

COMISIA NATIONALA PENTRU CONTROLUL ACTIVITATILOR NUCLEARE

NSR-23

NORMELE PRIVIND CALCULUL DISPERSIEI EFLUENȚILOR RADIOACTIVI EVACUAȚI ÎN MEDIU DE INSTALAȚIILE NUCLEARE au fost aprobate prin Ordinul Președintelui CNCAN nr. 360 / 20.10.2004 și publicate în Monitorul Oficial al României, Partea I nr. 1.159 bis / 08.12.2004

NORME PRIVIND CALCULUL DISPERSIEI EFLUENȚILOR RADIOACTIVI EVACUAȚI ÎN MEDIU DE INSTALAȚIILE NUCLEARE

Capitolul I

Considerații generale, scop, definiții

Articolul 1. –(1) Prezentele Norme se aplică la instalațiile nucleare și stabilesc cerințele generale și principiile de bază în calculul dispersiei materialului radioactiv eliberat în atmosferă și în mediul acvatic de centrala nucleare-electrică sau orice altă instalație nucleară la funcționare normală, tranzient sau accident nuclear, în conformitate cu prevederile Legii privind desfășurarea în siguranță a activităților nucleare nr.111/1996, cu modificările și completările ulterioare și ale “Normelor fundamentale de securitate radiologică” aprobate prin Ordinul nr. 14/2000 al Președintelui Comisiei Naționale pentru Controlul Activităților Nucleare (CNCAN).
(2) Prezentele norme se aplică și la instalațiile radiologice care pot deversa, în condiții normale sau în caz de accident, efluenți radioactivi în atmosferă sau în ape de suprafață.
(3) Instalațiile radiologice prevăzute la alineatul (2) se stabilesc de CNCAN în cadrul procesului de autorizare.

Articolul 2. – Titularul și/sau solicitantul de autorizație trebuie să evalueze permanent, începând din faza de proiectare a instalației nucleare, expunerea la radiații a personalului angajat, a populației și impactul asupra mediului înconjurător ca urmare a eliberărilor de material radioactiv în

mediu, la funcționare normală, în situație de tranzient sau accident nuclear.

Articolul 3. –(1) Evaluarea expunerii la radiații a populației și a impactului asupra mediului în zona de influență a instalației nucleare, în situație de accident nuclear, tranzient și la operare continuă, se face pe baza unui model matematic și cuprinde următoarele etape de calcul:

- a) calculul factorului de diluție atmosferică sau acvatică a materialului radioactiv eliberat în mediu,
- b) calculul concentrațiilor integrate ale radionuclizilor eliberați în mediu, în locațiile relevante ale mediilor receptoare (denumite în continuare receptori);
- c) calculul dozelor efective și dozelor echivalente, individuale și colective.

(2) Calculul factorului de diluție atmosferică necesită cunoașterea caracteristicilor specifice emisiei, a condițiilor meteorologice locale, pe termen scurt și pe termen lung, și a caracteristicilor specifice amplasamentului instalației nucleare.

(3) Calculul factorului de diluție acvatică necesită cunoașterea caracteristicilor specifice emisiei și a caracteristicilor hidro-geologice ale mediului acvatic receptor, atât la nivel local, cât și la nivel regional, în zona de influență a instalației nucleare.

(4) Calculul dozelor efective și dozelor echivalente, individuale și colective, necesită cunoașterea concentrațiilor radionuclidice integrate, calculate la aliniatul (1), litera b), precum și a factorilor de conversie la doză specifici fiecărui radionuclid, fiecărei căi de iradiere în parte și în funcție de grupul critic pentru care se face evaluarea.

Articolul 4. –(1) Prezentele norme tratează calculul dispersiei materialului radioactiv în mediu, la funcționare normală, în situație de tranzient sau accident nuclear. În cuprinsul prezentei norme, prin calculul dispersiei se va înțelege atât calculul factorului de diluție, cât și calculul concentrațiilor integrate ale radionuclizilor evacuați în mediu, la receptori localizați în zona de influență a instalației nucleare.

(2) Calculul dozelor efective și dozelor echivalente, individuale și colective se tratează în norma specifică “Norme privind calculul dozelor de radiații suplimentare la populație în zona de influență a centralei nucleare-electrice”.

Articolul 5. La funcționare normală, precum și în situație de tranzient sau accident nuclear, atunci când este posibil, calculele de dispersie se vor face în mod iterativ, datele de intrare ale modelului matematic fiind corectate, după caz, pe baza rezultatelor măsurărilor de meteorologie, hidrologie și radioactivitate efectuate, precum și a informațiilor suplimentare privind starea instalației nucleare.

Articolul 6. În scopul aplicării prezentelor norme, pe lângă termenii de specialitate și expresiile definite în Legea nr.111/1996 cu modificările și completările ulterioare și în “Normele fundamentale de securitate radiologică”, în Anexa 1 sunt definiți termenii de specialitate specifici prezentei norme.

Capitolul II

Cerințe generale privind calculul dispersiei efluenților radioactivi în atmosferă

Articolul 7. Procesele fizico-chimice ce trebuie considerate în calculul dispersiei atmosferice a efluenților radioactivi evacuați de instalația nucleară, în vederea obținerii concentrațiilor radionuclizilor la receptori, sunt:

- a) transportul, prin procese de difuzie și advecție, a efluentului radioactiv în atmosferă,
- b) depunerea uscată de material radioactiv pe sol,
- c) depunerea umedă ca urmare a spălării atmosferei prin precipitații,
- d) dezintegrarea radioactivă a radionuclizilor emiși, cu considerarea produșilor de filiație, atât înainte de începerea emisiei, cât și după depunerea materialului radioactiv pe sol;
- e) resuspensia materialului radioactiv depus pe sol;
- f) efecte speciale datorate prezenței clădirilor în jurul sursei.

Articolul 8. Secvențele de calcul în estimarea concentrațiilor radioactive integrate, la un receptor situat în zona de influență a instalației nucleare, ca urmare a eliberării de material radioactiv în atmosferă, sunt:

- a) calculul factorului de diluție atmosferică;
- b) calculul concentrației în aer integrată în timp, la trecerea norului radioactiv peste punctul receptor, pentru fiecare radionuclid în parte emis la sursă;
- c) calculul concentrației depuse pe sol, pentru fiecare radionuclid în parte emis la sursă.

Articolul 9. Datele de intrare în modelul matematic, pentru derularea secvențelor de calcul prezentate la Articolul 8, trebuie să caracterizeze:

- a) emisia de material radioactiv la sursă;
- b) condițiile meteorologice la sursă;
- c) amplasamentul instalației nucleare;
- d) amplasarea receptorului relativ la sursa de emisie.

Articolul 10. –(1) Pentru a calcula dispersia materialului radioactiv în atmosferă, datele ce caracterizează emisia trebuie să includă:

- a) termenul sursă, adică fracția din inventarul radioactiv al reactorului eliberată în atmosferă, exprimată în Bq/s sau Bq de radionuclid emis;
- b) caracteristicile fizico-chimice ale efluenților radioactivi gazoși, care influențează procesele de dispersie atmosferică și depunere;
- c) geometria și mecanismele emisiei;
- d) înălțimea efectivă de emisie a materialului radioactiv, adică înălțimea fizică de emisie (nivel "0" sau înălțimea coșului de ventilație al reactorului), corectată prin considerarea proceselor fizice de descendență și de supraînălțare a penei de poluant;
- e) durata totală a emisiei de material radioactiv.

(2) La funcționare normală, emisia de material radioactiv în atmosferă se consideră ca fiind continuă sau de lungă durată.

(3) În general, la funcționarea normală a instalației nucleare, procesele de supraînălțare a penei de poluant nu sunt importante în estimarea concentrațiilor radionuclizilor și a dozelor pentru populație și pot fi neglijate.

(4) Supraînălțarea penei de poluant depinde în principal de clasa de stabilitate atmosferică, viteza vântului la coș, conținutul de căldură al materialului emis și viteza de ieșire a efluenților gazoși pe coș.

(5) Efectele de descendență se vor considera numai în situația în care emisia de material radioactiv se face la coșul de ventilație al reactorului.

(6) În calculul înălțimii efective de emisie, corecțiile de supraînălțare trebuie făcute la sfârșit, după considerarea efectelor de descendență.

(7) În practică, procesul de ridicare a norului radioactiv poate fi stopat de prezența unui puternic strat de inversie.

(8) Supraînălțarea penei de poluant radioactiv devine semnificativă în situația unui incendiu sau explozii, chiar și pentru o emisie la nivelul solului; calculul supraînălțării se va considera în astfel de situații numai dacă sunt cunoscute în detaliu caracteristicile emisiei.

(9) Durata emisiei este perioada de timp în care are loc evacuarea de efluenți radioactivi în atmosferă; în funcție de durata emisiei, se definește tipul de emisie (Tabelul 1).

Tabelul 1. Tipul emisiei, în funcție de durata evacuărilor de efluenți radioactivi în atmosferă.

Tipul emisiei	Durata emisiei
Instantanee	< 3 minute
De scurtă durată	Între 3 minute – 1 oră
De durată prelungită	Între 1 oră – 24 ore
De lungă durată	> 24 ore

Articolul 11. –(1) Datele meteorologice ce caracterizează dispersia atmosferică trebuie să includă:

- a) direcția vântului la sursă;
- b) viteza vântului la înălțimea de emisie;
- c) parametri de dispersie la diferite distanțe, depinzând de turbulența atmosferică, ce caracterizează amestecul materialului radioactiv cu masele de aer atât în plan vertical cât și în plan orizontal;
- d) clasa de stabilitate atmosferică;
- e) înălțimea stratului de amestec;

- f) tipul și intensitatea precipitațiilor.
- (2) La funcționare normală sau în situația unei emisii accidentale de lungă durată, se va utiliza în calcule regimul vântului la sol pentru amplasamentul instalației nucleare, obținut din măsurări meteorologice locale de lungă durată.
- (3) Direcția din care bate vântul se exprimă în grade și se stabilește, în sensul acelor de ceasornic, pornind de la unghiul de "0" grade, corespunzător direcției vântului de la Nord la Sud.
- (4) În situația în care viteza vântului, la înălțimea de emisie, nu este disponibilă prin măsurare, aceasta se va calcula pe baza vitezei vântului măsurată la 10 m înălțime de la sol sau se va considera în calcule chiar viteza vântului la înălțimea de 10 m deasupra solului.
- (5) Parametrii de dispersie locali trebuie determinați direct prin măsurări de turbulență sau indirect, prin determinarea mai întâi a clasei de stabilitate atmosferică.
- (6) În evaluarea dispersiei în plan vertical trebuie considerată prezența unui strat limită sau a stratului de inversie termică.
- (7) În evaluarea parametrului de dispersie orizontal se va considera durata emisiei.
- (8) Parametrii de dispersie vor fi corecți, dacă este cazul, pentru efectul prezenței clădirilor pe direcția principală a vântului.
- (9) Clasa de stabilitate atmosferică se va determina prin metoda Pasquill sau pe baza măsurărilor de turbulență atmosferică efectuate cu echipamentele instalate pe turnul meteorologic.
- (10) Efectul prezenței clădirilor asupra dispersiei materialului radioactiv poate fi neglijat dacă înălțimea efectivă de emisie este egală sau mai mare decât de 2.5 ori înălțimea celei mai apropiate clădiri aflate în vecinătatea sursei.
- (11) O clădire se consideră ca fiind în vecinătatea sursei dacă distanța sursă-clădire este mai mică decât de 3 ori înălțimea clădirii, situată pe direcția principală a vântului.

