

Raport de activitate - Faza 3

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 3: EVALUAREA RISCURILOR RADIOLOGICE PE TERMEN LUNG ASOCIATE MEMBRILOR PUBLICULUI SI LUCRATORILOR

Autori: Dr. Alexandru Pavelescu, Dr. Carmen Tuca

Coordonator (mentor) AOSR: Prof Dr. Mărgărit Pavelescu

1. Introducere

Prezentul raport de cercetare se refera la evaluarea de securitate privind comportarea în timp a depozitului de stocare intermediara a deeurilor de grafit și aluminiu rezultate din dezafectarea reactorului nuclear de cercetare tip VVR-S al IFIN-HH. Analiza ia în calcul două scenarii de evoluție pentru depozit utilizând codul de calcul Amber 5.5, generate de prezenta inventarului radioactiv stocat pe acest amplasament:

- scenariu normal (de referință);
- scenariul anormal (disruptiv).

2. Prezentarea generală a programului AMBER

AMBER este o aplicație WINDOWS dezvoltată 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 5.5.

Pentru evaluarea proceselor care descriu evoluția în timp a radionuclizilor dintr-un depozit de deșeurii radioactive, programul utilizează teoria compartimentelor (vezi figura 2.1). Un compartiment reprezintă orice parte din sistemul care urmează a fi modelat presupunând că acesta 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.

Pentru modelare AMBER 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 astfel și comportarea radionuclizilor implicați în lanțuri de dezintegrare. Procesele de transfer dintre compartimente și cele care descriu expunerea la radiații a populației sunt exprimate prin ecuații algebrice dependente de timp. Valorile parametrilor pot să fie prezentate deterministic sau probabilistic în funcție de timp. Rezolvarea ecuațiilor se face pe rând pe baza transformării Laplace fie în pași de timp.

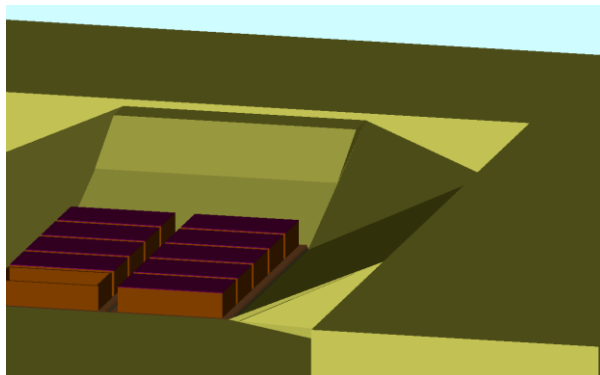


Figura 2.1 Vedere generală a depozitului propus pentru depozitarea finală a deșeurilor slab și mediu active provenite de la reactorul VVR-S

La utilizarea codului AMBER în cazul unui depozit final de deșeurii slab și mediu active se stabilesc:

- 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) se definesc toți parametrii care 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; de tipul factori de conversie între unitățile de măsură, mase atomice ale radionuclizilor folosiți în scenariu, constante de dezintegrare, scalari de proporționalitate, etc.);

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

c) *parametri standard* - 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) *parametrii aleși statistic* - parametri pentru care trebuie precizată probabilitatea de distribuție;

e) *parametri de tip "observer"* - 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 transformarea 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". și pot 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 probabilistice. Rezultatele unei astfel de aplicații pot fi folosite pentru analizele de incertitudine și de sensibilitate.

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

3.1 Descriere scenariului

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/carne contaminate;
- ingerare de lapte contaminat.

3.2 Model conceptual

Pentru Scenariul Post-Închidere de Referință al depozitului s-a dezvoltat un model conceptual general prezentat în Figura 1. Formulele matematice utilizate în reprezentarea proceselor de eliberare și migrație și în reprezentarea mecanismelor de expunere identificate în modelul conceptual pentru Scenariul de Referință, sunt prezentate la secțiunea 3.3. Formulele pentru calculul dozelor, pe cele trei căi de expunere, formulele detaliate de calcul pentru concentrația radionuclizilor în apă și în produsele agricole de origine vegetală (legume cu frunze verzi, de ex. salată) sau animală (de ex. lapte) și datele de intrare sunt prezentate în secțiunile 3.3.1÷3.3.3. Parametrii utilizați în calcule au fost preluate din literatura de specialitate (vezi Tabelele 3-1÷3-6).

