

Raport de activitate - Faza 2

pentru proiectul de cercetare AOSR 2018:

„Evaluarea stocării intermediare a deșeurilor radioactive de aluminiu și grafit rezultate din dezafectarea reactorului de cercetare de tip VVR-S al IFIN - HH utilizând codul de simulare numerică AMBER”

Faza 2:

MODELAREA TERMENULUI SURSĂ PENTRU DEPOZITUL FINAL DE DESEURI SLAB SI MEDI-U ACTIVE PROVENITE DIN DEZAFECTAREA REACTORULUI VVR-S UTILIZAND METODOLOGIA ISAM SI CODUL DE CALCUL AMBER

Autori: Alexandru Pavelescu, Carmen Tuca

Coordonator (mentor) AOSR: Prof Dr. Margarit Pavelescu

1. INTRODUCERE

Principalele obiective ale lucrării de față sunt:

- Evaluarea opțiunii de transformare a Depozitului de Stocare Intermediară de suprafață - fostul depozit de combustibil nuclear uzat – DCNU (vezi figura 1.1-1) - pentru deșeurile de aluminiu și grafit slab și medii active rezultate din dezafectarea reactorului nuclear de cercetare VVR-S, IFIN-HH în Depozit final. Acesta este situat în cadrul IFIN-HH, în apropierea clădirii reactorului aflat în ultima fază de dezafectare.
- Prezentarea metodologiei recomandate de către Agenția Internațională pentru Energie Atomică (AIEA) de la Viena, de evaluare a securității depozitelor utilizate pentru depozitarea definitivă a deșeurilor slab și medii active;
- Aplicarea metodologiei pentru evaluarea fiabilității pe termen lung a Depozitului Final de Deșuri Slab și Medii Active Depozitul final utilizând codul de calcul AMBER.

1.1 Starea actuală a depozitului

Clădirea depozitului este amplasată la suprafața unui teren de tip argilos (leoss). Depozitul conține celule de depozitare (fostele bazine de stocare a CNU) (vezi Fig. 1.1-1) în care urmează a fi amplasate modulele de depozitare din ciment a coștelor cu deșuri. De menționat că depozitul nu mai conține combustibil nuclear uzat acesta fiind repatriat în Federația Rusă încă din anul 2012. Celulele de depozitare propuse pentru stocarea deșeurilor de aluminiu și grafit slab și medii active provenite din dezafectarea reactorului sunt reprezentate de fostele bazine de stocare a Combustibilului Nuclear Uzat (CNU) (vezi Figura 1.1-2).

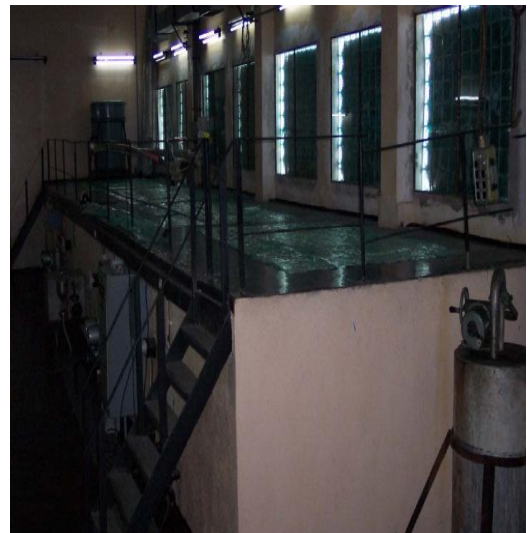
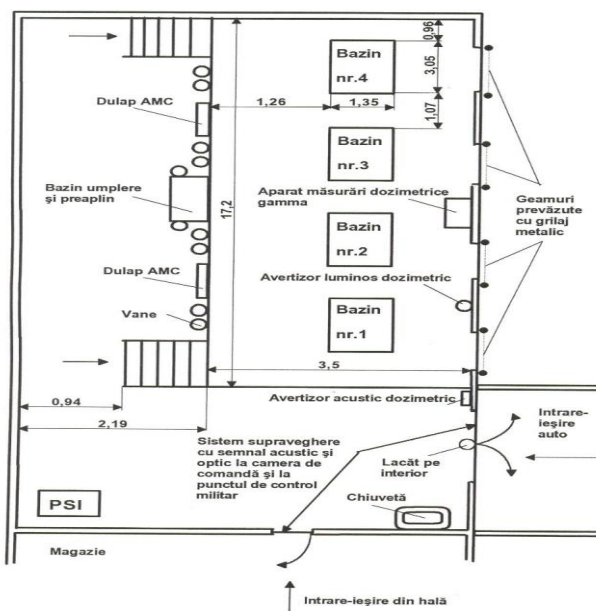


Fig. 1.1-1: Figura de ansamblu a DCNU [1]

Constructiv fiecare modul (bazin de depozitare) are pereții și fundul confecționate din aluminiu special de tip AlMg3, iar din punct de vedere dimensional se poate caracteriza astfel:

- dimensiuni interioare: lungime 2500 mm; lățime 770 mm; înălțime 5000 mm;
- dimensiuni exterioare: lungime 2750 mm; lățime 900 mm; înălțime 5700 mm;
- grosimea pereților: 10 mm; grosimea fundului: 15 mm

Bazinele au capace din fonta care protejeaza integritatea fizica a discurilor la eventuale cadere de obiecte in bazin si asigura protectie biologica pentru operatori. Bazinele sunt prevazute cu ventilatie si verificarea temperaturii ambiante.

Caracteristicile principale sunt: presiunea de regim - presiunea atmosferică; temperatura de regim: max. 60 °C. Modulele sunt protejate la exterior contra coroziunii cu două straturi de pânză îmbibate în bitum, de 2 cm grosime fiecare și rezistente la radiații conform testelor experimentale de 10^8 rad. Pe pereții laterali sunt prevăzute câte 6 fante pentru ventilație prin care, cu ajutorul unor canale, se realizează introducerea și evacuarea aerului.



Fig. 1.1-2: Vedere de sus bazin (matrice) de stocare DCNU

Deseurile de aluminiu rezultate din dezafectare

Componentelor activate și contaminate din aluminiu ale reactorului sunt amplasate inițial într-un butoi de inox de 220-l (Fig. 1.1-3.) care la rândul lui este introdus, din motive de securitate radiologică, într-un container de fonta tip eolRAD 50 de 260 l în situația în care doza admisă la peretele butoiului depășește valoarea maximă admisă de 2mSv/h prevăzută în NTR-01 - Norma privind cerințele de autorizare a activității de transport de materiale radioactive.

După efectuarea măsurătorilor dozimetrice aceste colete se transporta într-un loc special amenajat pentru depozitare, fostul Depozit de Combustibil Nuclear Uzat.



Figura 1.1-3 Butoi de inox de 220 l introdus in container tip EKOL Rad de 260 l [2]

In prezent sunt stocate deseuri de aluminiu in bazinul 3. In viitor se va depozita aluminiu si in bazinele 1 si 4.

Deseurile de grafit rezultate din dezafectare

Reactorul VVR-S a fost prevazut cu o coloana termica mobila (vezi figura 1.1-4) pentru cercetari in domeniul fizicii neutronilor. Constructiv este formata din 6 discuri de grafit incasetate in tabla de aluminiu si amplasate pe un carucior mobil.



Fig.1.1-4. Coloana termica

Ghidul IAEA TECDOC-1521/2006 prezinta metodele si practicile recomandate si agreate de IAEA pentru caracterizarea, tratarea si conditionarea grafitului radioactiv rezultat din dezafectarea reactorilor nucleari. Aceste practici nu sunt omologate ca si tehnologii ideale dar sunt acceptate deoarece asigura o securitate temporara a deseurilor pana la gasirea unei solutii pentru depozitare finala.

Exista trei modalitati de tratare a acestora: Depozitare finala in depozit terestru de adancime sau in mare/ocean; Distrugere prin incinerare; Reciclare. Fiecare din aceste modalitati au avantaje si dezavantaje si presupun costuri destul de mari iar in final nu este garantata rezolvarea stocarii definitive. Prin tratare rezulta reactii secundare, emisii de substante periculoase pentru mediu care contravin legislatiei in domeniu pentru tarile din Comunitatea Europeana. In momentul de fata exista o singura solutie mai viabila si anume imobilizarea in ciment Portland si depozitare in depozite de suprafata sau in depozite geologice de adancime.