Articolul 12. Cerințele specifice privind programul de măsurări meteorologice ce trebuie executat de titularul de autorizație pentru instalația nucleară, în vederea obținerii datelor meteorologice necesare în calculul dispersiei în atmosferă a efluenților radioactivi, sunt tratate în norma specifică "Norme privind măsurările meteorologice și hidrologice la instalațiile nucleare".

Articolul 13. Pentru a calcula dispersia de material radioactiv eliberat în atmosferă, datele ce caracterizează amplasamentul instalației nucleare trebuie să includă:

- a) aspecte legate de orografia terenului;
- b) prezența clădirilor și modul de dispunere a elementelor de construcție în jurul sursei, considerată ca un ansamblu.

Articolul 14. –(1) Pentru a calcula dispersia de material radioactiv eliberat în atmosferă de instalația nucleară, datele ce caracterizează receptorul sunt coordonatele geografice și înălțimea față de nivelul solului la care este situat receptorul sau coordonatele relative față de sursă.

(2) În general, originea sistemului relativ de coordonate este aleasă ca fiind punctul la nivelul solului, corespunzător emisiei.

Articolul 15. –(1) La evaluarea depunerilor radioactive pe sol trebuie să se considere atât depunerile umede, cât și depunerile uscate.

(2) Dacă se aplică o procedură simplificată pentru evaluarea concentrațiilor radionuclizilor depuși pe sol, trebuie avut în vedere să nu fie subestimate concentrațiile în aer, depunerile pe sol sau dozele colective la mare distanță, în special în condiții de stratificare stabilă a atmosferei.

Articolul 16. –(1) În calculul dispersiei materialului radioactiv eliberat în atmosferă de instalația nucleară trebuie utilizate modele matematice de încredere, testate teoretic și validate experimental.

(2) Codurile de calcul care transpun modelele matematice trebuie să fie și ele validate.

(3) Domeniul și limitele de aplicabilitate ale modelului matematic utilizat trebuie să corespundă situației evaluate.

(4) În utilizarea modelelor matematice de calcul al dispersiei atmosferice trebuie să se țină seama de variabilitatea spațio-temporală a condițiilor meteorologice și de orografia și topografia terenului în zona de influență a instalației nucleare.

Articolul 17. –(1) Pentru distanțe mai mici de 50 km între sursa de emisie și receptori, pentru calculul dispersiei efluentului radioactiv în atmosferă se utilizează modelul matematic gaussian descris în Anexa 2 sau alte modele matematice care îndeplinesc cerințele generale prezentate în Articolele 7-16.

(2) Folosirea modelului de tip gaussian se poate extinde și pentru distanțe cuprinse între 50 – 100 km între sursa de emisie și receptori.

(3) Pentru distanțe mai mari de 100 km se utilizează modele matematice complexe de transport atmosferic la lungă distanță, care îndeplinesc cerințele generale prezentate în Articolele 7-16 sau, în lipsa acestora, se poate utiliza un model de tip gaussian, cu parametrizări specifice transportului poluantului radioactiv la lungă distanță.

(4) Modelul matematic gaussian va fi utilizat numai pentru surse de poluare cu înălțimi de emisie mai mici de 200 m. Pentru surse de poluare care emit la înălțimi mai mari de 200 m se vor utiliza modele matematice în care parametrii de dispersie sunt estimați pe baza parametrilor fizici ai stratului limită planetar.

(5) Alegerea modelelor de calcul al dispersiei efluentului radioactiv în atmosferă și alegerea parametrilor de intrare ai modelului sunt responsabilitatea titularului de autorizație.

(6) Folosirea modelelor matematice și a codurilor specifice în calculul dispersiei în atmosferă a efluenților radioactivi trebuie aprobată în prealabil de CNCAN.

(7) În vederea obținerii aprobării prevăzute la alineatul (6), titularul de autorizație trebuie să justifice alegerea modelului, utilizarea anumitor tehnici analitice, simplificările și parametrizările făcute, precum și gradul de conservatorism al modelului ales.

Articolul 18. –(1) Valorile coeficienților utilizați în calculul parametrilor de dispersie se obțin experimental în diferite condiții și sunt specifici amplasamentului în care a avut loc experimentul.

(2) În lipsa unor coeficienți experimentali, specifici amplasamentului instalației nucleare, pot fi utilizați coeficienți empirici preluați din literatura de specialitate, cum sunt cei prezentați în Anexa 2.

Capitolul III

Cerințe generale privind calculul dispersiei efluenților radioactivi în mediul acvatic

Articolul 19. –(1) În cuprinsul prezentei norme se tratează calculul dispersiei efluenților radioactivi în apele de suprafață.

(2) Calculul dispersiei materialului radioactiv în ape de suprafață presupune utilizarea unui model matematic de tipul:

- a) model matematic numeric, cu transformarea ecuațiilor fundamentale de dispersie în forme cu diferențe finite sau elemente finite; un astfel de model tratează complex

procesele fizico-chimice de transport și transfer ce au loc în mediul acvatic;

- b) model compartimental, în care mediul acvatic este descris prin unul sau mai multe compartimente în interiorul cărora distribuția radionuclizilor se presupune omogenă; calculul concentrațiilor medii pentru fiecare compartiment se face pe baza coeficienților de transfer care leagă compartimentele sistemului între ele; modelele matematice care consideră interacțiile radionuclid – sediment sunt, în general, de acest tip;
- c) model analitic simplificat, pentru care se obțin soluții analitice ale ecuațiilor fundamentale de transport; simplificările se referă la geometria mediului acvatic, condițiile de curgere și coeficienții de dispersie; este modelul cel mai des utilizat în analizele de dispersie pentru ape de suprafață.

Articolul 20. –(1) În calculul dispersiei acvatice trebuie utilizate modele matematice complexe.

(2) Complexitatea modelului matematic de calcul al dispersiei acvatice depinde de specificul situației.

(3) Utilizarea de modele matematice complexe presupune cunoașterea în detaliu a aspectelor legate de descrierea hidro-geologică locală și regională în zona de influență a instalației nucleare.

(4) În lipsa cunoașterii în detaliu a caracteristicilor hidro-geologice la nivel local și regional, se pot utiliza în calculul dispersiei acvatice modele matematice de calcul simplificate.

(5) Rezultatele modelului simplificat, vor fi verificate, pe cât posibil, prin măsurări hidrologice și de radioactivitate în mediul acvatic.

Articolul 21. Selecția modelului matematic de calcul al dispersiei efluenților radioactivi în ape de suprafață se face prin considerarea următorilor factori:

- a) tipul deversării (continuă, periodică, anticipată sau accidentală);
- b) mediul acvatic în care are loc deversarea (râu/fluviu, estuar, îndiguire/canal, lac/rezervor, mare, ocean);
- c) modul de utilizare a apei;
- d) magnitudinea termenului sursă la funcționare normală sau în situație de accident;
- e) acuratețea cerută în obținerea rezultatelor modelului.

Articolul 22. –(1) Procesele fizico-chimice ce trebuie considerate în calculul dispersiei în mediul acvatic a efluenților radioactivi evacuați de instalația nucleară, în vederea obținerii concentrației radionuclizilor în apă, la diferiți receptori, sunt:

- a) transportul, prin procese de advecție și difuzie, a materialului radioactiv în mediul acvatic,
- b) interacția efluentului radioactiv cu sedimentul acvatic și cu depunerile pe fundul apei (sunt incluse procesele de transport al sedimentelor suspendate în apă, procesele de sedimentare, resuspensie și eroziune),
- c) interacția cu materialul biologic prezent în mediul acvatic respectiv,
- d) dezintegrarea radioactivă, inclusiv considerarea apariției produșilor de filiație,
- e) interacția cu apele subterane,
- f) efectele de îngheț la suprafața apei.

(2) Interacția între materialul radioactiv dispersat în apă și sedimentul acvatic se tratează prin considerarea proceselor de sorbție – desorbție.

(3) Concentrația unui radionuclid în sediment se poate calcula pe baza concentrației radionuclidului respectiv în

apă, folosind un coeficient de distribuție specific.

(4) Pentru simplificare, se poate considera că efectul materialului biologic și efectul sedimentului asupra valorii concentrației radionuclizilor în mediul acvatic sunt neglijabile, ceea ce va conduce, în multe situații, la o supraestimare a concentrației radionuclizilor în apă.

Articolul 23. În estimarea dispersiei acvatice a efluenților radioactivi, datele de emisie specifice efluentului radioactiv lichid trebuie să includă:

- a) termenul sursă, adică rata de deversare pentru fiecare radionuclid în parte și activitatea totală deversată într-o anumită perioadă de timp;
- b) proprietățile chimice, incluzând: concentrațiile anionilor și cationilor importanți și formele lor de oxidare și complexare, conținutul organic, pH-ul, concentrația oxigenului dizolvat;
- c) proprietățile fizice, incluzând: temperatura, densitatea și conținutul de material solid suspendat și granulația solidelor suspendate;
- d) debitul efluenților radioactivi lichizi, la deversare continuă sau volumul și frecvența în cazul deversărilor în loturi;
- e) variația termenului sursă pe durata deversării, necesară în evaluarea concentrațiilor radionuclizilor, ca urmare a deversărilor de lungă durată;
- f) geometria și mecanismele deversării.

Articolul 24. –(1) În cuprinsul prezentei norme, mediile acvatice considerate sunt fluviul și construcția hidrotehnică tip canal.