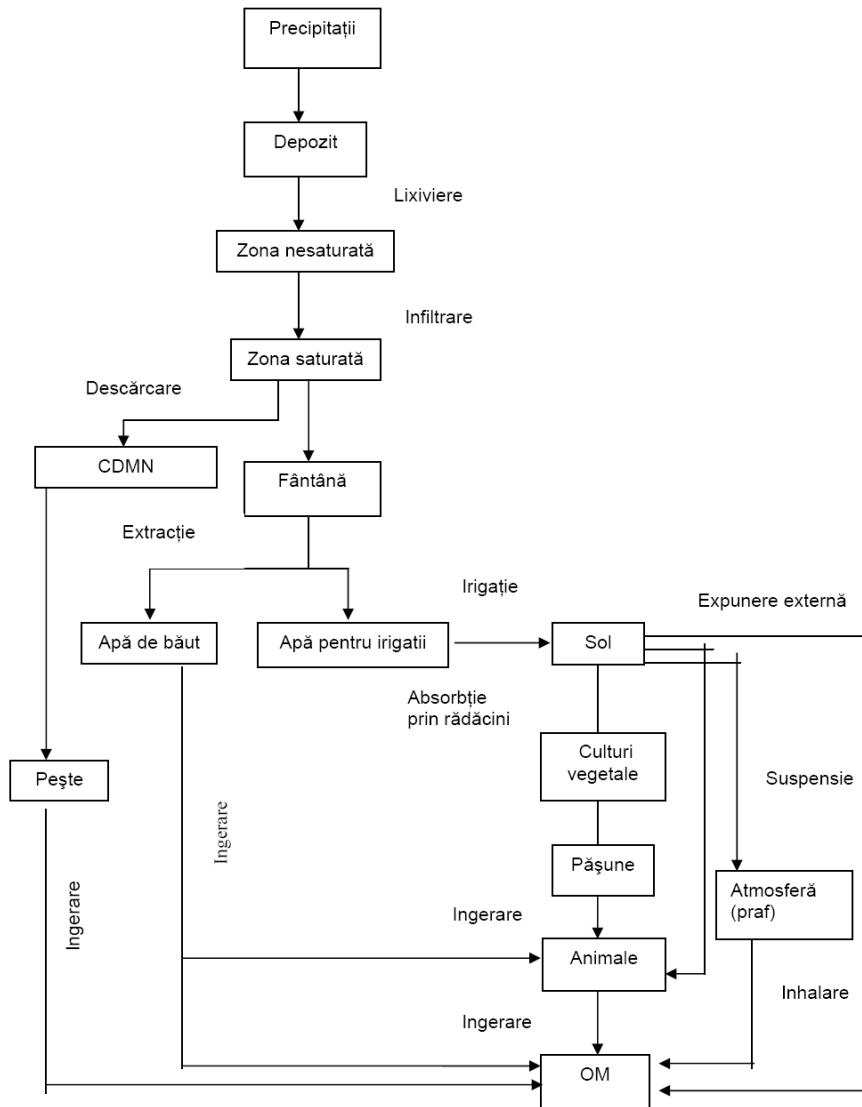


Figura 3.2-1. Modelul conceptual pentru scenariu de referință

3.3 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 initiale 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 5.5.

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. Astfel, sistemul 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 radionuclid pătrunde într-un compartiment, se produce amestecarea instantanee a acestuia în apa și astfel se ajunge la o concentrație uniformă a acestuia în întregul compartiment (vezi fig. 2.1).

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 cantitățile 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 în compartimentul i este dată de sistemul de ecuații 3.3-1:

$$\frac{dN_i}{dt} = \left(\sum_{j \neq i} \lambda_{ji} N_j + \lambda_N M_i + S_i(t) \right) - \left(\sum_{j \neq i} \lambda_{ij} N_i + \lambda_N N_i \right) \quad (3.3-1)$$

unde:

i și j - compartimentele;

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

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

λ - transferul și rata de pierdere;

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

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

Soluția matricii de ecuații (3.3.1-1) (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-inchidere de Referință.

3.3.1 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 (an^{-1}), care este dată de ecuația (3.3.1-1):

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (3.3.1-1)$$

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 (3.3.1-2):

$$R = 1 + \frac{\rho K_d}{\vartheta_w} \quad (3.3.1-2)$$

unde:

- ρ este densitatea uscată a compartimentului (kg/m^3);
- K_d 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 (3.3.1-3):

$$\rho = \rho_g (1 - \vartheta) \quad (3.3.1-3)$$

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 (3.3.1-4):

$$\vartheta_w = \varepsilon \vartheta \quad (3.3.1-4)$$

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 (3.3.1-5):

$$\lambda_{flow} = \frac{q}{L \vartheta_w R} \quad (3.3.1-5)$$

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).

3.3.2 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 (3.3.1-5), 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 (3.3.2-6):

$$q = K \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3.3.2-6)$$

unde:

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

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

În conformitate cu (Ref. 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 (3.3.2-7) și (3.3.2-8).

$$\lambda_{D,ij} = \frac{a_x}{\Delta_x} \lambda_{flow,ij} \quad (3.3.2-7)$$

$$\lambda_{D,ji} = \frac{a_x}{\Delta_x} \lambda_{flow,ji} \quad (3.3.2-8)$$

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}).

3.3.3 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 (3.3-1). 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 (3.3.1-1), (3.3.1-2) și (3.3.1-5) 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 dată de ecuația următoare:

$$\lambda_{\text{irrig}} = \frac{A_{\text{irrig}} \cdot d_{\text{irrig}}}{\vartheta_w V R_w} \quad (3.3.3-9)$$

unde:

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

A_{irrig} este aria de culturi irigate (m^2);

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

V este volumul fântânii (m^3);

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:

$$\lambda_{\text{non-irrig}} = \frac{V_{\text{non-irrig}}}{\vartheta_w V R_w} \quad (3.3.3-10)$$

unde:

- $V_{\text{non-irrig}}$ este volumul apei extras pentru alte scopuri în afară de irigație ($\text{m}^3 \text{an}^{-1}$)
- ϑ_w este fracțiunea de pori umpluți cu apă a fântânii (adimensional);
- V este volumul fântânii (m^3);
- 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:

$$\lambda_{\text{eros}} = \frac{E_{\text{soil}}}{d_{\text{soil}}} \quad (3.3.3-11)$$

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; produse de cultură agricolă; 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} [Sv/an] este dată de ecuația:

$$D_{wat} = C_w \text{Ing}_{wat} DC_{ing} \quad (3.3.3-12)$$

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

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

$$C_w = \frac{\text{Amount}}{\varrho_w V R} \quad (3.3.3-13)$$

unde:

- Amount – activitatea radionuclidului în compartimentul de unde se extrage apa (Bq);
- ϱ_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 (m^3);
- R este coeficientul de retardare al compartimentului de unde este extrasă apa (adimensional).

Ingerarea de produse din culturile agricole

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

$$D_{Crop} = C_{Crop} \text{Ing}_{Crop} DC_{ing} \quad (3.3.3-14)$$

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 doză pentru ingerare (Sv/Bq).

Termenul C_{Crop} se calculează utilizând ecuația (3.3.3-15):

$$C_{Crop} = (CF_{Crop} + S_{Crop})C_{dry} + \frac{\mu_{Crop}d_{irrig}C_w}{Y_{Crop}\lambda_{weather} + N_{Crop}Ing_{Crop}365} \quad (3.3.3-15)$$

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 (3.3.3-13);

unde:

- $\lambda_{weather}$ 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 $m^{-2} an^{-1}$).

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

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

$$C_{dry} = \frac{C_{Soil}}{\rho} \quad (3.3.3-16)$$

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:

$$C_{Soil} = \frac{Amount_{Soil}}{V_{Soil}} \quad (3.3.3-17)$$

unde:

- Amount_{Soil} reprezintă cantitatea de radionuclid în sol (Bq);
- V_{Soil} este volumul compartimentului sol (m³).