Dupa dezmembrarea coloanei termice, pentru depozitarea a 5 discuri de grafit s-a ales solutia depozitarii acestora in bazinul 2. Cel mai mare disc nu poate fi depozitat in bazin din cauza gabaritului. Acesta a fost amplasat intr-un container de beton amplasat langa bazin. De mentionat ca materialul din care este confectionat bazinul este din aluminiu la fel ca si materialul in care este incasat grafitul deci nu sunt probleme de incompatibilitate.

2. METODOLOGIA GENERALĂ DE EVALUARE A SECURITĂȚII DEPOZITELOR DEFINITIVE DE DEȘEURI SLAB ȘI MEDIU ACTIVE

Predicția și evaluarea comportării unei instalații de depozitare definitivă a deșeurilor radioactive, din punct de vedere a securității, atât în timpul umplerii cu deșeuri cât și pe termen lung (după închidere) trebuie realizată în mod procedurat, după o metodologie bine pusă la punct, transparentă și ușor de verificat și justificat. Agenția Internațională pentru Energie Atomică de la Viena a coordonat, în ultimii ani, un proiect de cercetare în vederea dezvoltării unei metodologii unitare de evaluare a securității pentru depozitele de suprafață - Proiectul ISAM (“Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities”) (Referinta [1]). În vederea soluționării unor probleme specifice depozitelor de suprafață, identificate în prima etapă, Proiectul ISAM este continuat în prezent prin Proiectul ASAM – “Application of Safety Assessment Methodologies for Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facilities”.

Metodologia ISAM este prezentata in Fig. 2-1.

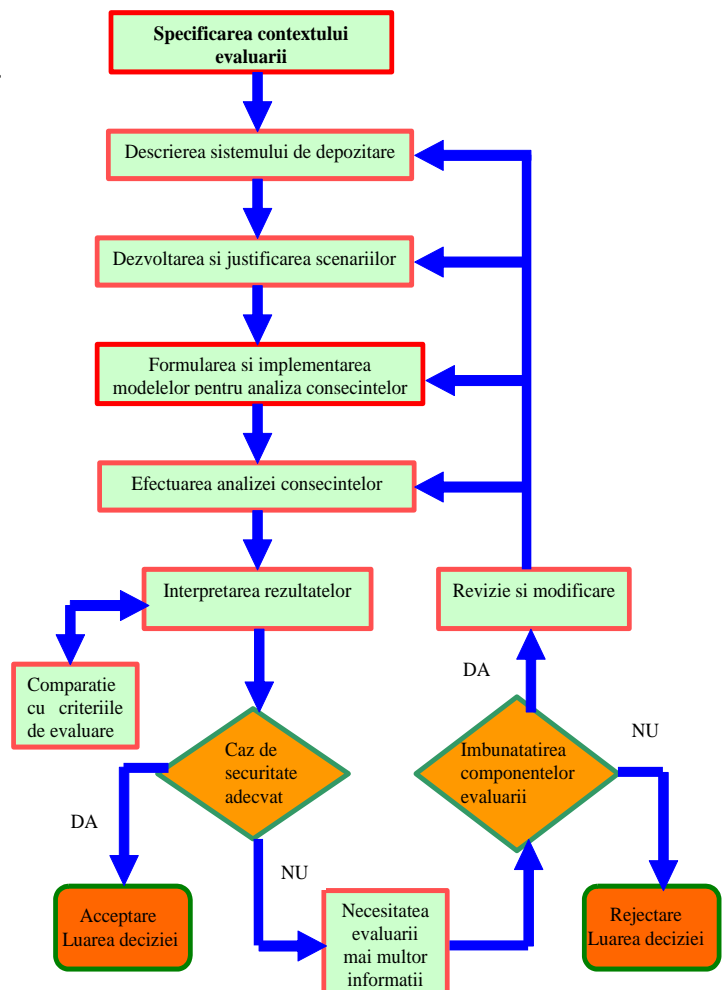


Figura 2-1 Metodologia ISAM de evaluare a securității

3. DEZVOLTAREA SCENARIILOR DE EVOLUȚIE PENTRU DEPOZITUL PROPUȘ PENTRU DEPOZITAREA FINALĂ A DEȘEURILOR SLAB ȘI MEDIU ACTIVE PROVENITE DE LA REACTORUL DE CERCETARE VVR-S, IFIN-HH

3.1. Conceptul depozitului

Ținând cont de tipurile de instalații utilizate pe plan mondial pentru depozitarea definitivă a deșeurilor slab și mediu active rezultate din operarea unui reactor nuclear de cercetare, depozitul propus este considerat a fi un **depozit de suprafață cu bariere multiple** (vezi Figura 3.1-1.).

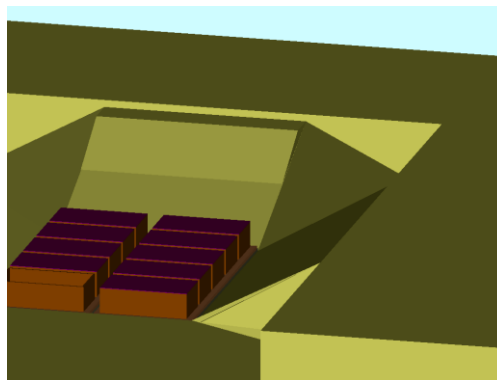


Figura 3.1-1 Vedere generală a depozitului propus pentru depozitarea finală a deșeurilor slab și mediu active provenite de la reactorul VVR-S

Deșeurile condiționate sau nu, după caz, și stabilizate prin cimentare într-o matrice de depozitare. Celulele sunt amplasate pe un subradier individual, care este la rândul său construit pe o pernă de loess compactat. Celulele vor fi acoperite cu un sistem de acoperire finală format din mai multe straturi izolante și drenante, cu rol de protecție, pe termen lung, împotriva precipitațiilor.

Din setul de scenarii stabilit pentru evaluarea fiabilității depozitului propus în vederea stocării finale a deșeurilor slab și mediu active provenite de la reactorul de cercetare VVR-S, au fost alese două scenarii din perioada post-închidere, și anume:

- scenariu de referință - de evoluție normală ;
- scenariu alternativ - de evoluție anormală, de tip eveniment disruptiv.

3.2 Barierele depozitului

a) Bariere ingineresti:

- matricea de stabilizare a deșeurilor împreună cu modulul de depozitare;
- celula de depozitare, împreună cu sistemul de colectare a apelor din celule, perna de loess compactat și sistemul de închidere finală a celulelor.

Matricea de depozitare (vezi figura 3.2-1) este formată prin cimentarea în modulele de depozitare a următoarelor tipuri de deșeuri :

- deșeuri solide necompactabile ambalate în butoaie metalice (butoaie metalice standard de 220 l folosite în mod curent la ambalarea deșeurilor radioactive);
- Compoziția materialului matricii de depozitare trebuie aleasă în concordanță cu practicile mondiale în domeniu, avându-se în vedere totodată cercetările referitoare la proprietățile diferiților aditivi ce ar putea fi adăugați în ciment (de ex. stabilitate chimică și fizică în timp, etc.).

Modulul de depozitare va fi un paralelipiped de beton armat prefabricat, care după umplere va fi acoperit cu un capac de beton. Soluția constructivă a modulului trebuie să fie astfel aleasă încât să asigure stabilitatea structurală (se va avea în vedere încărcarea maximă admisă cu deșeuri și material de umplutură), posibilitatea de manipulare a acestuia gol și încărcat, executarea umplerii și închiderea.

De asemenea, capacul trebuie să aibă la partea inferioară mustăți de ancoraj pentru ca structura încărcată cu deșeuri și acoperită cu capac să fie de tip monolit.

Celula de depozitare (Fig. 3.2-1, 3.2-2, 3.2-3 și 3.2-4) este un paralelipiped de beton armat, formată din planșeu și pereți, izolată contra umezelii la exterior, și având un sistem interior de colectare a posibilelor infiltrații, conceput astfel:

- Planșeul celulei este acoperit cu un beton poros și cu beton de pantă, astfel încât orice infiltrații pătrunse în celulă sunt dirijate spre un sifon de pardoseală, conectat la o conductă de drenaj.
- Conducta de drenaj (vezi figura 3.2-5) (propusă a se construi din polietilenă sau din alt material rezistent la coroziune, pentru a rămâne în funcțiune cât mai mult timp după închiderea depozitului) este conectată la un sistem de drenaj subteran amplasat în galeria de vizitare de sub celule.
- Apa ajunsă în colectorul din galeria de vizitare trebuie dirijată spre un bazin de colectare, pentru a fi monitorată și tratată, după caz, ca apă radioactivă sau neradioactivă.