(2) Pentru o instalație nucleară cu deversare de efluenți radioactivi într-un fluviu, informația hidrologică (inclusiv date conexe) trebuie să includă următorii parametri:

- a) geometria fluviului, definită prin lărgimea medie, secțiunea transversală medie și panta medie a sectoarelor fluviului care interesează; dacă pe parcursul de curgere există iregularități majore care pot influența dispersia acvatică a materialului radioactiv, acestea se vor descrie; dacă este necesar, trebuie făcute măsurări suplimentare ale geometriei fluviului, în aval, pe sectoarele fluviului care interesează;
- b) debitul de curgere al fluviului, ca medie lunară calculată ca fiind inversa mediei aritmetice lunare a inverselor debitelor zilnice; în calculul valorii medii lunare se utilizează inversa debitului de curgere deoarece, în situația în care efectele de interacție cu sedimentul nu sunt considerate, concentrația în volumul apei, la amestec complet, este proporțională cu inversa debitului de curgere al fluviului;
- c) valori extreme ale debitului de curgere al fluviului, obținute în decursul timpului;
- d) variații temporale ale nivelului apei pe sectoarele de fluviu care prezintă interes;
- e) date despre posibile interacții între apa fluviului și apa din pânza freatică; trebuie identificate și considerate eventualele porțiuni din cursul fluviului în care apa fluviului se amestecă cu apele subterane;
- f) temperatura apei fluviului, măsurată în diferite puncte pe parcursul a cel puțin un an, exprimată ca medii lunare ale valorilor zilnice;
- g) grosimea stratului de suprafață, dacă apare fenomenul de stratificare termică;
- h) temperaturi extreme ale apei fluviului, obținute în decursul timpului;

- i) concentrații de sediment aflat în suspensie, măsurate în:
 - locații în care fluviul este încetinit, sărăcit sau alimentat cu ape,
 - probe prelevate în diferite puncte, cu frecvență corespunzător aleasă,
 - perioade caracterizate de diferite regimuri de curgere, pentru a descrie curba ratei de sedimentare și/sau eroziune în funcție de regimul de curgere al fluviului;
 - j) caracteristicile sedimentelor depuse, incluzând compoziția minerală și/sau organică și dimensiunile particulelor de sediment depuse;
 - k) coeficienții de distribuție în sedimentul de fund și pentru sedimentele aflate în suspensie, pentru fiecare radionuclid deversat în parte;
 - l) nivelul radioactivității naturale și artificiale de fond, în apă, sediment și în organismele acvatice;
 - m) datele privind apariția și evoluția ciclică a bio-masei fito și zoo-planctonice;
 - n) perioadele de reproducere și de hrănire pentru speciile de pești preponderente în mediul acvatic respectiv.
- (3) Pentru o instalație nucleară cu deversare de efluenți radioactivi într-o construcție hidrotehnică tip canal, informația hidrologică (inclusiv date conexe) trebuie să includă:
- a) geometria canalului, incluzând lungimea, lățimea și adâncimea, la diferite distanțe de sursă;
 - b) debitul de curgere al apei pe canal, sau debitele de curgere la intrările pe canal și, respectiv, la ieșirile din canalul receptor;
 - c) fluctuațiile previzibile în nivelul apei, ca medii lunare;
 - d) calitatea apei la intrare, incluzând temperaturi și particule solide aflate în suspensie;
 - e) date despre stratificarea termică și variațiile sezoniere ale stratificării termice;
 - f) interacția cu pânza freatică;
 - g) caracteristicile sedimentului depus pe fundul canalului;
 - h) coeficienții de distribuție în sediment și pentru materialul aflat în suspensie, pentru fiecare radionuclid deversat în parte;
 - i) rata de sedimentare;
 - j) nivelul radioactivității naturale și artificiale de fond, în apă, sediment și organismele acvatice;
 - k) datele privind apariția și evoluția ciclică a bio-masei fito și zoo-planctonice;
 - l) perioadele de reproducere și de hrănire pentru speciile de pești preponderente în mediul acvatic respectiv.
- Articolul 25.** –(1) În utilizarea modelelor de dispersie acvatică trebuie să se țină seama de variabilitatea spațio-temporală, la nivel local și regional, în zona de influență a instalației nucleare, a condițiilor hidro-geologice ale mediului acvatic receptor.
- (2) Rezultatele modelului matematic trebuie testate și validate, pe baza rezultatelor măsurărilor hidrologice și de radioactivitate (efectuate în laborator și în teren) în zona de influență a instalației nucleare.
- (3) Codurile de calcul care transpun modelele matematice trebuie și ele validate.
- (4) Domeniul și limitele de aplicabilitate ale modelului matematic utilizat trebuie să corespundă situației evaluate.
- Articolul 26.** –(1) Pentru calculul dispersiei efluenților radioactivi evacuați în mediul acvatic se utilizează modelul matematic descris în Anexa 3 sau alte modele matematice care îndeplinesc condițiile generale prezentate în Articolele 19 – 25.

(2) Alegerea modelelor de calcul al dispersiei efluentului radioactiv lichid și alegerea parametrilor de intrare ai modelului sunt responsabilitatea titularului de autorizație.

(3) Folosirea modelelor matematice de calcul al dispersiei acvatice a efluenților radioactivi și a codurilor specifice trebuie aprobată în prealabil de CNCAN.

(4) În vederea obținerii aprobării prevăzute la alineatul (3), titularul de autorizație trebuie să justifice alegerea modelului, utilizarea anumitor tehnici analitice, simplificările și parametrizările făcute, precum și gradul de conservatorism al modelului ales.

Capitolul IV Analize de dispersie pentru autorizare

IV.1. Condiții de funcționare normală

Articolul 27. Pe perioada proiectării, construcției și pe perioada autorizării instalației nucleare, în analizele de dispersie se vor utiliza estimări conservative ale termenului sursă, bazate pe experiența provenită din funcționarea altor instalații nucleare de același tip.

Articolul 28. –(1) Eliberările de material radioactiv în atmosferă la funcționare normală se consideră ca fiind de lungă durată.

(2) În ecuațiile de dispersie se poate face aproximația că distribuția în plan orizontal, la o distanță dată față de sursă, a concentrațiilor radionuclizilor emiși este uniformă într-un sector de vânt considerat.

Articolul 29. –(1) Pentru evaluarea dispersiei atmosferice în zona de influență a instalației nucleare în regiune trebuie inițiat, încă din perioada de proiectare, un program de măsurări meteorologice, în vederea obținerii regimului vântului la sol.

(2) Programul de măsurări meteorologice va fi elaborat în conformitate cu prevederile normei specifice “Norme privind măsurările meteorologice și hidrologice la instalațiile nucleare”.

(3) Rezultatele programului propriu de măsurări meteorologice vor fi completate, ori de câte ori situația impune, cu date obținute în sistemul național de meteorologie și hidrologie.

Articolul 30. –(1) Pentru evaluarea dispersiei acvatice în zona de influență a instalației nucleare, în regiune trebuie inițiat, încă din perioada de proiectare, un program de măsurări hidrologice pe ape de suprafață și ape subterane, pentru caracterizarea hidrologică a zonei.

(2) Programul de măsurări hidrologice trebuie să îndeplinească cerințele prevăzute în norma specifică “Norme privind măsurările meteorologice și hidrologice la instalațiile nucleare”.

(3) Rezultatele programului propriu de măsurări hidrologice vor fi completate, ori de câte ori situația impune, cu date obținute în sistemul național de meteorologie și hidrologie.

IV.2. Situație de tranziție și accident anticipat

Articolul 31. –(1) Pe perioada proiectării, construcției și pe perioada autorizării instalației nucleare, în analizele de dispersie în situație de tranziție sau accident anticipat se vor utiliza estimări conservative ale termenului sursă, bazate pe diferite scenarii posibile.

(2) Analizele de dispersie vor fi utilizate în elaborarea planurilor de intervenție la urgență nucleară ale instalației nucleare și la evaluarea în timp real a consecințelor radiologice ale unei emisii accidentale de material radioactiv în mediu.

Articolul 32. -(1) Analizele de dispersie în situație de tranzient sau accident anticipat se vor efectua cu considerarea duratei de emisie, a înălțimii efective de emisie și a parametrilor de dispersie specifici fiecărei situații în parte.

(2) Se va considera variația fiecărui parametru de intrare în modelul matematic de dispersie și cele mai semnificative mărimi și cantități vor fi estimate la diferite distanțe față de sursă.

(3) Din numărul total al situațiilor analizate se vor selecta, prin metode statistice de calcul, acelea care au probabilitate mare de apariție și consecințe importante din punct de vedere radiologic.

Capitolul V

Analize de dispersie pe durata de funcționare a CNE

Articolul 33. -(1) Eliberările de radioactivitate trebuie evaluate prin măsurare.

(2) Rezultatele măsurărilor meteorologice pe amplasament vor fi utilizate în analizele de dispersie atmosferică, iar rezultatele măsurărilor hidrologice în zona de influență a instalației nucleare vor fi utilizate în analizele de dispersie acvatică.

(3) Titularul de autorizație trebuie să dețină metode de evaluare a dispersiei pentru situațiile în care rezultatele măsurărilor meteorologice și/sau hidrologice pe amplasament nu sunt disponibile.

Articolul 34. Analizele de dispersie pe durata de funcționare a instalației nucleare vor utiliza o tratare statistică a condițiilor meteorologice, bazată pe probabilități de apariție a situațiilor meteorologice.

Articolul 35. Analizele de dispersie elaborate în perioada de autorizare vor fi completate în timp, pe măsură ce se acumulează noi date meteorologice și

hidrologice și se dezvoltă modelele de calcul.

Articolul 36. Situații deosebite de emisie, condițiile de dispersie predominante în timpul acelor situații deosebite și dozele rezultate în astfel de situații vor fi analizate separat și vor fi raportate la CNCAN.

Capitolul VI

Analize de dispersie în situație de accident nuclear la CNE

Articolul 37. -(1) Titularul de autorizație trebuie să aibă capacitatea de a estima prin calcul, în timp real, dispersia materialului radioactiv la eliberare accidentală în mediu.

(2) Calculele se vor efectua cu modele matematice instalate pe computere corespunzătoare ca și performanțe tehnice.

(3) În plus, titularul de autorizație trebuie să dispună și de proceduri manuale de calcul al dispersiei materialului radioactiv la eliberare accidentală în mediu.

Articolul 38. (1) Evaluarea consecințelor unei emisii iminente de material radioactiv în atmosferă se va face cu considerarea condițiilor meteorologice predominante pe durata accidentului.

(2) Atunci când situația impune și acest lucru este posibil, în evaluarea consecințelor radiologice ale unei emisii iminente de material radioactiv, se va utiliza, suplimentar, sistemul de prognoză a poluării aerului la scară locală și regională, disponibil în cadrul sistemului național de meteorologie.

Articolul 39. În camera de control a instalației nucleare trebuie să existe un ecran pe care să se afișeze în permanență rezultatele măsurărilor meteorologice și mărimile calculate pe baza parametrilor măsurați, necesare în calculul dispersiei atmosferice. În

situație de accident, aceste date trebuie transferate la centrul de răspuns la urgență al instalației nucleare, pentru a fi utilizate în calculele de dispersie.