Ingerarea de produse animale

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

$$D_{Cow} = C_{Cow} Ing_{Cow} DC_{Ing} \quad (3.3.3-18)$$

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 (3.3.3-19):

$$C_{Cow} = CF_{Cow} (C_{Crop} Ing_{Crop} + C_w Ing_{Coww} Ing_{Cows}) \quad (3.3.3-19)$$

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} , în Sv/an) este data de ecuația următoare:

$$D_{dust} = C_{Air} O_{Out} Inh_{Sed} DC_{Inh} \quad (3.3.3-20)$$

unde:

C_{Air} este concentrația de radionuclid în aerul situat deasupra solului/sedimentului (Bq/m^3);

Inh_{Sed} reprezintă rata de respirație a individului aflat pe solul/sedimentul contaminat (m^3/h);

DC_{Inh} reprezintă coeficientul de doza 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:

$$C_{Air} = C_{dry} C_{Dust} \left(1 - \frac{1}{R}\right) \quad (3.3.3-21)$$

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_{Exts} , în Sv/an) este data de ecuația:

$$D_{Exts} = C_{Soil} O_{Out} DC_{Exts} \quad (3.3.3-22)$$

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

3.4 Date de intrare in model

In Figura 2 este prezentata inputul de date folosit in interfata grafica cu utilizatorul a codului AMBER 5.5 pentru Scenariul Post-Închidere de Referință al depozitului considerat. Acesta reprezinta o transpunerea a modelului conceptual prezentat anterior in Figura 3.4.1.