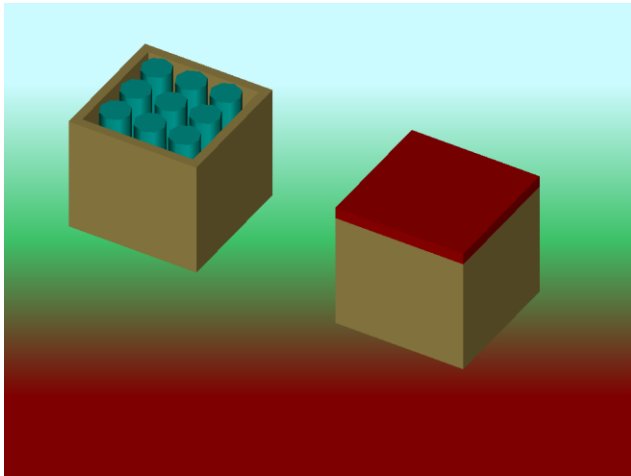


Figura 3.2 -1 Modulul de depozitare

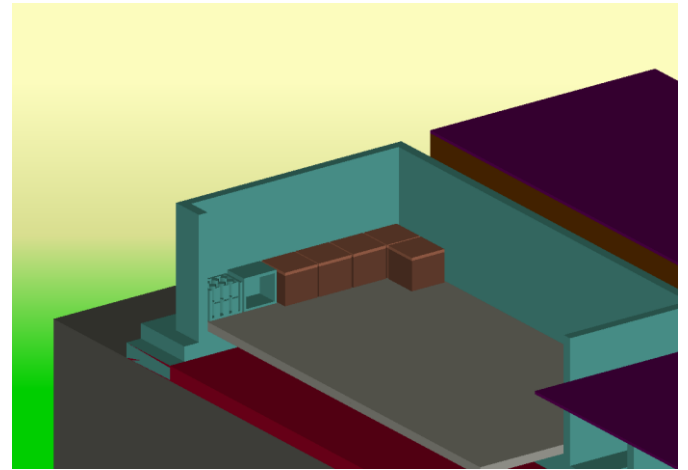


Figura 3.2-2 Secțiune printr-o celulă de depozitare

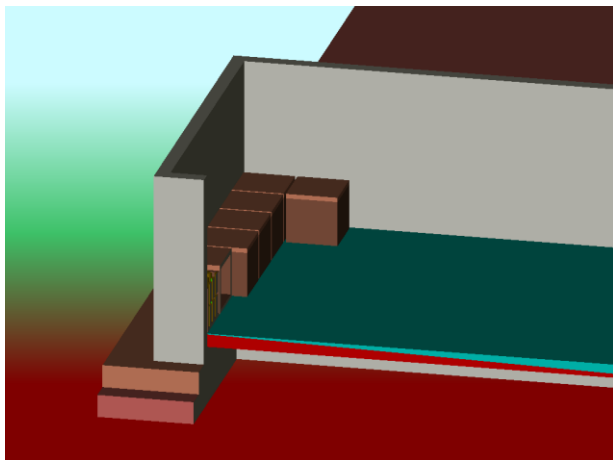


Figura 3.2-3 Secțiune printr-o celulă de depozitare. Detaliu de planșeu.

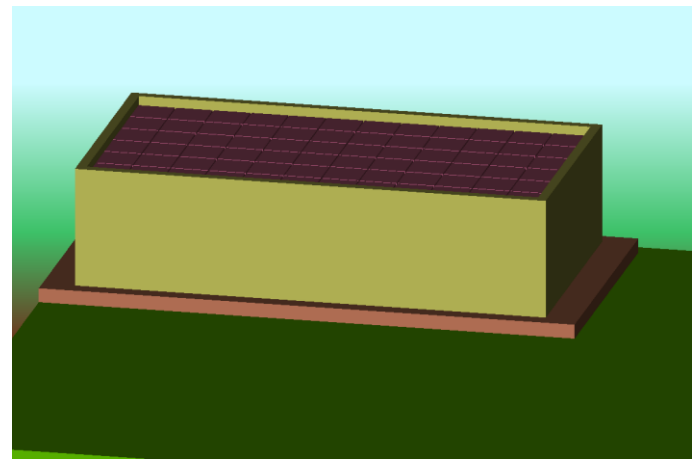


Figura 3.2-4 Celulă de depozitare umplută cu module

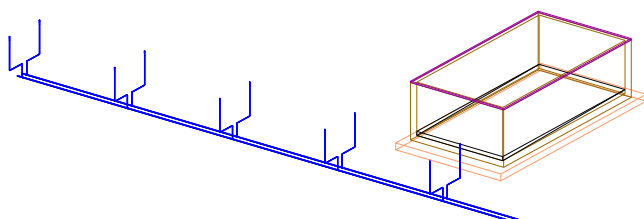


Figura 3.2-5 Sistemul de drenaj al celulelor

După umplerea cu module, celula va fi acoperită cu un capac de fonta.

Celulele, așezate fiecare pe câte un radier individual, sunt asezate pe o pernă de loess compactat.

După terminarea fazei de umplere a celulelor, acestea vor fi acoperite cu mai multe straturi de protecție care formează așa-zisul sistem de acoperire pe termen lung. Sistemul de acoperire pe termen lung este destinat să asigure protecția zonei de depozitare contra infiltrării apei, precum și împotriva altor agenți cum ar fi eroziunea și variațiile termice pe perioada de control instituțional, prevenind astfel deteriorarea celulelor, a modulelor și deci dispersia radionuclizilor în mediu. Această protecție va fi asigurată prin construirea unui acoperiș gros format din mai multe straturi cu rol de bariere bioingineresti, impermeabile și conductive (de drenare a apelor). La interfețele dintre straturile de acoperire și terenul natural va fi instalat un sistem de drenaj pentru colectarea apelor din straturile conductive. Aceste ape vor fi dirijate către bazinul de ape pluviale împreună cu apele din toată zona de depozitare.

b) Bariere naturale:

- straturile geologice de sub depozit .

Amplasament depozitului prezinta urmatoarele caracteristici:

- Zona este stabilă tectonic și seismic (relativ departe de faliile active seismice). Activitatea seismică a zonei este determinată de două focare seismice: zona Vrancea și zona Șabla (zona balcanică). Din aceste motive, structurile depozitului va trebui, totuși, să fie calculate la seism.
- Climatul zonei este adecvat (climă temperat continentală, precipitații normale pentru Romania).
- Mediul geologic este format din straturi de argilă, care au un rol important în absorbția sau retardarea radionuclizilor.
- Zona în care se consideră localizarea depozitului final este neinundabilă și nesaturată. Zona saturată este la aproximativ 45 m sub locul de amplasare a depozitului, iar acviferul principal este cantonat în calcarul barremian din zonă, la circa 75 m sub suprafața terenului.
- Amplasamentul se află în zona controlată a reactorului, ceea ce înseamnă personal redus în jurul depozitului; de asemenea, datorită apropierii față de acesta, transportul deșeurilor se va realiza pe un drum relativ scurt.
- Resursele naturale ale zonei sunt scăzute, ceea ce înseamnă că în viitor nu există pericolul ca să se realizeze explorări în scopul căutării de resurse minerale, în mediul în care e localizat depozitul.

3.3. Flux tehnologic preliminar

Deșeurile (condiționate sau nu, după caz) și ambalate în butoaie metalice sau în casete metalice speciale pentru cartușe filtrante, vor fi încărcate în modulele de depozitare și cimentate.

Înainte de condiționare și încărcare în module, butoaiile cu deșeurile va trebui să fie caracterizate, operațiune ce presupune determinarea cel puțin a următoarelor caracteristici:

- starea fizică, chimică;
- conținutul de radionuclizi (radionuclizii prezenți, concentrații);
- alte substanțe chimice prezente, mai ales substanțe toxice, periculoase, inflamabile, agenți de complexare, etc.;
- doza gama la suprafața butoiului (informații necesare din punct de vedere al condițiilor de manipulare);
- eventuala prezență a lichidelor libere;
- dacă deșeurile conținute sunt compactabile sau nu.