Articolul 40. În calculul dispersiei acvatice trebuie considerată și posibilitatea contaminării indirecte a apei de suprafață ca urmare a depunerilor de radioactivitate, la emisia accidentală de efluenți radioactivi în atmosferă, pe suprafața apei.

Articolul 41. –(1) La emisia accidentală de efluenți radioactivi în mediu, în situațiile în care se impune, în calculul dispersiei acvatice se va considera și posibilitatea contaminării indirecte a apei subterane.

(2) Calculul dispersiei acvatice în apele subterane nu face obiectul prezentelor norme.

Capitolul VII Controlul de reglementare

Articolul 42. În analiza inițială de securitate, în Raportul Preliminar de Securitate și în Raportul Final de Securitate ale instalației nucleare trebuie să se prezinte modul în care au fost implementate cerințele prezentei norme.

Articolul 43. –(1) Modelele matematice de calcul al dispersiei efluenților radioactivi în mediu trebuie revizuite periodic și modificate astfel încât să reflecte dezvoltări moderne în materie de dispersie, factori de conversie, parametrizări.

(2) După revizuire, modelul matematic de calcul și codurile specifice vor fi înaintate la CNCAN pentru aprobare.

Capitolul VIII Dispoziții tranzitorii și finale

Articolul 44. Prezentele norme intră în vigoare la data publicării în Monitorul Oficial.

Articolul 45. Titularii de autorizații pentru instalațiile nucleare, valabile la data intrării în vigoare a prezentelor norme, trebuie să se încadreze în prevederile acesteia, în termen de cel mult 12 luni.

Articolul 46. Anexele 1, 2 și 3 sunt parte integrantă din prezentele norme.

Anexa 1. Definiții

- **advecție.** - Mișcarea sau transferul de substanță, căldură, etc., indusă de deplasarea fluidului (ex. aer sau apă) în care se află.
 - Transportul unei proprietăți prin mișcări orizontale ale aerului.
- **coeficient de distribuție.** Raportul concentrațiilor unui radionuclid în două faze aflate în contact, care se găsesc la echilibru. Pentru un radionuclid se pot defini mai mulți coeficienți de distribuție, în funcție de fazele între care este distribuit.
- **Comisia Națională pentru Controlul Activităților Nucleare (CNCAN).** Autoritatea națională competentă în domeniul nuclear care exercită atribuțiile de reglementare, autorizare și control potrivit Legii 111/1996 privind desfășurarea în siguranță a activităților nucleare, cu modificările și completările ulterioare.
- **convecție.** - Mișcările verticale lente ale aerului, provocate de încălzirea neomogenă a acestuia în straturile inferioare. Datorită gradientilor de temperatură, aerul cald se ridică, iar cel rece coboară luându-i locul.
 - Transportul căldurii sau al altor proprietăți prin mișcarea (de obicei verticală) a aerului.
- **difuzie.** - Mișcarea de deplasare a atomilor sau moleculelor unei substanțe de la o regiune de concentrație ridicată către regiuni de joasă concentrație, ca urmare a acțiunii gradientului de concentrație.
 - Transportul de materie numai prin mișcări aleatoare ale moleculelor, nu prin mișcări coerente de grupuri de molecule.
 - Procesul de amestec al proprietăților fluidului prin mișcări turbulente și moleculare.
- **dispersie.** - Tendința particulelor (ex. particulele radioactive) de a se împrăști în fluidul respectiv datorită variațiilor la scară redusă ale vitezei fluidului.
 - Împrăștierea de constituenți ai aerului precum poluanții atmosferici. Poate fi rezultatul difuziei moleculare, al amestecului turbulent sau al forfecării medii a vântului.
- **emisie radioactivă.** Procesul de evacuare în mediu a efluentului radioactiv.
- **factor de diluție atmosferică / acvatică.** Raportul între concentrația materialului radioactiv la punctul receptor (situat în aer sau în mediul acvatic) și activitatea totală a materialului radioactiv emisă la sursă.
- **gradient de temperatură.** Vector care caracterizează descreșterea temperaturii în atmosferă pe unitatea de distanță, orientat în sensul normalei la suprafața izotermică.
- **inversie termică.** Creșterea temperaturii cu înălțimea, spre deosebire de condițiile obișnuite, când temperatura scade cu înălțimea; inversiunile se pot produce la sol și în atmosfera liberă.
- **mișcare turbulentă.** Mișcare a fluidului în care fiecare particulă, pe lângă o viteză medie oarecare a curentului, are și o viteză suplimentară. Din această cauză, mișcarea fluidului pare haotică. Mișcarea aerului în atmosferă este întotdeauna turbulentă.

- **strat limită planetar.** Acea porțiune din troposferă în care curgerea aerului este puternic influențată în mod direct de interacțiunea cu suprafața Pământului. Înălțimea stratului limită este variabilă în timp și spațiu, fiind cuprinsă între sute de metri și câțiva kilometri. Pentru condițiile medii de la latitudini mijlocii, stratul limită planetar se extinde în primul kilometru de atmosferă de la suprafața Pământului și conține astfel aproximativ 10% din masa atmosferei.
- **receptor.** Persoană care este expusă la radiații, ca urmare a emisiei de material radioactiv în atmosferă sau în mediul acvatic.
- **roza vânturilor.** Reprezentarea grafică a frecvenței vânturilor pe diferite direcții; sinonim: regimul vântului la sol.
- **sorbție/desorbție.** Procese de interacție a unui atom, molecule sau particule cu suprafața unui solid; sunt procese de interacție aflate în echilibru dinamic, dirijat într-un sens (sorbție) sau altul (desorbție), printr-o modificare a concentrației componentelor în echilibru; termenul sorbție include atât procese de adsorbție (proces de sorbție de suprafață, la interacția cu un solid non-poros) și procese de absorbție (proces de sorbție care au loc în

interiorul structurii chimice a unui solid poros); procesele au loc sub influența unor forțe de natură fizică sau chimică.

- **transportul radionuclizilor.** Mișcarea (migrarea) radionuclizilor în mediu; poate include procese cum sunt advecția, difuzia, sorbția și încorporarea.
- **turbulență atmosferică.** Stare a fluidului (aer) caracterizată printr-o mișcare turbulentă.
- **vânt.** Mișcarea aerului în raport cu suprafața solului; de obicei se are în vedere componenta orizontală a acestei mișcări; se definește prin două elemente: direcția din care bate și viteza, amândouă extrem de variabile în timp și în spațiu; vântul ca mișcare orizontală ia naștere sub acțiunea forței gradientului baric, fiind apoi deviat de forța de frecare, de forța Coriolis și de forța centrifugă.

Anexa 2.

Calculul dispersiei atmosferice a materialului radioactiv cu modelul Gaussian

Etapele în calculul dispersiei atmosferice sunt:

- i) calculul factorului de diluție atmosferică,
- ii) calculul concentrației în aer integrată în timp, Bq·s/m³,
- iii) calculul concentrațiilor radionuclizilor depuși pe sol.

i). Calculul factorului de diluție atmosferică, $\chi(x, y, z) / Q$

În ecuațiile de determinare a factorului de diluție atmosferică, originea sistemului cartezian de axe se consideră ca fiind la baza punctului de emisie (proiecția emisiei la nivelul solului) și direcția în care bate vântul este paralelă cu axa x . Abaterea punctului receptor în plan orizontal, perpendicular pe direcția vântului, este dată de coordonata y . Înălțimea la care este situat receptorul relativ la suprafața solului este reprezentată prin coordonata z . Distanțele x, y, z sunt exprimate în m.

1. Emisie instantanee sau de scurtă durată

- Pentru o emisie instantanee sau de scurtă durată, factorul de diluție la punctul receptor de coordonate (x, y, z) se calculează, în modelul Gaussian cu formula:

$$\frac{\chi(x, y, z)}{Q} = \frac{1}{2\pi\Sigma_y\Sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) \right] f(\Sigma_z, H, h_i), \text{ (s/m}^3\text{)} \quad (1)$$

unde

$\chi(x, y, z)$ = este concentrația în aer integrată în timp (Bq·s/m³) la punctul receptor de coordonate (x, y, z) ; perioada pe care se integrează concentrația este cel puțin egală cu durata emisiei;

Q = este activitatea efectivă a sursei (Bq), cantitatea totală de material radioactiv emisă de sursă, corectată cu factori ce caracterizează fenomenele de dezintegrare radioactivă, apariția produșilor de filiație și depunerea pe sol;

Σ_y = este parametrul de dispersie pe direcția y (σ_y), exprimat în m, corectat cu factori ce caracterizează efectul prezenței clădirilor în jurul sursei și durata emisiei;

Σ_z = este parametrul de dispersie pe direcția z (σ_z), exprimat în m, corectat cu factori ce caracterizează efectul prezenței clădirilor în jurul sursei;

H = este înălțimea efectivă a sursei (m), adică înălțimea fizică a emisiei corectată prin considerarea fenomenelor de supraînălțare a penei de poluant;

\bar{u} = este viteza medie a vântului (m/s) la înălțimea corespunzătoare emisiei,

H ; se poate utiliza în calcule viteza vântului măsurată la 10 m înălțime de la sol sau se poate calcula viteza medie a vântului la diferite înălțimi în funcție de viteza vântului la 10 m înălțime de la sol (ecuația 18.c);

h_i = este înălțimea la care se formează stratul de inversie (distanța de la sol până la baza stratului de inversie), exprimată în m,

$f(\Sigma_z, H, h_i)$ = funcție de corecție pentru inversia termică.

- Dacă receptorul se află la nivelul solului, adică $z = 0$,

$$\frac{\chi(x, y, 0)}{Q} = \frac{1}{\pi \Sigma_y \Sigma_z \bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\Sigma_y^2} + \frac{H^2}{\Sigma_z^2}\right)\right] f(\Sigma_z, H, h_i), \quad (\text{s/m}^3) \quad (2)$$

Ecuția (2) reprezintă forma cea mai des utilizată de model gaussian.

- Pentru emisie la nivelul solului ($H=0$) și presupunând că h_i este mult mai mare decât H , factorul de diluție pe direcția vântului ($y=0$) este

$$\frac{\chi(x, 0, 0)}{Q} = \frac{1}{\pi \Sigma_y \Sigma_z \bar{u}}, \quad (\text{s/m}^3) \quad (3)$$

- În situația unei emisii instantanee, factorul de diluție la punctul receptor de coordonate (x, y, z) se calculează cu una din ecuațiile (1), (2) sau (3). Deoarece durata emisiei este foarte scurtă, parametrii de dispersie trebuie corecți doar cu considerarea efectului prezenței clădirilor în jurul sursei.
- În situația în care viteza vântului la punctul de emisie este mai mică de 2 m/s, ecuațiile (2) și (3) nu se pot aplica, deoarece direcția și viteza vântului se pot modifica în mod necontrolat, chiar și pe o perioadă scurtă de câteva minute, ceea ce poate conduce la dispersie atmosferică crescută. Utilizarea ecuațiilor (2) și (3) ar produce în astfel de situații o supraestimare a concentrației de material radioactiv în aer. Pentru emisii scurte asociate cu viteze de vânt mici, se recomandă folosirea ecuațiilor prezentate pentru situația unei emisii cu durată prelungită (ecuația (4)).