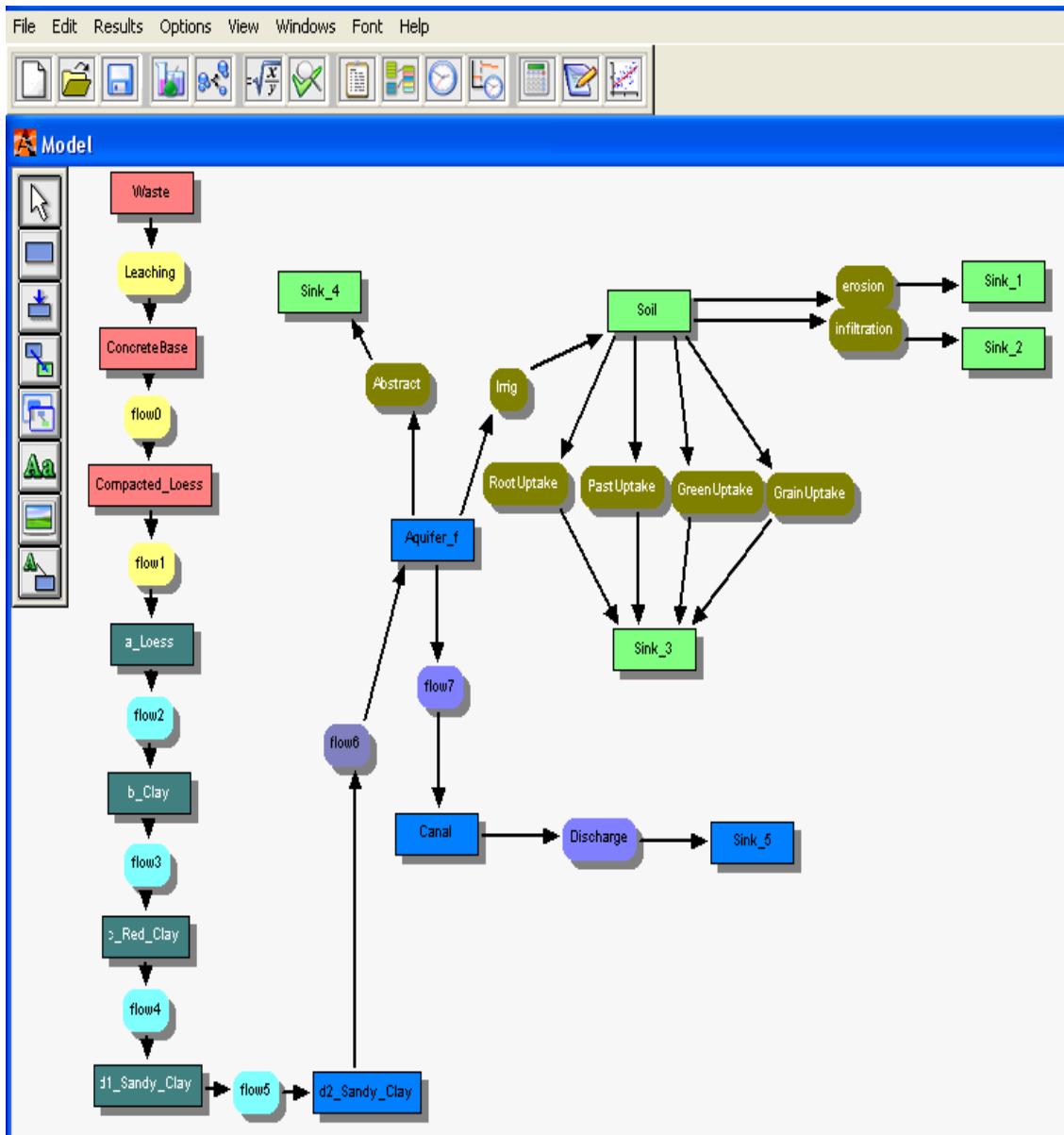


Figura 3.4.1. Modelul depozitului utilizat in codul AMBER 5.5

Tabel 3-1 Parametrii de bază folosiți la evaluarea de securitate post-închidere

Denumire parametru (unitate de măsură)	Simbol în codul de calcul AMBER	Valoare	Multiplicitate
Rata de infiltrație în compartimente, echivalentă cu adâncimea de infiltrare a apei provenită din precipitații (mm/an)	Adv_flow	[Concrete]: Adv_cap [DispFacility]: Adv_cap [Sat]: Adv_cap [Unsat]: Adv_cap [Usoil]: 0,131 mm/an	Tip de compartiment
Rata de infiltrație prin straturile de acoperire pe termen lung ale depozitului	Adv_cap	0,079 pentru t<500 ani 0,223 pentru t>500 ani	
Rata de respirație a unui adult în exteriorul locuinței m ³ /h	BR	1	
Factor de concentrație prin ingerare pentru produsele de origine animală (carne și lapte) zi/kg (greutate proaspătă de produs) și zi/l	CF_cow	Vezi Tabel 3-2.	Element Tip de produs animal
Factorul de concentrație pentru culturile agricole (Bq/kg) (greutate de culturi proaspete) sau greutate uscată de sol)	CF_crop	Vezi Tabel 3-2.	Element Tip de culturi agricole
Factorul de conversie a dozei pentru ingerare (Sv/Bq)	DF_Ing	Vezi Tabel 3-3.	Contaminant
Factorul de conversie a dozei pentru inhalare (Sv/Bq)	DF_Inh	Vezi Tabel 3-3.	Contaminant
Factorul de conversie a dozei pentru iradierea externă provenită de la sol (Sv/h)/(Bq/kg)	DF_exts	Vezi Tabel 3-3.	Contaminant
Concentrația de radionuclizi în hrana animalelor (Bq/kg greutate proaspătă furaje)	C_Foddcow	Input caz referinta	Contaminant
Concentrația de radionuclizi în compartiment Bq/m ³	C_comp	Amount/V_comp	Contaminant Compartiment
Concentrația de radionuclizi în produsele de origine animală (carne și lapte) (Bq/kg)	C_cow	Input caz referinta	Contaminant Produs animal
Concentrația de radionuclizi în produsul agricol cultivat (cereale, vegetale, radacinoase, pășune) (Bq/kg)	C_crop	Input caz referinta	Contaminant Produs agricol

Raport de activitate - Proiect de cercetare AOSR 2018 - Faza 3

Concentrația de radionuclid în pește (Bq/kg)	C_fish	Input caz referinta	Contaminant
Doza individuală anuală datorată ingestiei de contaminanți din produsele de origine animală (Sv/an)	D_cow	$Ing_cow * DF_Ing * C_cow$	Contaminant Produs animal
Doza individuală anuală datorată ingestiei de produse agricole (Sv/an)	D_crop	$Ing_crop * DF_Ing * C_crop$ pentru [Pasture]: 0	Contaminant Produs agricol
Doza individuală anuală încasată de un individ din inhalarea de praf (Sv/an)	D_dust	$DF_Inh * BR * O_comp[Soil] * CM_compdry * dust$	Contaminant
Doza individuală datorată iradierii externe provenită de la sol	D_exsed	$O_comp[Soil] * DF_exts * CM_compdry$	Contaminant
Doza individuală anuală datorată consumului de pește (Sv/an)	D_fish	$Ing_fish * DF_Ing * C_fish$	Contaminant
Doza datorată tuturor căilor de ingestie (Sv/an)	D_ingest	$D_wat + D_crop[Grain] + D_crop[Green] + D_crop[Root] + D_cow[CowMeat] + D_cow[CowMilk] + D_fish$	Contaminant
Doza individuală anuală după toate căile de expunere (Sv/an)	D_tot	$D_crop[Green] + D_wat + D_cow[CowMilk]$	Contaminant
Doza individuală anuală datorată consumului de apă (Sv/an)	D_wat	$Ing_wat * DF_Ing * C_comp[Aquifer_f] * FF_w$	Contaminant
Adâncimea compartimentelor (m)	Depth	Vezi Tabel 3-5.	Compartiment
Adâncimea de irigare a solului (m/an)	Depth_irr	0,3	
Activitatea totală a fiecărui radionuclid pe unitatea de depozitare (Bq)	Disposal	Disposal_Act	Contaminant
Activitatea totală a fiecărui radionuclid pe unitatea de depozitare (celulă): avem 10 celule cu aceeași activitate fiecare (Bq)	Disposal_Act	Vezi Input inventar radioactivitate	Contaminant
Criteriu de doză (Sv)	DoseCriterion	0,001	
Funcția de distribuție a probabilităților de avariere a unității de depozitare (-)	F	1	
Fracțiunea de activitate în apa extrasă din fântână, relativ la concentrația din acvifer (-)	FF_w	$1 / (R(Cont_to_Elem)[Aquifer_f] * theta_w[Aquifer])$	Contaminant
Conductivitatea hidraulică (m/an)	H_con	Vezi Tabel 3-4.	Tip de compartiment
Gradientul hidraulic (-)	H_grad	0,005 pentru [Concrete]: 0	Tip de compartiment
Rata de consum de furaj contaminat de către animale Kg (greutate proaspătă)/zi	IngC_Fodd	50	

Raport de activitate - Proiect de cercetare AOSR 2018 - Faza 3

Rata de consum de către animal de sol contaminat Kg (greutate umedă sol)/an	IngC_Sed	0,6	
Rata de consum a apei de către animale (m ³ /an)	IngC_wat	0,06	
Rata de ingerare individuală a produselor de origine animală (Kg/an) pentru carne, (l/an) pentru lapte	Ing_cow	Ingerare carne: 95 kg/an Ingerare lapte : 350 l/an	Produs animal
Rata de ingerare individuală a culturilor agricole (kg/an)	Ing_crop	Cereale :148; Vegetale : 62; Rădăcinoase :235; Pasune: 0	Produs animal
Consumul anual de pește (Kg/an)	Ing_fish	10	
Rata de ingestie a apei de către om (m ³ /an)	Ing_wat	0,73	
Rata de transfer a radionuclizilor de la o fântână la sol datorită irigării acestuia (an ⁻¹)	IrriRate	$Depth_irr * L_comp[Soil] * W_comp[Soil] / (V_comp[Aquifer_f] * R(Cont_to_Elem)[Aquifer_f] * theta_w[Aquifer])$	Contaminant
Lungimea compartimentelor (m)	L_comp	Vezi Tabelul 4-5.	Compartiment
Numărul unităților (celulelor) de depozitare	Num_DUnits	10	
Nr. total de ore dintr-un an petrecut de fermier în exteriorul locuinței (ore/an)	O_comp	[Soil]:8766	Compartiment
Rata totală de extragere a apei din acvifer pentru toate utilizările (an ⁻¹)	PumpRate	$V_Abstract / (V_comp[Aquifer_f] * R(Cont_to_Elem)[Aquifer_f] * theta_w[Aquifer])$	Contaminant
Coeficientul de retardare (-)	R	$1 + kd_CompType(Comp_to_CompType) * rho_bd(Comp_to_CompType) / theta_w(Comp_to_CompType)$	Element Compartiment
Rata de extragere a apei din fântână (m ³ /an)	V_Abstract	10000	
Volumul fiecărui compartiment (m ³)	V_comp	$L_comp * W_comp * Depth$	Compartiment
Lățimea fiecărui compartiment (m)	W_comp	Vezi Tabel 3-5	Compartiment
Recolta de culturi agricole greutate proaspătă de culturi agricole (kg/m ² pe an)	yield	Cereale [Grain]: 0,4; Plante cu frunze verzi [Green]: 3; Rădăcinoase [Root]: 3,5; Pășune [Pasture]: 1,7	Culturi agricole
Concentrația de praf în aerul de respirat de-a lungul unui an (Kg/m ³)	dust	5,332 e-08	
Rata de eroziune a solului (an ⁻¹)	eros	0,0002	
Coeficienții de adsorbție pentru fiecare tip de	kd_CompType	Vezi Tabel 3-6.	Element