După umplere, fiecare modul va trebui să fie monitorat, măsurându-se doza la perete (tot din motive de manipulare). Va trebui, de asemenea, să fie caracterizate și modulele, mai ales în ceea ce privește radionuclizii prezenți și concentrațiile acestora. Toate aceste informații referitoare la caracterizarea deșeurilor depozitate sunt necesare pentru a se vedea dacă au fost depășite limitele de concentrație maxim admise (care trebuie stabilite, conform legii, la punerea în funcțiune a depozitului).

Modulele vor fi apoi transportate până la depozit, unde se vor recepționa și se vor așeza în celule, cu ajutorul podului rulant.. Printre module se va turna un material de umplutură (agregate utilizate la prepararea betoanelor). În final, peste întreaga suprafață se va turna un capac acoperitor de beton (cu pantă pentru scurgerea apelor).

După umplerea tuturor celulelor se va realiza sistemul de acoperire finală. Se va instala, de asemenea, un sistem de monitorare după închidere (puțuri de prelevare probe apă).

3.4 Descrierea sistemului de depozitare

Câmpul apropiat:

- Structurile de depozitare de tip barieră multiple, și anume:
 - matricea deșeurilor împreună cu modulul de depozitare;
 - celulele de depozitare prevăzute cu sistem de drenaj;

- perna de loess compactat (se presupune că sub fundația depozitului, materialul existent (*loessul*) va fi compactat în straturi succesive, cu grosimea totală de 2 m, în scopul de a îmbunătăți presiunea admisibilă)
- straturile de acoperire finală sunt cele descrise în Capitolul 3.1 al lucrării de față.
- Deșeurile vor fi deșeuri slab și mediu active solide și vor conține în principal următorii radionuclizi: H-3, Co-60, Ru-106, Cs-134, Cs-137, Ce-144, Sb-125, C-14, Ag-110m și Mn-54.
- Se consideră că depozitul are o suprafață totală de 3 celule de depozitare, fiecare dintre celule conținând 2 module (un modul conține $3 \times 2 = 6$ containere cu deseuri radioactive), deci în 6 module de depozitare (36 de containere). Cele 3 celule de depozitare sunt structuri monolite din beton armat cu dimensiuni de aproximativ $6 \times 4 \times 2.5$ m dispuse în linie.

Geosfera:

- Mediul geologic va fi format din următoarele straturi:
 - loess cu grosimea de 24,5 m (situat sub perna de loess compactat);
 - loess argilos cu grosimea de 11,5 m;
 - argilă roșie cu grosimea de 9 m;
 - argilă nisipoasă nesaturată cu grosimea de 2,5 m;
 - argilă nisipoasă saturată cu grosimea de 28,4 m așezate pe stratul adânc de calcar barremian. Zona saturată este situată la aproximativ 45m sub depozit, iar acviferul principal al zonei este cantonat în calcarul barremian, la aproximativ 75 m sub suprafața terenului.
- Acviferele secundare situate deasupra cotei acviferului principal sunt pungi de apă care nu comunică între ele.
- Zona este relativ stabilă tectonic, fiind departe de faliile seismice active.

Biosfera:

- Depozitul final s-a considerat că este situat în zona Controlată a Reactorului VVR-S în fostul depozit de combustibili nucleari uzat (DCNU). Cele mai apropiate localități sunt orașul Magurele (populație numeroasă, activități industriale și sociale intense).
- Depozitul este situat într-o zonă cu climă temperată, prin diferențe de temperatură mari dintre temperaturile maxime și minime.
- Apele de suprafață sunt Sabar și Ciorogarla,

- Alimentarea cu apă a orașului Magurele se face centralizat, de la rețeaua orașenească. În zonă există, de asemenea, fântâni individuale, alimentate din acviferele secundare ale zonei sau din acviferul principal.
- Principalele activități umane din zonă (în prezent) sunt: institutul IFIN-HH și ELI-NP și celelalte institute de pe platforma Magurele precum și activitățile industriale adiacente, activități de transport feroviar și rutier, stații de preparare a materialelor de construcții, activități agricole ale locuitorilor zonei (cultivarea plantelor și creșterea animalelor). Pot să existe, de asemenea, activități de agrement în raul Ciorogarla și pe malul raului Arges (pescuit, plajă, înot).
- Vegetația naturală a zonei este specifică zonelor de câmpie și de luncă (iarbă de câmpie, tufișuri specifice zonelor aride, salcâmi, arini, sălcii, ierburi de apă). Terenurile sunt cultivate cu grâu, porumb, viță de vie, pomi fructiferi pe lângă gospodăriile oamenilor.
- Animalele sălbatice sunt animale de talie joasă specifice zonelor de câmpie: iepuri, vulpi, prepelițe, alte păsări specifice câmpiei, insecte. În ape există pești comestibili.
- Animalele crescute de om sunt bovine, ovine, cabaline și păsări de curte.

4. MODELAREA CU AJUTORUL PROGRAMULUI DE CALCUL AMBER

4.1 Prezentarea generală a programului

AMBER a fost dezvoltat de firma Quintessa (UK) în colaborare cu Centro de Investigaciones Energeticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) – Spania, cu asistență suplimentară din partea Universității Politehnice din Madrid, a instituției Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A (ENRESA-Spania) și din partea corporației Japan Nuclear Cycle Development Institute (Japonia).

Versiunea AMBER disponibilă la IFIN-HH este versiunea 5.0.

Modelarea unui scenariu cu ajutorul programului AMBER are ca rezultat o Aplicație (Caz) AMBER.

Pentru evaluarea proceselor care descriu evoluția în timp a radionuclizilor dintr-un depozit de deșeuri radioactive, programul AMBER utilizează teoria compartimentelor.

Un compartiment reprezintă orice parte din sistemul care urmează a fi modelat. Se presupune că acest compartiment are următoarele caracteristici:

- limite bine determinate;

- proprietăți fizice și chimice omogene;
- concentrația de radionuclizi omogenă

Compartimentele sunt de tipul “donor” și “receptor”, în funcție de sensul de migrare/transfer al radionuclizilor între două compartimente.

Principalele caracteristici ale programului AMBER sunt următoarele:

- este o aplicație WINDOWS cu toate facilitățile ce decurg de aici;
- pentru modelare folosește orice număr de compartimente și orice număr de contaminanți (radionuclizi);
- între compartimentele modelului pot fi considerate mai multe tipuri de procese de transfer;
- este evaluată și comportarea radionuclizilor implicați în lanțuri de dezintegrare;
- procesele de transfer dintre compartimentele și procesele care descriu expunerea la radiații a populației sunt exprimate prin ecuații algebrice (care pot să fie dependente de timp);
- valorile parametrilor pot să fie prezentate determinist, probabilist sau fiind variabile în timp;
- rezolvarea ecuațiilor se face fie cu transformanta Laplace, fie în pași de timp;
- rezultatele pot fi prezentate fie grafic, fie tabelar și de asemenea, pot fi prelucrate cu Microsoft Excel.

4.2 Crearea unei aplicații cu programul AMBER

Pentru crearea unei aplicații cu programul AMBER, referitoare la un depozit final de deșeurii slab și mediu active, trebuie să se stabilească următoarele:

- scenariul care se dorește a fi evaluat și tipurile de parametri care trebuie calculați (doze, concentrații, etc.);
- modelul fizic al sistemului (compartimentele și procesele de transfer între acestea, rezultatele grafice);
- sursa de radionuclizi (compoziția deșeurilor);
- ecuațiile matematice care descriu procesele de transfer (modelarea matematică a scenariului);
- timpul de desfășurare a scenariului

După ce a fost stabilit modelul grafic al sistemului (într-o fereastră de lucru a programului) trebuie definiți toți parametri ce descriu modelul.

Parametrii utilizați de programul AMBER sunt de următoarele tipuri:

a) *parametri interni* - creați automat de programul de calcul după introducerea primelor date referitoare la scenariu; ei sunt de tipul factori de conversie între unitățile de măsură, mase atomice ale radionuclizilor folosiți în scenariu, constante de dezintegrare, sclari de proporționalitate, etc.);

b) *parametri dependenți de timp* - sunt acei parametri pentru care putem defini valori diferite la diverse momente de timp;

c) *parametri standard* - sunt toți parametri care depind sau nu de parametri dependenți de timp, și care intră în ecuațiile algebrice care descriu scenariul. Parametrii aceștia pot avea o valoare oarecare sau pot fi exprimați printr-o formulă algebrică;

d) *parametri aleși statistic* - sunt acei parametri pentru care trebuie precizată probabilitatea de distribuție;

e) *parametri de tip "observer"* - sunt acei parametri care definesc obiectivul final al calculului (doze, concentrații, flux, etc.);

Rularea programului se face numai după stabilirea timpului de desfășurare a scenariului și după stabilirea modului de rezolvare a ecuațiilor (în pași de timp sau cu transformanta Laplace). Pașii de timp se pot alege în serie aritmetică sau geometrică.