2. Emisii cu durată prelungită

- Pentru o emisie cu durată prelungită, se presupune că, datorită mișcării șerpuite a vântului, efluentul radioactiv este împrăștiat uniform într-un sector de cerc de unghi θ radiani. Factorul de diluție atmosferică la nivelul solului este dat de ecuația:

$$\frac{\chi(x, \text{orice } y \text{ în sectorul determinat de } \theta_L, 0)}{Q} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{\Sigma_z \bar{u} x \theta_L} \exp\left[-\frac{H^2}{2\Sigma_z^2}\right] f(\Sigma_z, H, h_i), \quad (\text{s/m}^3) \quad (4)$$

unde

θ_L este unghiul (în radiani) sub care se vede pana de poluant din punctul de emisie.

- θ_L se poate calcula ca fiind $2\pi/n$ radiani, unde n reprezintă numărul de sectoare egale în care se divide roza vânturilor. Observații efectuate pe timp îndelungat asupra variației vântului ca direcție au arătat că, în general, unghiul θ_L variază între 30 - 60° în cazul emisiilor de durată prelungită, în diferite condiții de stabilitate

atmosferică. Se recomandă alegerea conservativă a valorii de 22.5° pentru unghiul θ_L ($n=16$) pentru orice situație atmosferică.

3. Emisii de lungă durată

- Pentru o emisie de lungă durată, se presupune că atât condițiile meteorologice cât și direcția vântului se schimbă pe durata emisiei. Pentru considerarea unei astfel de situații, ecuația (4) se modifică prin introducerea factorilor F_k și F_{ki} , unde
 - F_k este frecvența (exprimată în procente de timp, în ecuația (5)) cu care vântul bate în sectorul k din roza vânturilor,
 - F_{ki} este fracțiunea de timp în care o anumită clasă de stabilitate i predomină în timp ce vântul bate în sectorul k din roza vânturilor.

Pentru un sector de vânt k considerat, se sumează contribuțiile de la toate clasele de stabilitate Pasquill ($i=1\div 6$, în ecuația (5)). Factorul de diluție atmosferică pentru emisii de lungă durată, χ_k/Q_{med} la un punct receptor din sectorul k , de coordonate (x , orice y în sectorul determinat de unghiul θ_L , 0) se calculează cu ecuația:

$$\frac{\chi_k}{Q_{med}} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{0.01F_k}{x\theta_L} \sum_i \left[\frac{F_{ki}}{\sum_z \bar{u}} f(\Sigma_z, H, h_i) \exp\left(-\frac{H^2}{2\Sigma_z^2}\right) \right], \quad (\text{s/m}^3) \quad (5)$$

unde sumarea se face după toate clasele de stabilitate Pasquill (A - F) și Σ_z , \bar{u} și Q_{med} sunt valori mediate pe perioade lungi de timp, iar Q_{med} se calculează cu formula:

$$Q_{med} = \frac{\sum_i \chi_i}{\sum_i \frac{\chi_i}{Q_i}}, \quad (5.a)$$

unde sumarea se face după toate clasele de stabilitate Pasquill (A - F).

- F_k și F_{ki} trebuie determinați prin măsurări meteorologice locale (la punctul de emisie) desfășurate pe timp îndelungat (de exemplu, condiții meteo mediate pe durata unui an).
- Ecuația (5) se utilizează atât în situații de emisie continuă, la funcționare normală, cât și în situații de emisie accidentală de lungă durată.

4. Parametrii de dispersie σ_z , σ_y

- În modelul gaussian se presupune că materialul radioactiv eliberat în atmosferă prezintă o distribuție gaussiană atât în plan orizontal, cât și în plan vertical. σ_y și σ_z reprezintă deviațiile standard ale distribuției concentrației în plan orizontal și, respectiv, în plan vertical, cu aproximativ 96% din concentrația efluentului conținută în elementul $2\sigma_y, 2\sigma_z$.

- Parametrul de dispersie vertical, σ_z , în funcție de distanța x pe direcția în care bate vântul, se calculează cu formula:

$$\sigma_z = g(x)F(z_0, x), \text{ (m)} \quad (6)$$

unde

$$g(x) = \frac{a_1 x^{b_1}}{1 + a_2 x^{b_2}}, \quad (6a)$$

$$F(z_0, x) = \ln\{c_1 x^{d_1} [1 + (c_2 x^{d_2})^{-1}]\}, \text{ dacă } z_0 > 0.1 \text{ m} \quad (6b)$$

$$F(z_0, x) = \ln\left(\frac{c_1 x^{d_1}}{1 + c_2 x^{d_2}}\right), \text{ dacă } z_0 \leq 0.1 \text{ m}. \quad (6c)$$

Parametrii a_1, b_1, a_2, b_2 depind de clasa de stabilitate atmosferică, valori obișnuite fiind prezentate în tabelul 1.

Parametrii c_1, d_1, c_2, d_2 depind de parametrul meteorologic de rugozitate, z_0 , care ține seama de gradul de rugozitate al suprafeței solului (valori obișnuite sunt prezentate în tabelul 2).

Tabelul 1. Valori uzuale ale coeficienților a_1, b_1, a_2, b_2 utilizați în calculul parametrului vertical de dispersie [7], [11].

Clasa de stabilitate Pasquill	a_1	b_1	a_2	b_2
A	0.112	1.060	5.38×10^{-4}	0.815
B	0.130	0.950	6.52×10^{-4}	0.750
C	0.112	0.920	9.05×10^{-4}	0.718
D	0.098	0.889	1.35×10^{-3}	0.688
E	0.0609	0.895	1.96×10^{-3}	0.684
F	0.0638	0.783	1.36×10^{-3}	0.672

Tabelul 2. Valori uzuale ale coeficienților c_1, d_1, c_2, d_2 utilizați în calculul parametrului vertical de dispersie [7], [11].

Tipul de suprafață	Parametrul de rugozitate z_0 , m	c_1	d_1	c_2	d_2
Pajiște, rezervoare de apă	0.01	1.58	0.048	6.25×10^{-4}	0.45
Suprafețe arate	0.04	2.08	0.0269	7.76×10^{-4}	0.37
Pășune deschisă	0.1	2.72	0	0	0
Zonă rurală	0.4	5.16	-0.098	18.6	-0.225
Pădure sau zonă urbană	1.0	7.37	-0.0957	4.29×10^{-3}	-0.60
Oraș cu clădiri înalte	4.0	11.7	-0.128	4.59×10^{-4}	-0.78

- Parametrul de dispersie orizontal σ_y , în funcție de distanța x pe direcția în care bate vântul, se calculează cu formula:

$$\sigma_y = \frac{c_3 x}{(1 + 0.0001x)^{1/2}}, \quad (\text{m}) \quad (7)$$

unde parametrul c_3 depinde de clasa de stabilitate, așa cum se prezintă în tabelul 3.

Tabelul 3. Valori uzuale ale coeficientului c_3 , utilizat în calculul parametrului orizontal de dispersie [7].

Clasa de stabilitate Pasquill	c_3
A	0.22
B	0.16
C	0.11
D	0.08
E	0.06
F	0.04

- Valorile lui σ_y , calculate cu ecuația (7), sunt reprezentative pentru parametrul de rugozitate $z_0 = 0.03$ m. În general, se presupune că σ_y nu depinde de gradul de rugozitate al terenului.

5. Dependența parametrilor de dispersie în funcție de durata emisiei și efectul prezenței clădirilor în jurul sursei

- Parametrul de dispersie vertical nu depinde în general de durate medii de timp sau de durata de emisie. Nu se recomandă corecții ale σ_z în acest sens.
- Parametrul de dispersie orizontal depinde în mare măsură de durata medie pe care se obțin datele meteorologice și trebuie corectat în funcție de durata emisiei, t_R , dacă cele două intervale de timp diferă considerabil. Valorile lui σ_y obținute cu ecuația (7) sunt reprezentative pentru intervale de timp medii de 10 minute și pentru emisii cu durata de mai puțin de 10 minute: $\sigma_{y,t_R} = \sigma_y$, dacă $t_R \leq 600$ s. Pentru emisii cu durata cuprinsă în intervalul 10 minute - 1 oră, σ_y trebuie corectat după relația:

$$\sigma_{y,t_R} = \sigma_y \left(\frac{t_R}{600} \right)^{0.2}, \quad \text{dacă } 600 \text{ s} < t_R \leq 3600 \text{ s}, \quad (8)$$

unde t_R este durata emisiei, exprimată în secunde.

- Pentru emisii de durată prelungită sau de lungă durată, lățirea penei de poluant radioactiv în plan orizontal este deja considerată în ecuațiile (4) și (5).
- Dispersia materialului radioactiv emis de o sursă este puternic influențată de prezența clădirilor în jurul sursei, pe direcția principală a vântului. Efectul prezenței clădirilor poate fi complet neglijat dacă înălțimea efectivă de emisie, H , este egală sau mai mare decât de 2.5 ori înălțimea celei mai apropiate clădiri aflată în

vecinătatea sursei. În această situație, ($H \geq 2.5 \times H_{clădire}$), parametrii de dispersie sunt calculați cu ecuațiile (6) și (8):

$$\Sigma_z = \sigma_z,$$

$$\Sigma_y = \sigma_{y,t_R}$$

- O clădire se consideră ca fiind în vecinătatea sursei dacă distanța de la sursă la clădire este mai mică decât de 3 ori înălțimea clădirii, situată pe direcția principală a vântului.
- Pentru situațiile în care $H < H_{clădire}$, parametrii de dispersie trebuie corecțai pentru efectul ariei secțiunii transversale a clădirii asupra dispersiei:

$$\Sigma_y = \Sigma_y \max = \left(\sigma_{y,t_R}^2 + \frac{CA_{clădire}}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (m) \quad (9)$$

$$\Sigma_z = \Sigma_z \max = \left(\sigma_z^2 + \frac{CA_{clădire}}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (m)$$

unde

$A_{clădire}$ = aria secțiunii transversale a clădirii aflată în vecinătatea sursei, perpendicular pe direcția principală a vântului, exprimată în m^2 ;

C = factor ce leagă aria $A_{clădire}$ de unda de presiune observată experimental, cu valori cuprinse în intervalul 0.5 - 2.0. Se recomandă ca valoarea lui C să fie aleasă în intervalul 0.5 - 2.0, pentru a da valoare cât mai mare factorului de diluție calculat.