Raport de activitate - Proiect de cercetare AOSR 2018 - Faza 3

compartiment (m ³ /kg)			Tip de compartiment
Factorul de interceptie pentru apa de irigare de către toate culturile agricole (-)	mu_crop	0,5	
Densitatea uscată a compartimentelor (kg/m ³)	rho_bd	Vezi Tabel 3-4	Tip de compartiment
Densitatea apei (kg/m ³)	rho_wat	1.0 E+03	
Fracția de pori umpluți cu apă dintr-un compartiment (s-a considerat egală cu porozitatea totală) (-)	theta_w	Vezi Tabel 3-4.	Tip de compartiment
Viteza apei pe canal și în acvifer (m/an)	v	4	

Tabel 3-2 Factorii de transfer pentru produsele vegetale și animale (CF_cow, CF_crop, CF_fish)

Element	Produse animale		Culturi agricole				Pește (m ³ /kg)
	Carne (zi/Kg)	Lapte (zi/l)	Bq/kg (greutate de culturi proaspete)/Bq/kg (greutate uscată de sol)				
			Cereale	Vegetale	Rădăcinoase	Pășune	
H-3	0,029	0,02	1	1	1	1	0,001
Co-60	0,029	0,0002	0,0044	0,03	0,014	0,006	0,3
Cs-137	0,073	0,014	0,0096	0,025	0,014	0,0083	2
C-14	0,12	0,05	0,125	0,125	0,125	0,125	9

Tabel 3-3 Factorii de doză

Izotop	DF_Ing (Sv/Bq) Adult	DF_Inh (Sv/Bq) Adult	DF_Exts [(Sv/h)/(Bq/m3)]
H-3	1,8 E-11	2,6E-10	0
C-14	5,8 E-10	5,8E-9	4,1E-16
Co-60	3,4 E-9	3,1 E-8	5E-10
Cs-137	1,3 E-8	3,9 E-8	1,1E-10

Tabel 3-4 Parametri dependenți de tipul de compartiment

Tip compartiment (denumirea din modelul implementat în codul de calcul AMER)	Conductivitatea hidraulică (H_con) (m/an)	Fracțiunea de pori umplută cu apă (theta_w) (-)	Densitatea uscată a compartimentelor (rho_bd) (kg/m ³)
Concrete	1500	0,4	2600
DispFacility	300	0,4	1500
UnSat	5000	0,15	1620
Sat	100000	0,3	1770
Aquifer	912,5	0,3	2000
Fresh-water	0	1	2000
USoil	3	0,3	1800

Tabel 3-5 Dimensiuni ipotetice pentru compartimentele de interes ale sistemului

Compartiment (denumire din AMBER)	Lungime (L_comp)(m)	Lățime (W_comp)(m)	Adâncime, în sensul curgerii advection (Depth)(m)
Aquifer_f	15,9*2	29,4*5	15
Canal	2000	70	7
Compacted_Loess	15,9*2	29,4*5	2
ConcreteBase	15,9*2	29,4*5	0,6
Sink 1	1	1	1
Sink 2	1	1	1
Sink 3	1	1	1
Sink 4	1	1	1
Sink 5	1	1	1
Soil	15,9*2	29,4*5	0,25
Waste	15,9*2	29,4*5	8,4
a_Loess	15,9*2	29,4*5	24,5

b_Clay	15,9*2	29,4*5	11,5
c_Red_Clay	15,9*2	29,4*5	9
d1_Sandy_Clay	15,9*2	29,4*5	2,5
d2_Sandy_Clay	15,9*2	29,4*5	28,4

Tabel 3-6 Coeficienții de distribuție (adsorbție) ai contaminanților (kd)(m³/kg)

Element	Concrete	DispFacility	UnSat	Sat	Aquifer	Fresh_water	USoil
H-3	0	0	0	0	3E-005	0	0
Co-60	5	0,1	0,06	0,041	5	5	0,06
C-14	2	0,002	0,002	0,002	0,1	0,1	0,01
Cs-137	0,002	0,1	0,0518	0,092	1	1	0,1

4. Scenariu alternativ în perioada post-închidere - Construcția unei șosele pe amplasament

4.1. Descriere, model conceptual, modelare matematică

După închiderea perioadei de control instituționalizat pentru depozit (300 ani) se începe construirea unei șosele chiar pe amplasamentul acestuia.

Se presupune că la acest moment, barierele ingineresti sunt distruse și că pe întreg volumul depozitului, deșeurile și betonul mărunțit sunt omogen amestecate. De asemenea, radioizotopii de referință au rămas integral în depozit.

Porțiunea care traversează aria depozitului se construiește într-un timp cunoscut, care va fi de fapt timpul necesar pentru calculul impactului radiologic.

Terenul este excavat până la o adâncime astfel încât sa se ajunga la amestecul omogen deșeu-beton.

În acest context, scenariul consideră următoarele **proces**:

- materialul excavat, conținând radionuclizii încă nedezintegrați devine solul pe care se desfășoară activitatea respectivă (construcția șoselei);
- praful din atmosferă provine din solul contaminat (prin suspensie);
- solul contaminat și norul de praf pot produce iradierea externă și internă a lucrătorilor.

Grupul critic pentru acest scenariu este alcătuit din lucrătorii la construcția șoselei.