Rezultatele unui aplicații AMBER sunt stocate într-un fișier de date cu extensia: ".adf". Aceste rezultate pot fi prezentate fie sub forma unui Raport, generat automat de program și accesat la cerere, fie sub formă grafică.

Raportul este un fișier de tip text și conține informații referitoare la:

- cantitățile de radionuclizi din compartimente;
- fluxurile care descriu transferul între compartimente;
- parametrii modelului

Pentru obținerea rezultatelor sub formă grafică există opțiuni atât pentru graficele AMBER cât și pentru graficele Excel, obținute prin importul direct al datelor între cele două programe.

Pentru obținerea unui grafic AMBER se alege comanda "Graph" din meniul "Results" și se selectează mărimile care se doresc a fi vizualizate (concentrații, flux, doze datorate unuia sau mai multor radionuclizi luați în calcul). Scala de reprezentare poate fi liniară sau logaritmică. Mai trebuie alese: unitățile de măsură, gradațiile axelor, dimensiunea paginii ce conține graficul, denumirea graficului și denumirea axelor.

Graficul, odată realizat, are existență independentă de aplicația care l-a generat. Dacă aplicația este modificată, graficul nu se va modifica automat, ci se va genera altul nou, la cerere (în urma comenzilor "Calculate" și Graph"). Acest lucru este util pentru comparația rezultatelor obținute la variația, de exemplu, a unui parametru avut în vedere în aplicația respectivă.

De asemenea, datorită faptului că datele de intrare pot fi de tip parametri standard sau pot fi date alese statistic, programul AMBER poate fi folosit și pentru calcule probabiliste. Rezultatele unei astfel de aplicații pot fi folosite pentru analizele de incertitudine și de sensibilitate.

4.3 Modelarea matematică a scenariului post-închidere de referință

Modelele matematice transpun ipotezele modelului conceptual în forma matematică, în general sub forma unor ecuații algebrice, diferențiale și/sau integrale cuplate, fiecare având precizate condițiile inițiale și la limită adecvate pe domeniul specific. Aceste ecuații sunt rezolvate cu ajutorul soft-urilor computerizate pentru a obține dependențele spațiale și temporale ale cantităților de interes, care în cazul de față sunt dozele încasate de oameni, fluxurile de transfer și concentrațiile radionuclizilor în diverse compartimente ale modelului.

Înainte de a fi dezvoltate modelele matematice, în vederea corelării cerințelor codului de calcul cu gradul de detaliere a modelării matematice, trebuie decis codul de calcul ce va fi utilizat. În evaluările de securitate post-închidere pentru depozitul final considerat în cadrul acestei lucrări s-a utilizat codul AMBER, versiunea 5.0.

Codul AMBER utilizează ca abordare, în reprezentarea migrației și a comportării ulterioare în mediu a radionuclizilor, modelul compartimental. Această abordare impune două condiții asupra reprezentării matematice a sistemului de depozitare.

Prima condiție o reprezintă necesitatea discretizării sistemului într-o serie de compartimente. Utilizând abordarea modelării compartimentale, un sistem de depozitare poate fi reprezentat prin discretizarea sa în compartimente, care să corespundă caracteristicilor cheie identificate în cadrul modelului conceptual. Se consideră că, de îndată ce un contaminant pătrunde într-un compartiment, se produce amestecarea instantanee și astfel se ajunge la o concentrație uniformă a acestuia în întregul compartiment. De aceea, fiecare compartiment trebuie ales reprezentativ pentru o componentă a sistemului despre care se poate emite, în mod rezonabil, ipoteza menționată.

A doua condiție se referă la faptul că procesele rezultate în urma transferului contaminanților de la un compartiment la altul trebuie exprimate sub forma coeficienților de transfer, ce reprezintă fracțiunea din activitatea dintr-un anumit compartiment, transferată altui compartiment în unitatea de timp. Reprezentarea matematică a proceselor de transfer inter-compartimente se exprimă sub forma unei matrici de coeficienți de transfer, ce permite cantității compartimentale să fie reprezentată ca un set de ecuații diferențiale de gradul întâi.

Pentru compartimentul i , viteza cu care se schimbă în timp inventarul de radionuclizi din compartiment este dată de sistemul de ecuații următor:

$$\frac{dN_i}{dt} = \left(\sum_{j \neq i} \lambda_{ji} N_j + \lambda_N M_i + S_i(t) \right) - \left(\sum_{j \neq i} \lambda_{ij} N_i + \lambda_N N_i \right) \quad (4.3-1)$$

unde:

i și j reprezintă compartimentele;

N și M reprezintă cantitățile - inventarul (Bq) de radionuclizi N și M în compartiment (M este precursorul lui N în lanțul de dezintegrare);

$S(t)$ este o sursă externă, dependentă de timp, de radionuclizi N (Bq an⁻¹);

λ reprezintă transferul și rata de pierdere;

λ_N este constanta de dezintegrare a radionuclidului N (an⁻¹); iar

λ_{ji} și λ_{ij} exprimă coeficienții de transfer (an⁻¹) ce reprezintă aportul/pierderea de radionuclid N din compartimentele i și j .

Soluția matricii de ecuații (4.3.1-1) (dacă se rezolvă pentru toate compartimentele și transferurile din sistem) oferă un inventar dependent de timp pentru fiecare compartiment în parte. Ipotezele vizând volumele compartimentelor permit evaluarea concentrațiilor în respectivul mediu, de unde pot fi estimate dozele/incorporările încasate.

În continuare sunt prezentate formulele matematice utilizate în reprezentarea proceselor de eliberare și migrație și în reprezentarea mecanismelor de expunere identificate în cadrul modelului conceptual pentru Scenariul Post-închidere de Referință.

4.3.1 Scenariul Post-închidere de Referință: modelarea matematică a eliberării și transportului contaminanților din structurile de depozitare (campul apropiat)

În cadrul acestei evaluări de securitate, au fost modelate următoarele fenomene responsabile de eliberarea și transportul radionuclizilor din deșeuri:

- dezintegrarea radioactivă;
- adsorbția;
- advecția.

Modelarea matematică a proceselor de eliberare și transport al contaminanților din structurile de depozitare se bazează pe recomandările din Ref.[4].

Dezintegrarea este reprezentată prin Rata de dezintegrare (λ , în an⁻¹), care este dată de ecuația (4.3.1-1):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (4.3.1-1)$$

unde $t_{1/2}$ este timpul de înjumătățire a radionuclidului (an).

Adsorbția este descrisă prin fenomenul de retardare, care, pentru un compartiment dat, este dependent de radionuclid. Factorul de retardare R (adimensional) specific unui compartiment se calculează folosind ecuația (A3.1-2):

$$R = 1 + \frac{\rho Kd}{\vartheta_w} \quad (4.3.1-2)$$

unde:

ρ este densitatea uscată a compartimentului (kg/m^3);

Kd este coeficientul de sorbție a radionuclidului în compartiment (m^3/kg);

ϑ_w reprezintă fracțiunea de pori umpluți cu apă a compartimentului analizat (adimensional).

Densitatea ρ se calculează utilizând ecuația (4.3.1-3):

$$\rho = \rho_g (1 - \vartheta) \quad (4.3.1-3)$$

unde:

ρ_g este densitatea granulară a compartimentului (kg/m^3); iar

ϑ este porozitatea totală a compartimentului (adimensional).

Fracțiunea de pori umpluți cu apă ai unui compartiment ϑ_w se calculează utilizând ecuația (4.3.1-4):

$$\vartheta_w = \varepsilon \vartheta \quad (4.3.1-4)$$

unde:

ε reprezintă gradul de saturare (adimensional) în compartiment; iar

ϑ reprezintă porozitatea totală a compartimentului (adimensional).