- Pentru situațiile în care $H_{clădire} \leq H < 2.5H_{clădire}$, se recomandă următoarele ecuații pentru calculul parametrilor de dispersie:

$$\Sigma_y = \Sigma_y \max - \left(\frac{H - H_{clădire}}{1.5H_{clădire}} \right) (\Sigma_y \max - \sigma_{y,t_R}), \quad (m) \quad (10)$$

$$\Sigma_z = \Sigma_z \max - \left(\frac{H - H_{clădire}}{1.5H_{clădire}} \right) (\Sigma_z \max - \sigma_z), \quad (m)$$

- Utilizarea parametrilor de dispersie modificați Σ_y , Σ_z în ecuațiile (1) - (5) poate conduce la o reducere semnificativă a valorii concentrației în aer integrată în timp la sursă, în cazul unei emisii la sol, în apropierea unei clădiri. Se recomandă ca factorul de reducere să nu fie mai mare de 3 în calcule, altfel să nu se considere acest factor.

6. Înălțimea efectivă de emisie, H

6.1. Corecția pentru efectul datorat curenților de aer descendenți (Δh_d)

- Atunci când emisia de material radioactiv se face la coșul de ventilație al reactorului, o parte a materialului emis poate fi antrenată în jos, în regiunea de joasă presiune a părții adăpostite a coșului, situație în care înălțimea de emisie corectată pentru acest efect va fi mai mică decât înălțimea fizică a coșului, $h_{coș}$, cu o cantitate Δh_d :

$$H_1 = h_{coș} - \Delta h_d, \quad (m) \quad (11)$$

- Efectul de micșorare a înălțimii efective de emisie datorită curenților de aer descendenți se manifestă atunci când viteza de ieșire a gazelor pe coș, w_0 , este comparabilă sau mai mică decât viteza medie a vântului la coș, \bar{u} . În general, efectul apare și trebuie considerat atunci când $w_0 < 1.5 \bar{u}$. Corecția în astfel de situații va fi:

$$\Delta h_d = 2(1.5 - w_0 / \bar{u})D, \quad (\text{m}) \quad (12)$$

unde D = diametrul interior al coșului de ventilație.

- Dacă emisia nu are loc la coș, efectul nu trebuie considerat.

6.2. Corecția pentru efectul de antrenare a materialului în cavitatea aerodinamică a părții adăpostite a clădirii aflate în imediata vecinătate a coșului de ventilație (Δh_{en})

- Înălțimea de emisie, corectată pentru efectul datorat curenților de aer descendenți (ecuațiile (11) și (12)), poate fi redusă cu o cantitate Δh_{en} prin efectul de antrenare a materialului radioactiv în cavitatea aerodinamică a părții adăpostite a clădirii aflate în imediata vecinătate a coșului de ventilație, situație în care înălțimea efectivă de emisie devine:

$$H_2 = H_1 - \Delta h_{en} = h_{coș} - \Delta h_d - \Delta h_{en}, \quad (\text{m}) \quad (13)$$

- Atunci când H_1 este mai mică decât înălțimea clădirilor aflate în vecinătatea sursei, practic înălțimea coșului nu mai trebuie considerată, adică $H_2=0$.
- Dacă $H_1 > 2.5 H_{clădire}$, se poate considera că efectul de antrenare nu apare și $\Delta h_{en}=0$.
- Dacă $H_{clădire} \leq H_1 \leq 2.5 H_{clădire}$, corecția pentru efectul de antrenare depinde de viteza medie a vântului la coș, \bar{u} . Pentru viteze mici ($\bar{u} < 5$ m/s), efectul de antrenare nu apare și $\Delta h_{en}=0$. Pentru viteze mari ($\bar{u} \geq 5$ m/s), corecția datorată efectului de antrenare a materialului radioactiv în zona adăpostită a clădirii aflate în vecinătatea sursei trebuie calculată conform ecuației:

$$\Delta h_{en} = 1.5H_{clădire} - 0.6H_1, \quad (\text{m}). \quad (14)$$

6.3. Corecții de supraînălțare a penei de poluant radioactiv

- Înălțimea de emisie, corectată pentru efectele enunțate la punctele 6.1 și 6.2, poate suferi o creștere cu o cantitate $\Delta h_{m,b}$, ca urmare a vitezei de ieșire a materialului radioactiv pe coș (efectul de impuls) și/sau ca urmare a conținutului de căldură al poluantului (efectul de portanță):

$$H = h_{coș} - \Delta h_d - \Delta h_{en} + \Delta h_{m,b}, \quad (\text{m}). \quad (15)$$

- Supraînălțarea penei de poluant depinde în principal de clasa de stabilitate atmosferică, viteza vântului, conținutul de căldură al materialului emis și viteza de ieșire a efluenților gazoși pe coș.

- Când materialul radioactiv este supus ambelor efecte de supraînălțare (efectul de impuls, cu Δh_m , și efectul de portanță, cu Δh_b), dar unul din efecte predomină, va fi considerat doar efectul predominant:

$$\begin{aligned} \Delta h_{m,b} &= \Delta h_m, \text{ dacă } \Delta h_m \gg \Delta h_b \text{ (m)} \\ \Delta h_{m,b} &= \Delta h_b, \text{ dacă } \Delta h_b \gg \Delta h_m \text{ (m)}. \end{aligned} \quad (16)$$

- În situația unei emisii "reci" (emisie în care temperatura gazelor este doar cu 5 - 10 °C peste temperatura ambiantă), impulsul materialului emis este principalul factor de supraînălțare. Pentru emisii "calde" (cu temperaturi ale gazelor emise mai mari decât temperatura ambiantă cu mai mult de 50 °C), efectul de portanță devine predominant.
- Supraînălțarea penei de poluant radioactiv presupune două faze: faza de tranziție și fază finală, ambele depinzând de stabilitatea atmosferică și viteza vântului.

a) Efectul de portanță predominant, faza de tranziție a supraînălțării penei de poluant

- În condiții atmosferice instabile, neutre și ușor stabile, la distanța x pe direcția vântului, supraînălțarea penei de poluant în faza de tranziție se calculează cu formula (legea "2/3"):

$$\Delta h_b = \frac{1.6F^{1/3}x^{2/3}}{u}, \text{ dacă } x < 3.5x^0 \text{ (m)} \quad (17)$$

unde

\bar{u} = viteza medie a vântului la înălțimea de emisie (m/s),

F = parametrul de flux portant (m^4/s^3),

x^0 = distanța la care turbulența atmosferică începe să domine dezvoltarea penei de poluant (m), definită prin relațiile:

$$\begin{aligned} x^0 &= 14F^{5/8}, \text{ dacă } F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3, \\ x^0 &= 34F^{2/5}, \text{ dacă } F \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3. \end{aligned} \quad (17.a)$$

- Valoarea parametrului F se calculează cu ecuația:

$$1) F = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} g w_0 \left(\frac{D}{2} \right)^2, \text{ (m}^4/\text{s}^3) \quad (17.b)$$

unde

ρ_0 = densitatea gazelor radioactive emise (kg/m^3),

ρ_a = densitatea medie a aerului ambiant ($1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$ în condiții standard de temperatură și presiune),

g = accelerația gravitațională ($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$),

w_0 = viteza de ieșire a gazelor (m/s),

D = diametrul interior al coșului de ventilație (m).

2) Pentru un material de masă moleculară și căldură specifică asemănătoare cu cele ale aerului, ecuația (17.b) devine:

$$F = \frac{T_0 - T}{T_0} g w_0 \left(\frac{D}{2} \right)^2, \quad (\text{m}^4 / \text{s}^3) \quad (17.c)$$

unde

T_0 = temperatura gazelor emise (K),

T = temperatura medie a aerului ambiant (293 K).

- Pentru o sursă fierbinte, o alternativă de calcul destul de bună pentru parametrul F este:

$$F = \frac{g Q_H}{\pi C_p \rho_a T}, \quad (\text{m}^4 / \text{s}^3) \quad (17.d)$$

unde

Q_H = rata de emisie a căldurii datorată fluxului gazelor eliberate pe coș, cal/s, cu presupunerea că vaporii de apă nu condensează,

C_p = căldura specifică a aerului la presiune constantă, cal/kg/K.

În condiții standard de presiune și temperatură, $F = 3.7 \times 10^{-5} \text{ m}^4 / \text{s}^3$.

b) Efectul de portanță predominant, faza finală a supraînălțării penei de poluant

- Supraînălțarea finală a penei de poluant radioactiv, în condiții de stabilitate atmosferică, se calculează cu ecuația:

$$\Delta h_b = 2.6 \left(\frac{F}{uS} \right)^{1/3}, \quad (\text{m}) \quad (18)$$

unde

$$S = \text{parametru de stabilitate, calculat cu ecuația } S = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad (\text{s}^{-2}), \quad (18.a)$$

și $\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ = gradientul vertical de temperatură potențială în atmosferă, (K/m), calculat

cu formula:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = g / C_p + \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (\text{K/m}). \quad (18.b)$$

unde C_p trebuie exprimă în J/kg/K.

Se recomandă ca viteza medie a vântului și gradientul vertical de temperatură să se evalueze la înălțimea corespunzătoare punctului de emisie. Viteza vântului la orice înălțime z , $u(z)$, se poate calcula în funcție de viteza vântului măsurată la înălțimea de 10 m deasupra solului $u(10)$, cu formula:

$$u(z) = u(10) \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^m, \quad (18.c)$$

unde m este un coeficient ce depinde de clasa de stabilitate atmosferică și de natura terenului din vecinătatea sursei. În tabelul 4 sunt prezentate valorile coeficientului m .

Tabelul 4. Valorile coeficientului ce caracterizează profilul vertical al vântului, m [3].

Natura suprafeței terenului	Clasa de stabilitate					
	A	B	C	D	E	F
Suprafețe de apă	0.03	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12
Suprafețe agricole	0.10	0.15	0.20	0.25	0.35	0.40
Orașe, suprafețe împădurite	0.16	0.24	0.32	0.40	0.56	0.64

- Se recomandă ca pentru înălțimi mai mari de 200 m, să se utilizeze în calcule viteza vântului măsurată sau calculată la 200 m.

- În condiții neutre de stabilitate, supraînălțarea finală a penei de poluant poate fi estimată cu ecuația:

$$\Delta h_b = \frac{1.6F^{1/3}(3.5x^o)^{2/3}}{u}, \quad (\text{m}) \quad (19)$$

unde distanța x^o a fost definită în ecuația (17.a).