Căile de expunere a lucrătorilor la materialele radioactive sunt următoarele:

- expunerea externă la solul contaminat și la norul de praf (format prin suspensie);
- inhalarea de praf radioactiv;
- ingerare accidentală de material contaminat

În Figura 4.1 este reprezentat simplificat modelul conceptual pentru scenariul alternativ de construcție a unei șosele pentru amplasament. Modelul conceptual identifică:

- mecanismele și mediile de eliberare a contaminanților;
- receptorii;
- căile de expunere a lucrătorilor.

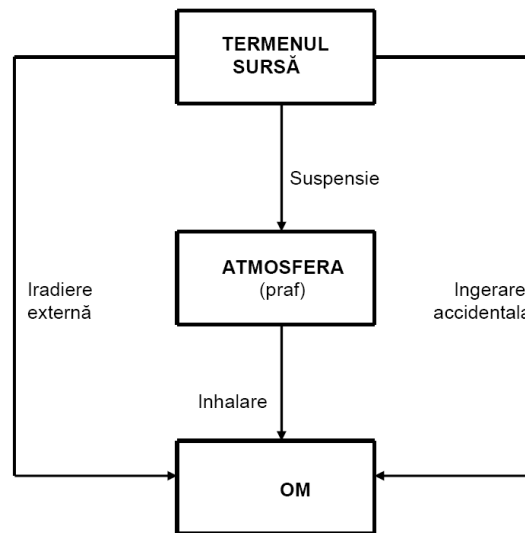


Figura 7 Modelul conceptual pentru scenariul alternativ

Formula de calcul a dozei este:

$$D_{tot} = A_{comp} \cdot dil \cdot [Q_{soil} \cdot DF_{Ing} + DF_{Ext} + BR \cdot dust \cdot DF_{Inh}] \cdot t_1 \quad [Sv/an]$$

unde:

- A_{comp} = activitatea specifică, (Bq/kg);
- dil = factorul de diluție, (-);

Raport de activitate - Proiect de cercetare AOSR 2018 - Faza 3

- Q_{soil} = cantitatea de sol ingerată accidental, (kg/h);
- BR= rata de respirație pentru membrii grupului critic, (m^3/h);
- dust = concentrația de praf din atmosferă, (kg/m^3);
- DF_{inh} = factorul de doză pentru inhalare, (Sv/Bq);
- DF_{ing} = factorul de doză pentru ingerare, (Sv/Bq);
- DF_{ext} = factorul de doză pentru expunerea externă (Sv/h)/(Bq/kg);
- t_1 = durata expunerii, (h/an).

5 Rezultate

A. Scenariul de referinta

Evolutia dozei totale pentru persoana de referinta in scenariul de evolutie normala, calculată pentru fiecare radionuclid relevant al inventarului de activitate pentru aluminiul si grafitul provenit din dezafectarea reactorului nuclear VVR-S al IFIN-HH prezentat in cadrul celui de-al doilea raport de activitate al prezentului proiect, pentru toate căile de expunere s-a facut pentru pentru un interval de timp de 500 de ani de la inchiderea depozitului.

Scenariul de evolutie normala a luat in considerare existenta unei ferme unde se cultivă plante (de ex: cereale, legume cu frunze verzi și rădăcinoase) și se cresc animale (de exemplu bovine pentru lapte), lângă amplasamentul depozitului, în perioada post-închidere.

Expunerea interna se datoreaza ingerarii de apă si alimente contamionate (legume/carne si lapte) de catre persoanele din grupul critic - familia fermierului, considerand drept persoana de referinta bărbatul adult al familiei.

Acesta este de fapt rezultatul migrării radionuclizilor din depozit după închiderea acestuia, prin straturile geologice, până într-un acvifer local de unde apa poate ajunge într-o fântână.

Rezultatele sunt prezentate in (Fig. 3.5.1.a -d). Asa cum se poate observa din fig. 3.5.1.a expunerea la C-14, componenta de baza a grafitului activat, atinge un maxim spre finalul perioadei de viata a depozitului (dupa 500 ani). Valoarea maxima – 30 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ este mai mica decat constrangerea de doza pentru persoana de referinta – 50 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ – alocata activitatii de dezafectare a reactorului VVR-S. Astfel putem concluziona ca expunerea este nesemnificativa si ca publicul nu este afectat de stocarea pe termen lung a acestui tip de dese.

O situatie similara se poate remarca si in ceea ce priveste efectele eliberării in mediu de H-3, componenta de baza a grafitului activat. Astfel, doza maxima (vezi figura 3.5.1.b) pentru persoana de referinta se inregistreaza dupa 150 ani de la inchiderea depozitului. Valoarea acesteia de 0.25 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ este nesemnificativa comparativ cu constrangerea doza 50 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ alocata.

Expunerea grupului critic la eliberarea graduala in mediu a Co-60, radionuclid cheie pentru produsii de activare rezultati din dezafectare si a Cs-137 radionuclid cheie pentru produsii de fisiune, ambii prezenti in aluminiul activat stocat in depozitul analizat este considerata a fi nesemnificativa pe toata durata de viata a depozitului (vezi figura 3.5.1.c si 3.5.1.d).