Considerăm în mod conservativ că imediat ce apa a pătruns la radionuclizi, aceștia vor fi eliberați instantaneu din forma de deșeu și transportați prin advecție. Rata de transfer a contaminantului prin **advecție (leaching)**, λ_{flow} (/an) va fi dată de ecuația (4.3.1-5):

$$\lambda_{\text{flow}} = \frac{q}{L \vartheta_w R} \quad (4.3.1-5)$$

unde:

q reprezintă rata anuală de infiltrație a apei prin compartimentele depozitului (zona nesaturată) (m/an);

L reprezintă lungimea compartimentului, pe direcția curgerii apei, prin care este transportat radionuclidul (m);

ϑ_w reprezintă fracțiunea de pori umpluți cu apă a compartimentului (adimensional); iar

R reprezintă coeficientul de retardare - dependent de element (adimensional).

4.3.2 Scenariul Post-închidere de Referință: modelul matematic al geosferei

Procesele cheie din geosferă, ale căror ecuații vor fi descrise în continuare, sunt:

- dezintegrarea;
- adsorbția;
- advecția;
- dispersia.

Fenomenele de dezintegrare și adsorbție sunt descrise de ecuațiile prezentate anterior, fiind evident aplicabile la compartimentele geosferei.

Pentru compartimentele din zona nesaturată a amplasamentului, fenomenul de advecție este descris de ecuația (4.3.1-5), particularizată însă pentru zona nesaturată a geosferei (q reprezintă rata de infiltrație a apei prin compartimentele nesaturate). Pentru zona saturată, rata de infiltrație va fi dată de ecuația (4.3.2-6):

$$q = K \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4.3.2-6)$$

unde:

K reprezintă conductibilitatea hidraulică a compartimentului (m/an); iar

$\partial H / \partial x$ reprezintă gradientul hidraulic (adimensional).

În conformitate cu (Ref. A3-3), pentru zona saturată se consideră dispersia de tip "înainte" și „înapoi”, modelată prin ratele de dispersie între compartimentele i și j (dispersia „înainte”), respectiv j și i (dispersia „înapoi”).

Ratele de dispersie „înainte” și „înapoi” sunt date de ecuațiile (4.3.2-7) și (4.3.2-8).

$$\lambda_{D,ij} = \frac{a_x}{\Delta_x} \lambda_{flow,ij} \quad (4.3.2-7)$$

$$\lambda_{D,ij} = \frac{a_x}{\Delta_x} \lambda_{flow,ji} \quad (4.3.2-8)$$

unde:

$\lambda_{D,ij}$ = rata de transfer a contaminantului prin dispersie din compartimentul i în compartimentul j (/an)

a_x = lungimea de dispersie a compartimentului i, pentru dispersia „înainte”, respectiv lungimea de dispersie a compartimentului j, pentru dispersia „înapoi”, (m);

Δ_x = este distanța de-a lungul căreia se calculează gradientul pentru dispersia „înainte” și, respectiv, „înapoi”, (m);

λ_{flow} = rata de transfer prin advecție a contaminantului, în compartimentele saturate ale geosferei, (an⁻¹).

4.3.3 Scenariul Post-închidere de Referință: Modelul matematic al biosferei

Pentru a modela biosfera este necesar să facem distincție între două tipuri de compartimente: cele dinamice și cele aflate la echilibru. Compartimentele dinamice sunt baza pentru modelul biosferei și, în modelul nostru reprezintă compartimentele fântână și sol. Apa contaminată se scurge din geosferă către compartimentele dinamice, se produc transferuri între compartimente prin intermediul anumitor procese și apoi apa contaminată este asimilată de faună, floră și oameni. Cantitatea și concentrațiile contaminanților din aceste compartimente variază, în conformitate cu ecuația (4.3-1).

Compartimentele aflate la echilibru reprezintă acele compartimente pentru care concentrațiile contaminanților sunt direct legate de concentrațiile din compartimentele dinamice asociate. Ele sunt: atmosfera, flora, fauna și persoanele reprezentative din grupul critic (oamenii).

a) Procese ale compartimentelor dinamice

Dezintegrarea și adsorbția reprezintă procesele cheie din biosferă ce se manifestă în compartimentele dinamice.

Procesele cheie din biosferă ce apar la interfața dintre compartimentele dinamice sunt: advecția (infiltrația și curgerea prin acestea), dispersia, scurgerile, irigația, eroziunea, sedimentarea, inundarea și suspensiile.

În cele ce urmează vom prezenta numai ecuațiile considerate explicit în modelarea Scenariului Post-Închidere de Referință al depozitului final considerat pe baza practicii internaționale (Ref. [5]) și a recomandărilor din Ref. [6].

Procesele de dezintegrare, adsorbție și advecție sunt descrise de ecuațiile (4.3.1-1), (4.3.1-2) și (4.3.1-5) prezentate anterior, aplicabile la compartimentele biosferei. Menționăm că

compartimentul sol se consideră nesaturat, rata de infiltrație fiind cea din mediul natural al amplasamentului.

Rata de irigație – adică rata de transfer a radionuclizilor de la o fântână (considerată ca parte a biosferei, deși în realitate apa provine din ultimul compartiment considerat în modelarea geosferei) la solul asociat datorită irigației culturilor (în an^{-1}), λ_{irrig} , este data de ecuația următoare:

$$\lambda_{\text{irrig}} = \frac{A_{\text{irrig}} \cdot d_{\text{irrig}}}{\vartheta_w V R_w} \quad (4.3.3-9)$$

unde:

d_{irrig} reprezintă adâncimea apei de irigație aplicată culturilor (m an⁻¹);

A_{irrig} este aria de culturi irigate (m²);

ϑ_w este fracțiunea de pori umpluți cu apă a fântânii (adimensional);

V este volumul fântânii (m³);

R_w este coeficientul de retardare (adimensional) al fântânii.

Rata de transfer a radionuclizilor datorată extragerii apei pentru alte scopuri (an⁻¹), $\lambda_{\text{non-irrig}}$, este dată de ecuația:

$$\lambda_{\text{non-irrig}} = \frac{V_{\text{non-irrig}}}{\vartheta_w V R_w} \quad (4.3.3-10)$$

unde:

$V_{\text{non-irrig}}$ este volumul apei extras pentru alte scopuri în afară de irigație (m³ an⁻¹)

ϑ_w este fracțiunea de pori umpluți cu apă a fântânii (adimensional);

V este volumul fântânii (m³);

R_w este coeficientul de retardare (adimensional) al fântânii.

Rata de transfer a radionuclizilor prin **eroziunea** compartimentului, (în an⁻¹), λ_{eros} , este data de ecuația:

$$\lambda_{\text{eros}} = \frac{E_{\text{soil}}}{d_{\text{soil}}} \quad (4.3.3-11)$$

unde:

E_{soil} este rata de eroziune a compartimentului (m/an);

d_{soil} este adâncimea compartimentului în care apare eroziunea (m).

b) Mecanisme de expunere

Mecanismele de expunere ale persoanei reprezentative din grupul critic, identificate în modelul conceptual sunt:

- ingerarea de apă de băut;
- ingerarea de produse de cultură agricolă;
- ingerarea de produse animale;
- inhalarea de praf;
- iradierea externă de la sol.

În cele ce urmează sunt prezentate ecuațiile asociate fiecărui mecanism de expunere, bazate pe practica internațională (Ref. [5]) și pe recomandările din Ref.[6]. Doza totală efectivă - provenită de la fiecare radionuclid - încasată de un membru al grupului critic poate fi calculată prin însumarea dozelor efective, după toate căile de expunere. Ulterior, însumarea, după toți radionuclizii, a dozei totale efective pentru fiecare radionuclid conduce la doza totală efectivă încasată de un individ din grupul critic, provenită de la întregul inventar de radionuclizi, considerând toate căile de expunere.

Ingerarea de apă de băut

Doza individuală efectivă anuală încasată de un individ din consumul apei de băut (D_{wat} , în Sv/an) este dată de ecuația:

$$D_{wat} = C_w \text{Ing}_{wat} DC_{ing} \quad (4.3.3-12)$$

unde:

C_w este concentrația radionuclidului în apa extrasă din fântână ($Bq\ m^{-3}$) (se presupune că apa este tratată pentru eliminarea sedimentelor în suspensie);

Ing_{wat} este rata de ingerare individuală de apă (m^3/an); iar

DC_{ing} este coeficientul de doză pentru ingerare (Sv/Bq).