- În situații de calm (stabil sau neutru), supraînălțarea finală a penei de poluant poate fi estimată cu ecuația:

$$\Delta h_b = 5.0F^{1/4}S^{-3/8} \quad (\text{m}). \quad (20)$$

- În condiții neutre sau stabile cu vânt de intensitate mică, se recomandă utilizarea ecuației (20), dacă supraînălțarea calculată este mai mică decât cea calculată cu ecuațiile (18) sau (19).
- Ecuația (19) se aplică cu rezultate bune și în condiții de instabilitate atmosferică, pentru calculul supraînălțării medii.
- Ecuația (19) se aplică și în situații de atmosferă ușor stabilă, dacă valoarea calculată a supraînălțării este mai mică decât valoarea calculată cu ecuația (18).

c) Efectul de impuls predominant, faza de tranziție a supraînălțării penei de poluant

- Pentru un material radioactiv pentru care efectul de portanță nu este semnificativ, supraînălțarea de tranziție se calculează cu ecuația (legea "1/3"):

$$\Delta h_m = 1.89 \left[\frac{w_0^2 D}{u(w_0 + 3u)} \right]^{2/3} x^{1/3}, \quad (\text{m}). \quad (21)$$

d) Efectul de impuls predominant, faza finală a supraînălțării penei de poluant

- Pentru calculul supraînălțării finale a materialului radioactiv caracterizat în principal de impulsul inițial la ieșirea pe coș, se recomandă utilizarea uneia din ecuațiile (22) - (24), cea care dă valoarea cea mai mică pentru Δh_m , chiar dacă fiecare din ecuații descrie mai bine un anumit set de condiții atmosferice, după cum s-a constatat experimental.
- În condiții de stabilitate neutră cu vânt puternic, Δh_m se calculează cu ecuația:

$$\Delta h_m = \frac{1.5w_0 D}{u}, \quad (\text{m}). \quad (22)$$

- În situații de calm (neutru sau stabil), Δh_m se calculează cu ecuația:

$$\Delta h_m = 4 \left(\frac{F_m}{S} \right)^{1/4}, \quad (\text{m}) \quad (23)$$

unde

$$F_m \text{ este parametrul de flux al impulsului, } F_m = \frac{\rho_0}{\rho} w_0^2 \left(\frac{D}{2} \right)^2, \quad (\text{m}^4/\text{s}^2). \quad (23.a)$$

Pentru un material de masă moleculară și căldură specifică asemănătoare cu cele ale aerului, ecuația (23.a) devine:

$$F_m = \frac{T}{T_0} w_0^2 \left(\frac{D}{2} \right)^2, \quad (\text{m}^4/\text{s}^2). \quad (23.b)$$

- Pentru condiții stabile cu vânt puternic,

$$\Delta h_m = 1.5 \left(\frac{F_m}{u} \right)^{1/3} S^{-1/6}, \quad (\text{m}). \quad (24)$$

e) Ambele efecte, cu contribuții apropiate

- În general, contribuțiile la supraînălțarea penei de poluant nu trebuie însumate, ci trebuie considerat doar efectul predominant. Pentru situația specială în care cele două contribuții sunt semnificative și aproximativ egale, se va utiliza formula semi-empirică de tranziție de la ecuația (17) la ecuația (21).

$$\Delta h_{m,b} = 3^{1/3} \times \left[\frac{F_m x}{\left(\frac{1}{3} + \frac{\bar{u}}{w_0} \right)^2 (\bar{u})^2} + \frac{F x^2}{0.5(\bar{u})^3} \right]^{1/3} \quad (\text{m}). \quad (25)$$

- Supraînălțarea materialului radioactiv poate fi stopată de prezența unui strat atmosferic de inversie. În astfel de situații, se va utiliza supraînălțarea corespunzătoare fazei de tranziție în predicția supraînălțării finale, $\Delta h_{m,b}$. Se consideră că supraînălțarea se termină atunci când 10% din conturul penei de poluant intersectează, în plan vertical, stratul de inversie. Acest lucru se întâmplă

pentru valoarea lui x la care parametrul de dispersie vertical satisface relația:
 $\Sigma_z = (h_i - H)/2.15$.

Se recomandă ca în calculul înălțimii efective de emisie, corecțiile de supraînălțare ca urmare a efectelor de portanță și moment să fie făcute la sfârșit, după considerarea altor efecte de antrenare.

7. Influențe ale prezenței stratului de inversie asupra dispersiei atmosferice a materialului radioactiv

- Creșterea temperaturii cu înălțimea, spre deosebire de situațiile normale în care temperatura scade cu înălțimea, produce apariția unui strat de inversie, la sol sau la o anumită înălțime în atmosferă.
- Efectul prezenței stratului de inversie asupra factorului de diluție depinde de înălțimea efectivă la care se produce emisia, H , înălțimea la care se formează stratul de inversie, h_i , coordonatele punctului receptor relativ la sistemul de coordonate al sursei și valoarea parametrului de dispersie vertical la punctul receptor, Σ_z .
- Formarea stratului de inversie și stratificarea stabilă din stratul de inversie limitează dezvoltarea penei de poluant în plan vertical. La o anumită distanță față de sursă, pe direcția principală a vântului, are loc amestecul uniform în plan vertical al materialului radioactiv în masa de aer aflată sub stratul de inversie și procesul diluției pe verticală încetează. Materialul radioactiv se va regăsi, în plan vertical, în stratul de amestec de înălțime egală cu h_i . Dezvoltarea norului radioactiv în plan orizontal va continua, în absența unor obstacole majore (un deal, de exemplu).
- Când materialul radioactiv rămâne prins sub stratul de inversie și dacă inversia se menține pentru multă vreme, concentrațiile la sol într-un punct receptor vor fi mari.

7.1. Emisie sub limita inferioară a stratului de inversie, $H < h_i$

- În situația în care emisia are loc într-un strat mai puțin stabil decât stratul superior lui, undeva sub limita inferioară a stratului de inversie, se presupune o dublă reflexie a norului radioactiv pe suprafața stratului limită și pe suprafața solului. Factorul de diluție se poate calcula în astfel de situații cu formula:

$$\frac{\chi(x, y, 0)}{Q} = \frac{1}{\pi \Sigma_y \Sigma_z \bar{u}} \left\{ \exp\left(-\frac{H^2}{2\Sigma_z^2}\right) + \exp\left[-\frac{(2h_i - H)^2}{2\Sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(-2h_i - H)^2}{2\Sigma_z^2}\right] \right\}, (\text{s/m}^3) \quad (26)$$

- Ecuația (26) este o simplificare a formulei mult mai generale, care conține serii infinite de termeni exponențiali corespunzători multiplelor reflexii ale norului radioactiv pe suprafețele solului și a stratului de inversie:

$$f(\Sigma_z, H, h_i) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{-(z+H+2nh_i)^2}{2\Sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z-H+2nh_i)^2}{2\Sigma_z^2}\right)}{\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\Sigma_z^2}\right)}. \quad (26.a)$$

- Pentru $z=0$ sau $z \ll H$, ecuația (26.a) devine:

$$f(\Sigma_z, H, h_i) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{-(H+2nh_i)^2}{2\Sigma_z^2}\right)}{\exp\left(\frac{-H^2}{2\Sigma_z^2}\right)}. \quad (26.b)$$

- În situația în care dispersia în plan vertical a materialului radioactiv este limitată de prezența stratului de inversie format la înălțimea h_i , factorul de diluție poate fi calculat și cu ecuațiile (1) – (5), cu considerarea $f(\Sigma_z, H, h_i) = 1$ și considerând că valoarea parametrului de dispersie vertical rămâne constantă la distanțe dincolo de punctul în care $\Sigma_z = \frac{h_i}{2.15} \cong h_i / 2$.
- Se consideră că amestecul uniform al materialului radioactiv în stratul limitat superior de baza stratului de inversie se produce atunci când norul radioactiv a parcurs dublul distanței la care $\Sigma_z = \frac{h_i}{2.15} \cong h_i / 2$.
- În situația în care emisia are loc într-un strat mai stabil decât stratul superior, undeva sub limita inferioară a stratului de inversie, se recomandă în mod conservativ folosirea ecuațiilor (1) – (5) pentru calculul factorului de diluție, cu considerarea $f(\Sigma_z, H, h_i) = 1$.

7.2. Emisie peste limita inferioară a stratului de inversie

- Dacă emisia de material radioactiv are loc undeva mai sus de limita inferioară a stratului de inversie, într-un strat înalt mai stabil decât stratul de dedesupt, factorul de diluție în regiunea aflată sub stratul de inversie se poate calcula cu formula:

$$\frac{\chi(x, y, 0 \leq z < h_i)}{Q} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \Sigma_y h_i \bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right), \quad (\text{s/m}^3). \quad (27)$$

unde \bar{u} și Σ_z sunt considerați pentru stratul mai puțin stabil.

- În situația în care emisia are loc într-un strat mai puțin stabil decât stratul de dedesupt, undeva mai sus de limita inferioară a stratului de inversie, se recomandă folosirea ecuațiilor (1) – (5) pentru calculul factorului de diluție cu considerarea $f(\Sigma_z, H, h_i) = 1$, în care parametri de dispersie au valori corespunzătoare condițiilor meteorologice existente în stratul înalt.
- În ecuațiile (26) – (27) se consideră că înălțimea de formare a stratului de inversie este constantă cu distanța, pe direcția principală a vântului, dar această presupunere nu se respectă în zonele costiere și în anumite locuri situate în

interiorul continentului. De aceea, în astfel de situații, înălțimea de formare a stratului de inversie depinde de distanță, viteza vântului, viteze de frecare între diferitele mase de aer, gradientii de temperatură verticali, diferențele de temperatură între ocean și uscat.

8. Metoda Pasquill de determinare a clasei de stabilitate în funcție de condițiile meteorologice la sursă

- Caracterizarea dispersiei se realizează cu descrierea gradului de stabilitate atmosferică.
- Stabilitatea atmosferică se clasifică în cinci până la șapte clase, de la atmosfera foarte turbulentă până la atmosfera foarte stabilă, în funcție de condițiile meteorologice.
- Pasquill a creat un sistem în care stabilitatea este clasificată pe baza datelor despre viteza vântului, nebulozitate și radiație solară. Relația între clasele de stabilitate Pasquill și condițiile meteorologice este prezentată în tabelul 5.

Tabelul 5. Clasele de stabilitate Pasquill în funcție de condițiile meteorologice [3].