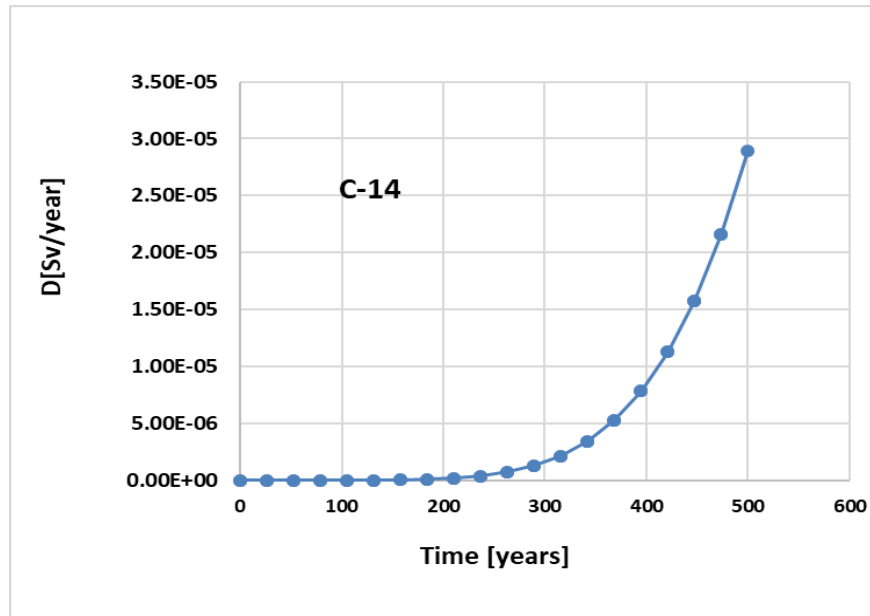


Figura 3.5.1. a. Doza totala persoana de referinta datorata eliberarii de C-14

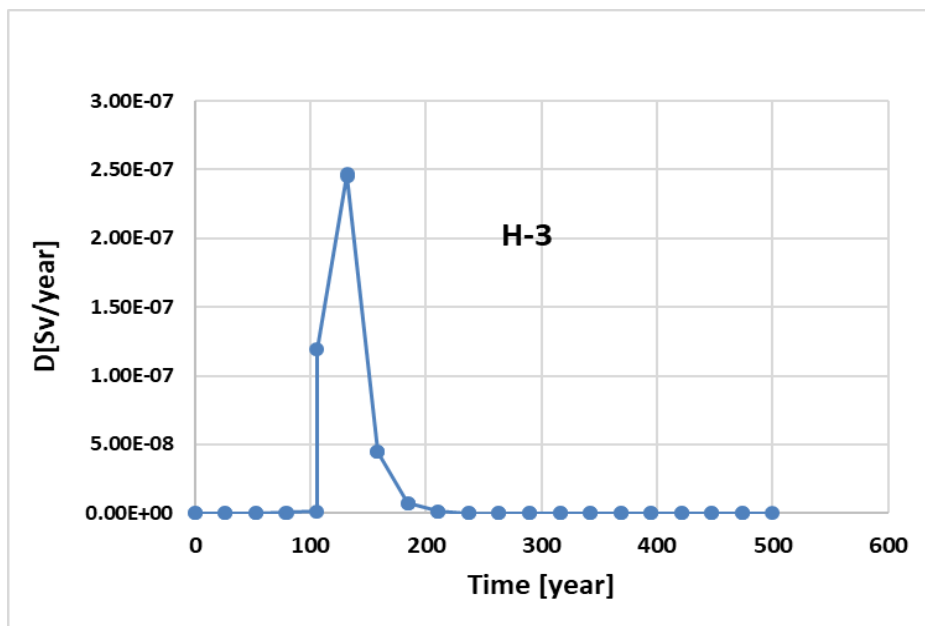


Figura 3.5.1. b. Doza totala persoana de referinta datorata expunerii la H-3

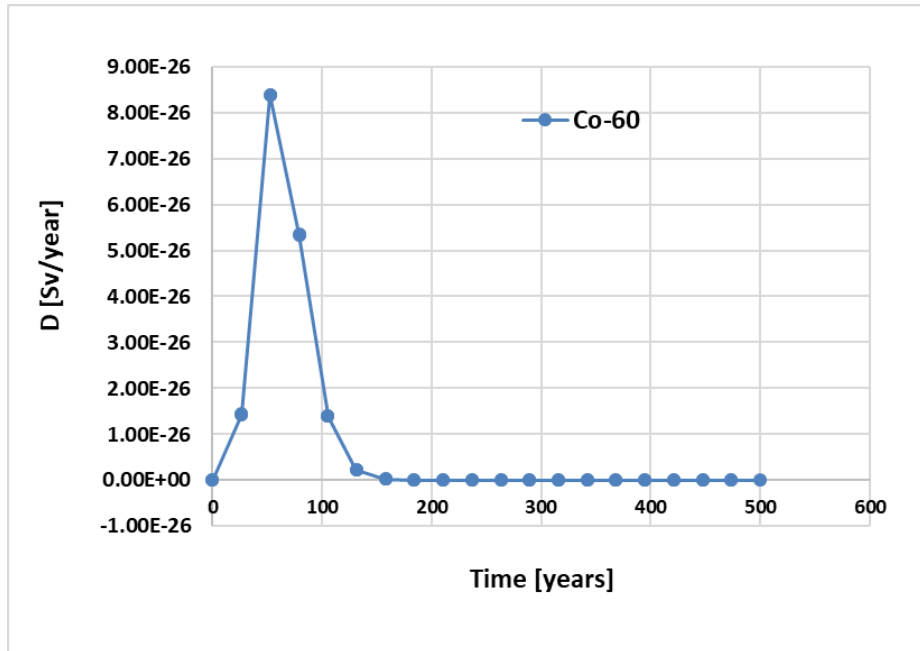


Figura 3.5.1. c. Doza totala persoana de referinta datorata expunerii la Co-60

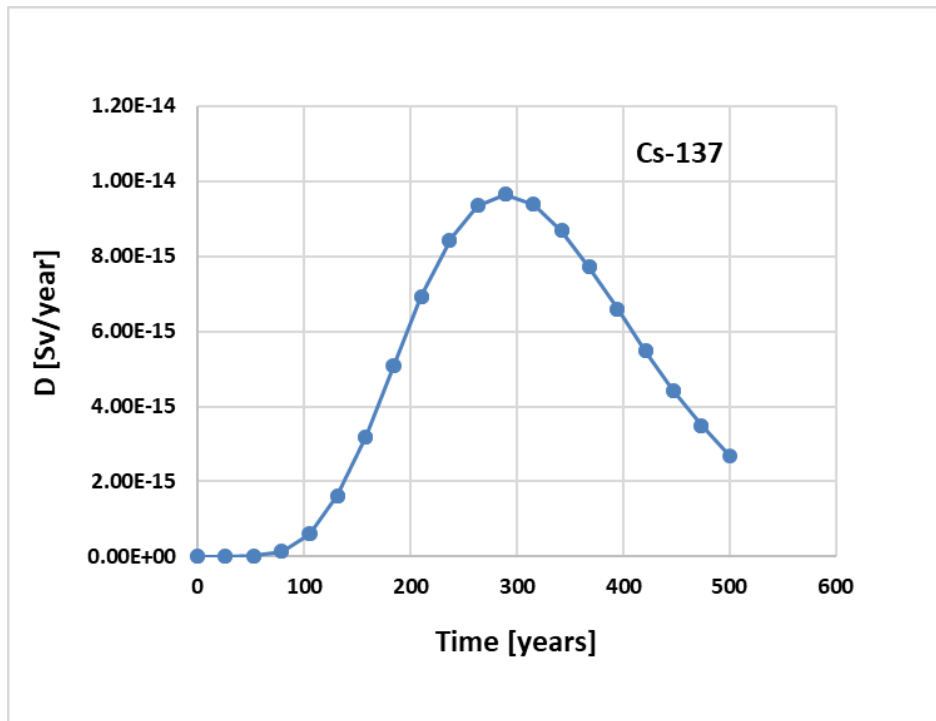


Figura 3.5.1. d. Doza totala persoana de referinta datorata expunerii la Cs-137

B. Scenariul alternativ (disruptiv)

Evoluția dozei totale pentru persoana de referință în scenariul disruptiv – construcția unui drum de acces deasupra depozitului, la 300 de ani după închiderea acestuia, a fost calculată pentru fiecare radionuclid și pentru toate căile de expunere.

Rezultatele sunt prezentate în (Fig. 3.5.1.e -f). Așa cum se poate remarca, la momentul $T=300$ ani, doza potențial încasată ca de lucrătorii angrenați în construcția drumului pe amplasamentul depozitului de stocare a grafitului și aluminiului activat rezultate din dezafectarea reactorului nuclear VVR-S al IFIN-HH este infimezimală încadrându-se cu succes în limita de expunere pentru public ca urmare a fondului natural de radiație.

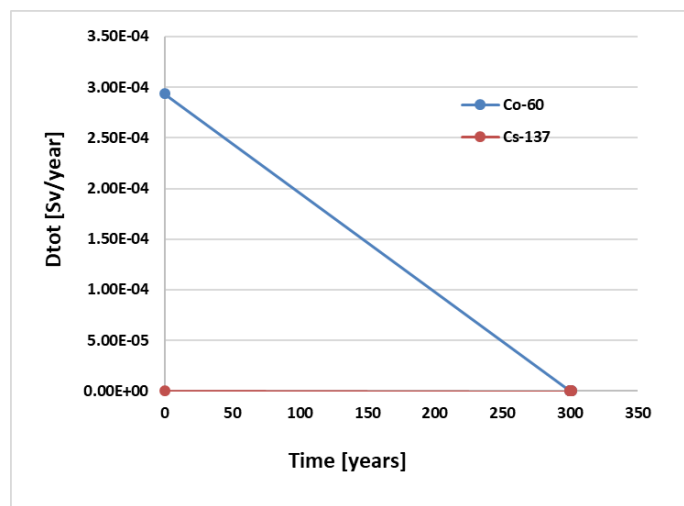


Figura 3.5.1. e. Doza totală persoană de referință datorată expunerii la Co-60 și Cs-137

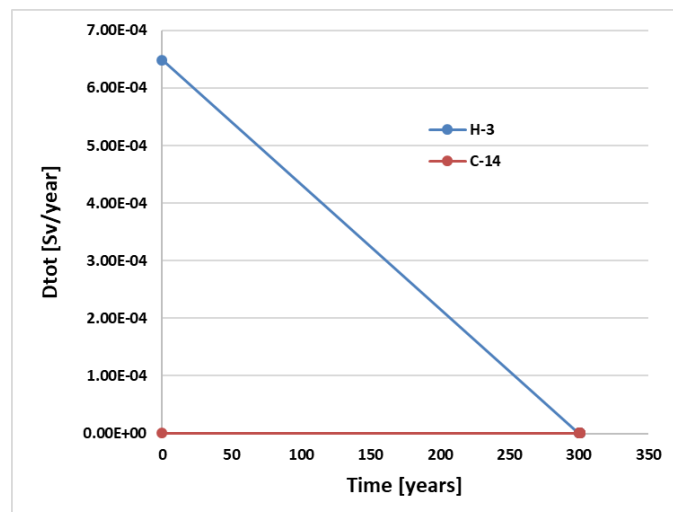


Figura 3.5.1. f. Doza totală persoană de referință datorată expunerii la H-3 și C-14

6. CONCLUZII