Concentrația radionuclidului în apa extrasă din fântână este dată de ecuația:

$$C_w = \frac{\text{Amount}}{\vartheta_w V R} \quad (4.3.3-13)$$

unde:

Amount este cantitatea (activitatea) de radionuclid în compartimentul de unde se extrage apa (Bq);

ϑ_w este fracțiunea de pori umpluți cu apă a compartimentului de unde se extrage apa (adimensional);

V este volumul compartimentului din care este extrasă apa (m³);

R este coeficientul de retardare al compartimentului de unde este extrasă apa (adimensional).

Ingerarea de produse din culturile agricole

Doza individuală efectivă anuală încașată de un individ din consumul culturilor, (D_{Crop} , în Sv/an), este data de:

$$D_{Crop} = C_{Crop} \text{Ing}_{Crop} DC_{Ing} \quad (4.3.3-14)$$

unde:

C_{Crop} reprezintă concentrația de radionuclid în produsul agricol cultivat (Bq/kg greutate proaspătă a culturii);

Ing_{Crop} este rata de ingerare individuală a culturii contaminate (kg greutate proaspătă/ an); iar

DC_{Ing} reprezintă coeficientul de doza pentru ingerare (Sv/Bq).

Termenul C_{Crop} se calculează utilizând ecuația (4.3.3-15):

$$C_{Crop} = (CF_{Crop} + S_{Crop}) C_{dry} + \frac{\mu_{Crop} d_{irrig} C_w}{Y_{Crop} \lambda_{weather} + N_{Crop} \text{Ing}_{Crop} 365} \quad (4.3.3-15)$$

unde:

CF_{Crop} reprezintă factorul de concentrație pentru cultură (Bq kg⁻¹ greutate proaspătă/Bq kg⁻¹ (greutate uscată a solului));

S_{Crop} reprezintă contaminarea solului de pe cultură (kg greutate uscată sol kg⁻¹ greutate proaspătă cultură);

C_{dry} este concentrația radionuclidului în solul uscat de suprafața (Bq/kg greutate uscată sol);

μ_{Crop} reprezintă fracțiunea interceptată din apa de irigație a culturii (adimensional);

d_{irrig} reprezintă adâncimea apei de irigare aplicată culturii (m/an);

C_w se calculează conform ecuației (4.3.3-13);

λ_{weather} reprezintă rata de îndepărtare a apei de irigare de pe cultură ca urmare a proceselor de alterare determinate de agenții meteorologici (rata de alterare datorată agenților meteorologici) (an^{-1});

N_{Crop} este densitatea de stocare a animalelor (m^{-2});

Y_{Crop} reprezintă producția obținută, exprimată în (kg greutate proaspătă a culturii $\text{m}^{-2} \text{an}^{-1}$).

Factorul 365 este aplicat pentru conversia de la zi^{-1} la an^{-1} .

Concentrația radionuclidului în solul uscat de suprafață este dată de ecuația:

$$C_{\text{dry}} = \frac{C_{\text{Soil}}}{\rho} \quad (4.3.3-16)$$

unde:

C_{Soil} reprezintă concentrația radionuclidului în sol (Bq/m^{-3}); iar

ρ reprezintă densitatea uscată a solului (kg/m^{-3}).

C_{Soil} este dată de ecuația:

$$C_{\text{Soil}} = \frac{\text{Amount}_{\text{Soil}}}{V_{\text{Soil}}} \quad (4.3.3-17)$$

unde:

$\text{Amount}_{\text{Soil}}$ reprezintă cantitatea de radionuclid în sol (Bq);

V_{Soil} este volumul compartimentului sol (m^3).

Ingerarea de produse animale

Doza individuală efectivă anuală încasată de un individ, datorită consumului produselor animale (D_{Cow} , în Sv/an) este data de:

$$D_{\text{Cow}} = C_{\text{Cow}} \text{Ing}_{\text{Cow}} DC_{\text{Ing}} \quad (4.3.3-18)$$

unde:

C_{Cow} reprezintă concentrația radionuclidului în produsul animal (Bq/kg greutate proaspătă de produs);

Ing_{Cow} reprezintă rata de consum individual a produsului animal contaminat (kg greutate proaspătă de produs an^{-1}); iar

DC_{Ing} reprezintă coeficientul de doză pentru ingerare (Sv/Bq).

Pentru animalele terestre, termenul C_{Cow} se calculează utilizând ecuația (4.3.3-19):

$$C_{Cow} = CF_{Cow} (C_{Crop} Ing_{Crop} + C_w Ing_{Coww} Ing_{Cows}) \quad (4.3.3-19)$$

unde:

CF_{Cow} reprezintă factorul de transfer prin ingerare pentru produsul animal (zi/kg (greutate proaspătă a produsului));

C_{Crop} reprezintă concentrația radionuclidului în hrana animalului (Bq/kg (greutatea proaspătă a furajelor));

Ing_{Crop} rata de consum de furaj contaminat de către animal (kg (greutate proaspătă) zi⁻¹);

C_w reprezintă concentrația radionuclidului în apa de adăpat a animalului (Bq/m³);

Ing_{Coww} reprezintă rata de consum a apei contaminate de către animal (m³/zi);

Ing_{Cows} rata de consum de către animal, de sol contaminat (kg (greutate umeda sol) zi⁻¹);

Inhalarea de praf

Doza individuală efectivă anuală încasată de un individ din inhalarea de praf (D_{Dust} , in Sv/an) este data de ecuația următoare:

$$D_{dust} = C_{Air} O_{Out} Ing_{Sed} DC_{Inh} \quad (4.3.3-20)$$

Unde:

C_{Air} este concentrația de radionuclid în aerul situat deasupra solului/sedimentului (Bq/ m³);

Inh_{Sed} reprezintă rata de respirație a individului aflat pe solul/sedimentul contaminat (m³/h);

DC_{Inh} reprezintă coeficientul de doză pentru inhalare (Sv/Bq),

O_{Out} reprezintă rata de ocupare individuală în exterior, pe solul/sedimentul contaminat (h/an).

Concentrația în aer este descrisă, la rândul ei, de ecuația:

$$C_{Air} = C_{dry} C_{Dust} \left(1 - \frac{1}{R}\right) \quad (4.3.3-21)$$

unde:

C_{dry} reprezintă concentrația radionuclidului în solul uscat de suprafață/sediment (Bq/kg greutate sol uscat);

R reprezintă coeficientul de retardare al compartimentului sol (adimensional);

C_{Dust} reprezintă nivelul de praf din aerul situat deasupra compartimentului sol (kg/m^3).

Iradierea externă de la sol

Doza individuală efectivă anuală pe care un individ o încasează în urma iradierii externe de la sol/sediment (D_{Ext} , în Sv/an) este data de ecuația:

$$D_{Ext} = C_{Soil} O_{Out} DC_{Ext} \quad (4.3.3-22)$$

unde:

C_{Soil} reprezintă concentrația în sol/sediment (Bq/m^3);

O_{Out} reprezintă rata de ocupare individuală în exterior, pe solul/sedimentul contaminat (h/an);

DC_{Ext} reprezintă coeficientul de doză pentru iradierea externă provenită de la sol/sediment ($Sv h^{-1}/Bq m^{-3}$).

4.4 Modelarea termenului sursă și evaluarea de securitate pentru scenariul de referință în perioada post-închidere (evoluția normală a depozitului)

Se consideră că lângă amplasamentul depozitului, în perioada post-închidere, există o fermă unde se cultivă plante (de ex. cereale, legume cu frunze verzi și rădăcinoase), și se cresc animale (de exemplu bovine pentru lapte).

Scenariul consideră următoarele **processe și fenomene**:

- migrarea radionuclizilor din depozit după închiderea acestuia, prin straturile geologice, până într-un acvifer local de unde apa poate ajunge într-o fântână;
- apa din fântână poate fi folosită ca apă de băut sau pentru irigații în grădina de legume.
- animalele sunt duse la pășunat pe o pășune necontaminată, dar sunt adăpate parțial cu apă contaminată, din fântâna aflată la fermă.

Grupul critic al scenariului este alcătuit din familia fermierului respectiv. Am considerat ca persoană reprezentativă în această evaluare un bărbat adult.

Căile de expunere sunt:

- ingerare de apă contaminată;
- ingerare de legume contaminate;

- ingerare de lapte contaminat;

Pentru Scenariul Post-Închidere de Referință al depozitului s-a dezvoltat un model conceptual prezentat în Figura 4-1.

