább felbontású *ECMWF* adatokat (<http://www.ecmwf.int/>). A különbség fő oka az volt, hogy az *ECMWF* adatok az adott időszakban nem tartalmaztak egy mezoskálájú függőleges irányú anticiklon örvényt.

A szélsébségek és szélirányok függőleges szerkezetének fontosságát a második *ETEX* kísérlet mutatta meg, ahol a keveredési- és a felette lévő rétegben a csóva szétválását figyelték

meg (Bryall és Maryor, 1998). Ebben az esetben jelentős koncentrációkat mértek a csóva terjedési frontja mögött, s ezt a legtöbb tesztelt modell előre jelezte. Ezt a viselkedést a légrétegek közötti szélesség, illetve szélirány különbségek okozták. Ennek alapján a MET Office *NAME* modellje jelentős mennyiségű anyagot jósolt a keveredési réteg felett, szemben az első kísérlettel, ahol a szennyezőanyag a keveredési rétegen belül oszlott el.

Az *ETEX* kísérletek és azok szimulációja rámutattak több, a baleseti kibocsátás modelljének fejlesztése során felmerülő igen fontos kérdésre. Elsősorban arra, hogy mezoskálájú meteorológiai modellt kell használni, hogy olyan kis méretű skálaeffektusokat is képes legyen követni, mint a kis léptékű vízszintes örvények. A diszperziós modellnek képesnek kell lennie arra, hogy kezelje a nagy koncentráció-gradienseket akkor is, ha ezt a pontforrás és akkor is, ha ezt a mezoskálájú meteorológiai jelenségek okozták. Ezen megfontolások alapján az alábbiakban leírjuk az általunk kifejlesztett adaptív Euler-típusú modell egy gyakorlati alkalmazását, nagyfelbontású mezoskálájú meteorológiai adatokat felhasználva.