În situația normală de evoluție a depozitului (cazul scenariului de referință - existența unei ferme lângă amplasament la circa 500 de ani de la închiderea depozitului) precum și în cea de evoluție anormală (scenariul disruptiv – construcția unui drum pe amplasament după 300 de ani de la închiderea depozitului) se remarcă faptul că atât persoana de referință din cadrul grupului critic cât și lucrătorii angrenați în construcția drumului nu vor fi afectați.

Dozele anuale potențial încasate de expuși evaluate pe baza inventarului radioactiv real cu ajutorul codului de calcul AMBER 5.5., validat de IAEA, pentru scenariile mai sus prezentate sunt mult sub limitele admisibile pentru toți radionuclizii de referință conținuți în deșeurile de grafit iradiat și aluminiu activat provenite din dezafectare reactorului nuclear de cercetare tip VVR-S al IFIN-HH.

Astfel, se poate concluziona că stocarea pe termen lung a deșeurilor slab și mediu active provenite din dezafectare unui reactor nuclear de cercetare nu reprezintă sub nici-o formă un pericol pentru membrii publicului sau lucrători. Soluția de depozitare pe termen lung în condiții de securitate radiologică este una viabilă și de necontestat.

BIBLIOGRAFIE

1. 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
2. AEA TECDOC No.1380, Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, Vienna, 2003
3. 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
4. AMBER Computer Code v.5, Reference Guide , Enviros and Quintessa Ltd, UK, 2006
5. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Results of a co-ordinated research project, IAEA, 2004, ISAM Project
6. DRAFT-TECDOC –XXX. A generic List of Features, Events and Processes (FEPs) for Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities, IAEA, February 2004
7. 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

Întocmit,

Dr. Alexandru Pavelescu

Dr. Carmen Tuca

Conducător Proiect,

Acad. Mărgărit Pavelescu