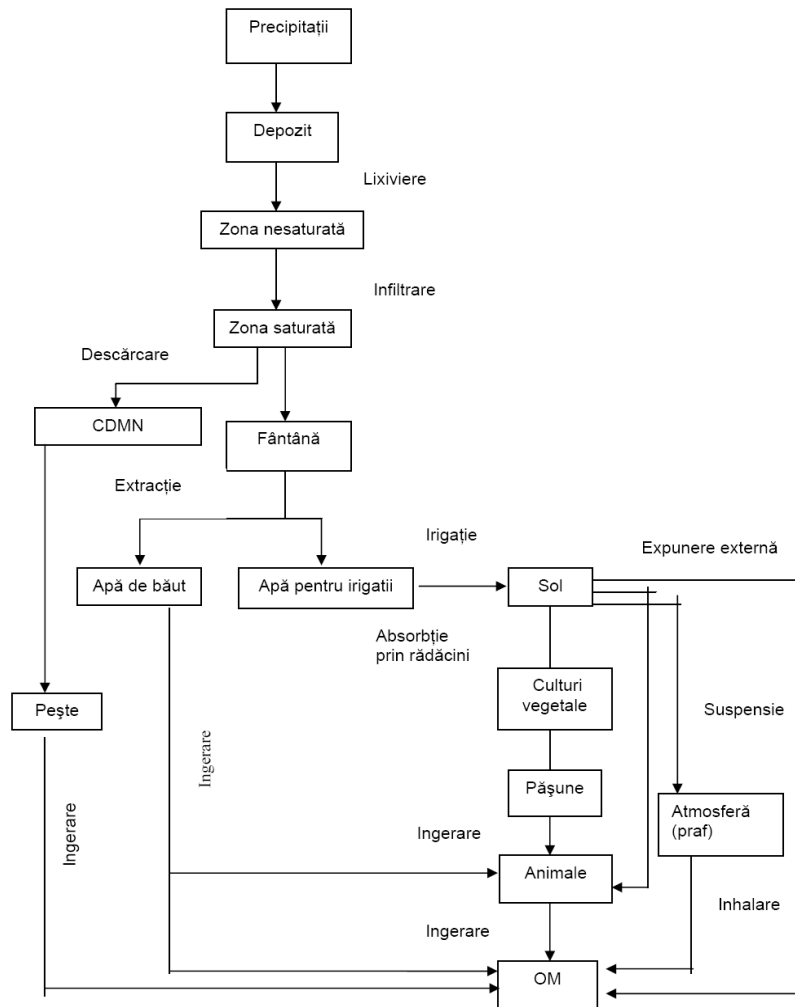


Figura 4-1 Modelul conceptual pentru Scenariul Post-Închidere de Referință

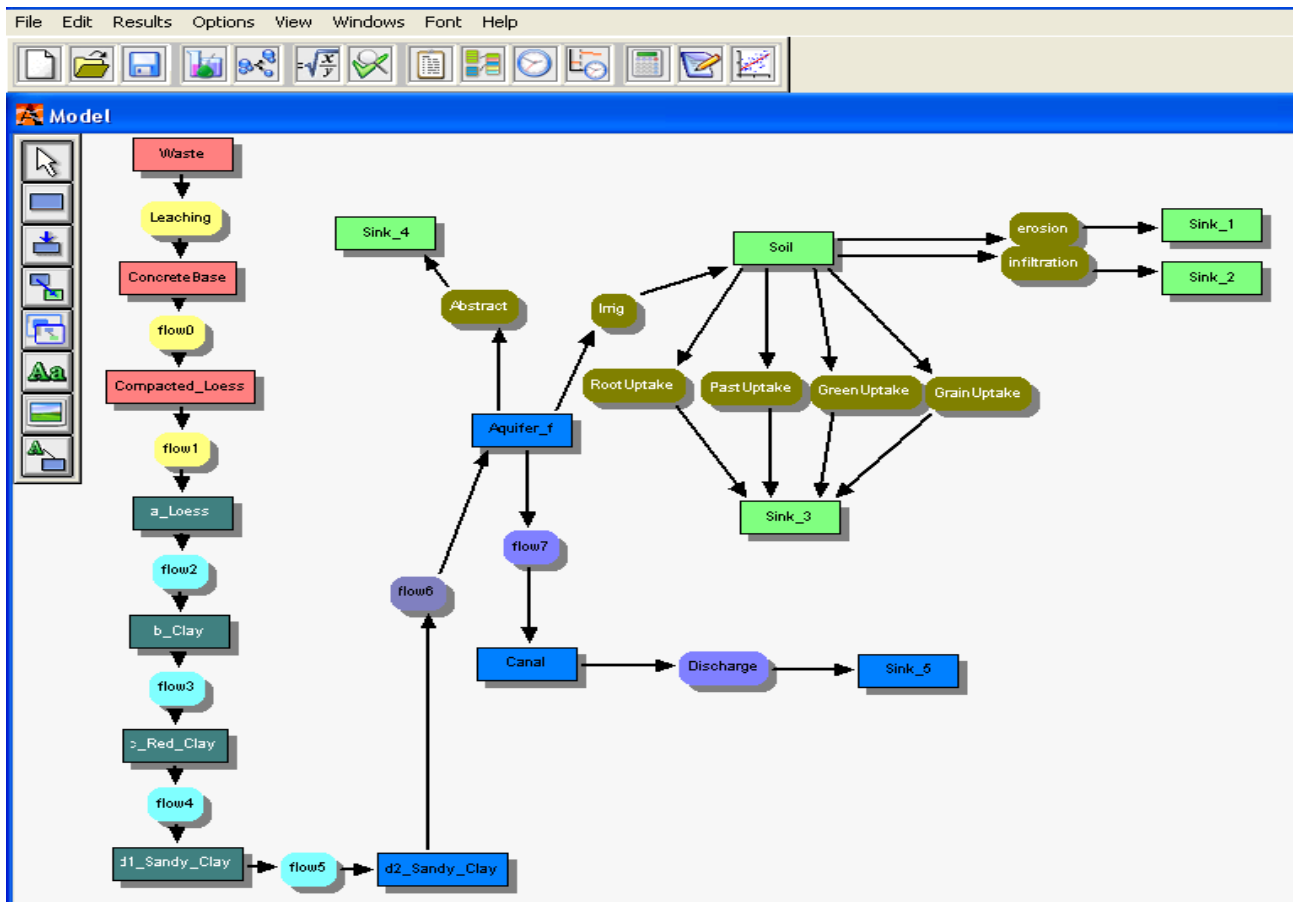


Figura 4-2 Modelul AMBER pentru Scenariul Post-Închidere de Referință al depozitului final considerat

5. CONCLUZII

În Faza 3 a proiectului de cercetare (livrabilă în decembrie) se vor prezenta rezultatele simularilor numerice obținute cu modelul prezentat în Capitolul 4 al prezentului raport utilizând termenul de sursă obținut în Faza 1 a proiectului.

Se va analiza situația normală de evoluție a depozitului (cazul scenariului de referință), adică existența unei ferme lângă amplasament în perioada post-închidere de utilizare liberă pentru a determina doze recepționate de persoanele din grupul critic, în cazurile unor valori teoretice maxime ale concentrațiilor de radionuclizi din depozit.

De asemenea se va analiza și un scenariu alternativ anormal post-închidere de evoluție a depozitului.

BIBLIOGRAFIE

1. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Results of a co-ordinated research project, IAEA, 2004, ISAM Project
2. DRAFT-TECDOC –XXX. A generic List of Features, Events and Processes (FEPs) for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA, February 2004
3. Application of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities (ASAM). Common Application Aspects Working Group - Assessment of Disruptive Events and Processes Position Paper, IAEA, 31 January 2005
4. Jin Beak Park, Joo-Wan Park, Eun-Young Lee and Chang-Lak Kim, Experiences from the source-term analysis of a Low and Intermediate Level Radwaste Disposal Facility, WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, Arizona, USA
5. AEA TECDOC No.1380, Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, Vienna, 2003
6. Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Results of a co-ordinated research project. Volume 1 Review and enhancement of safety assessment approaches and tools; Volume 2: Test Cases. IAEA-ISAM-2, Vienna, 2004
7. AMBER Computer Code v.5, Reference Guide , Enviro and Quintessa Ltd, UK, 2006

Științe Fizice

Coordonator:

Prof. univ. dr. Mărgărit Pavelescu



Întocmit

Dr. Alexandru Octavian Pavelescu,



Data: 25.09.2018