A - extrem instabil
B - moderat instabil
C - ușor instabil

D - neutru *
E - ușor stabil
F - moderat stabil; G – foarte stabil

Viteza vântului la 10 m, m/s	Strălucirea solară			Acoperirea cerului în timp de noapte	
	Puternică	Moderată	Slabă	Nebulozitate $\geq 4/8$	Nebulozitate $\leq 3/8$
< 2	A	A-B	B	-	-
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 - 5	B	B-C	C	D	E
5 - 6	C	C-D	D	D	D
> 6	D	D	D	D	D

- Gradul de stabilitate atmosferică este puternic influențat de gradientul vertical de temperatură și de componenta orizontală a vântului: gradienti negativi de valoare mare conduc, în general, la instabilitate atmosferică, condiții neutre corespund la gradienti negativi de valoare mică, iar gradienti pozitivi de temperatură conduc la stabilitate atmosferică. Există metode de determinare a stabilității atmosferice care utilizează gradienti verticali de temperatură și viteza vântului.

ii). Calculul concentrației în aer integrată în timp

- Activitatea efectivă pe direcția vântului, undeva la un punct receptor, se schimbă în funcție de timpul care s-a scurs din momentul emisiei până la ajungerea norului radioactiv deasupra punctului receptor. De aceea, termenul sursă inițial, adică activitatea totală emisă de sursă, Q_0 , (Bq), trebuie corectată cu factori care țin seama de fenomenele de dezintegrare radioactivă, apariția produșilor de filiație, depunerea uscată și depunerea umedă de material radioactiv pe sol. Activitatea efectivă la un punct receptor se calculează cu formula:

$$Q = Q_0(DEC)(DEP), \quad (\text{Bq}) \quad (28)$$

unde

Q_0 = activitatea inițială emisă de sursă, (Bq),

(DEC) = factor de corecție pentru dezintegrarea radioactivă și apariția produșilor de filiație, adimensional,

(DEP) = factor de corecție pentru depunerea umedă și uscată, adimensional.

- Activitatea efectivă se calculează pentru fiecare radionuclid emis în atmosferă.
- Contribuția totală la un receptor la trecerea norului radioactiv se exprimă în concentrația integrată în timp pentru un anumit radionuclid ($\text{Bq}\cdot\text{s}/\text{m}^3$), χ .
- Concentrația în aer integrată în timp, obținută la trecerea norului radioactiv pe deasupra unui punct receptor se calculează prin înmulțirea activității efective emise de sursă cu factorul de diluție atmosferică:

$$\chi = \left(\frac{\chi}{Q} \right) Q_0(DEC)(DEP), \quad (\text{Bq}\cdot\text{s}/\text{m}^3) \quad (29)$$

unde

$\frac{\chi}{Q}$ = factorul de diluție atmosferică la punctul receptor de coordonate (x, y, z) , calculat cu

ecuațiile (1) - (5) de la paragraful i).

1. Factorul de corecție pentru dezintegrarea radioactivă și apariția produșilor de filiație, (DEC)

- Pentru materialul radioactiv emis în atmosferă, activitatea în norul radioactiv scade în conformitate cu legea dezintegrării radioactive, adică

$$(DEC) = \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\lambda_i \frac{x}{u}\right), \quad (30)$$

unde

t = timpul parcurs de norul radioactiv de la sursă la punctul receptor, $t = \frac{x}{u}$,

x = distanța parcursă de norul radioactiv pe direcția vântului,

\bar{u} = viteza vântului la sursă = viteza de deplasare a materialului radioactiv pe direcția vântului,

λ_i = constanta de dezintegrare pentru radionuclidul i .

- Produșii de filiație ai unor elemente radioactive se pot forma în norul radioactiv, mai ales la distanțe mari de sursă, odată cu creșterea timpului parcurs de norul radioactiv de la sursă la punctul receptor, t . În acest caz, factorul de corecție are forma:

$$(DEC) = \frac{\lambda_d}{\lambda_i - \lambda_d} \left[\exp\left(-\lambda_d \frac{x}{u}\right) - \exp\left(-\lambda_i \frac{x}{u}\right) \right], \quad (31)$$

unde

λ_d = constanta de dezintegrare pentru descendentul d .

- Pentru emisii radioactive în situație de accident nuclear, apariția descendenților Rb-88, Rb-89, Xe-135m, Xe-135 și Cs-138 prin dezintegrarea Kr-88, Kr-89, I-135 și Xe-138 trebuie considerată în mod special.
- Corecțiile de tipul ecuației (31) în situația descendenților de viață lungă rezultați din precursori de viață scurtă sunt în general ne semnificative în emisiile atmosferice.

2. Factorii de corecție pentru depuneri umede și uscate

- Procesele de depunere care pot contribui la reducerea concentrațiilor radionuclizilor din norul radioactiv sunt:
 - depunere gravitațională,
 - depunere uscată,
 - depunere umedă.

2.1. Depunere gravitațională

- Materialul radioactiv emis în atmosferă la funcționarea normală a unui reactor nuclear sau în situație de accident se găsește în principal sub formă gazoasă sau sub forma unor picături sau particule de dimensiuni foarte mici (de ordinul a câțiva microni în diametru). Efectul depunerii gravitaționale este de aceea neglijabil în comparație cu efectele de depunere uscată și umedă și poate fi ignorat în calcule.

2.2. Depunere uscată

- Materialul radioactiv poate fi îndepărtat din norul radioactiv ca urmare a depunerii uscate, rezultat al difuziei turbulente, al mișcării browniene, al proceselor de atracție electrostatică, adsorbție, impact cu suprafața și al interacțiilor chimice. Rata depunerii uscate depinde de natura materialului radioactiv (dimensiunea particulelor, proprietăți fizice și chimice), de suprafața pe care acesta se depune, dar și de condițiile meteorologice și poate fi estimată cu ajutorul conceptului de viteză de depunere.
- Viteza de depunere se definește ca fiind raportul între cantitatea de material depusă pe sol în unitatea de timp și concentrația de material în aer, la nivelul solului.
- Rezultatele determinărilor experimentale ale vitezei de depunere sunt foarte variabile, depinzând de toți factorii enumerați anterior. Valori recomandate pentru orice clasă de stabilitate sunt prezentate în tabelul 6.
- Pentru diferitele forme chimice ale Iodului și ale altor radionuclizi pot fi utilizate, în absența unor date specifice, următoarele valori [6]:
 - particule (majoritatea radionuclizilor) 1×10^{-3} m/s,
 - gaze reactive, ex. vaporii anorganici de Iod 1×10^{-2} m/s,
 - forma gazoasă organică a Iodului 1×10^{-5} m/s.
- Gazele nobile nu se depun. Viteza de depunere a gazelor nobile este zero.

Tabelul 6. Valori recomandate pentru viteza de depunere (m/s), pentru orice clasă de stabilitate și diferite tipuri de suprafețe [7].

Radionuclidul		Tipul suprafeței pe care este depus materialul radioactiv				
		Apă	Sol	Zăpadă	Iarbă	Pădure
Iod	v_{dL}	0.2×10^{-2}	0.07×10^{-2}	0.07×10^{-2}	0.2×10^{-2}	1.0×10^{-2}
	v_{dH}	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	0.7×10^{-2}	3.0×10^{-2}	10.0×10^{-2}
Ruthenium	v_{dL}	0.2×10^{-2}	0.06×10^{-2}	0.2×10^{-2}	0.1×10^{-2}	0.5×10^{-2}
	v_{dH}	3.0×10^{-2}	0.3×10^{-2}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}
Cesiu	v_{dL}	0.1×10^{-2}	0.03×10^{-2}	0.1×10^{-2}	0.07×10^{-2}	0.4×10^{-2}
	v_{dH}	1.0×10^{-2}	0.1×10^{-2}	0.3×10^{-2}	0.3×10^{-2}	2.0×10^{-2}
Alți radionuclizi	v_{dL}	0.2×10^{-2}	0.2×10^{-2}	0.2×10^{-2}	0.2×10^{-2}	1.0×10^{-2}
	v_{dH}	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	3.0×10^{-2}	10.0×10^{-2}

v_{dL} - valoare relativ scăzută (limită inferioară), utilizată în general în calculul concentrației radioactive în aer;

v_{dH} - valoare relativ crescută (limită superioară), utilizată în general în calculul depunerii uscate pe sol.

- Viteza de depunere uscată depinde de diametrul aerodinamic al particulelor depuse. Particulele cu diametrul aerodinamic între 0.1 și 1 μm au o viteză de depunere de aproximativ 0.02×10^{-2} m/s, iar cele cu diametrul aerodinamic între 1 și 10 μm au viteze de depunere cuprinse între 0.02×10^{-2} m/s și 5×10^{-2} m/s [11].
- Tritiul eliberat în atmosferă prezintă, preponderent, două forme chimice: vapori de apă tritiat (HTO) și hidrogen tritiat (HT). Prin măsurări experimentale s-a estimat viteză de depunere a HTO ca fiind cuprinsă între 0.4×10^{-2} m/s și 0.8×10^{-2} m/s, dacă înălțimea tropopauzei se consideră ca fiind de 12 – 15 km. În aceleași condiții, viteza de depunere a HT a fost estimată ca fiind cu un ordin de mărime mai mică, adică de 0.04×10^{-2} m/s – 0.05×10^{-2} m/s [5].

- Factorul de corecție pentru depunerea uscată, pentru emisie instantanee sau de scurtă durată, se calculează cu formula:

$$(DEP)_d = \exp \left[- \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{v_{dL}}{u} \right) \cdot \int_0^x \frac{\exp(-H^2 / 2\sigma_z^2(x'))}{\sigma_z(x')} dx' \right]. \quad (32)$$

- Factorul de corecție pentru depunerea uscată, pentru emisie de lungă durată sau de durată prelungită, se calculează cu formula:

$$(DEP)_d = \sum_i \exp\left(-\alpha \int_0^x \frac{\exp(-H_i^2 / 2\sigma_{zi}^2(x'))}{\sigma_{zi}(x')} dx'\right),$$

unde

(33)

$$\alpha = 0.01 F_k F_{ki} \left[\frac{\tan \theta / 2}{\theta} \right] \left[\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \right] \left[\frac{v_{dL}}{u_i} \right],$$

cu sumare după toate clasele de stabilitate Pasquill (A - F).

- În ecuațiile (32) și (33) v_{dL} reprezintă viteza de depunere medie pe durata deplasării norului radioactiv.

- Depunerea de material radioactiv pe sol se calculează cu ecuația:

$$\omega = v_{dH} \chi(x, y, 0), \quad (\text{Bq/m}^2),$$
(34)

unde v_{dH} reprezintă viteza de depunere pe o anumită suprafață și într-un anumit punct receptor.

- Se recomandă ca în calculul depunerii de material radioactiv pe sol să se considere valorile v_{dH} (limita superioară) din tabelul 6 pentru vitezele de depunere.
- Pentru estimarea rapidă și conservativă a procesului de depunere totală (uscată și umedă) a aerosolilor și gazelor reactive se recomandă utilizarea unei viteze de depunere totală de 1000 m/zi, adică 1.16×10^{-2} m/s. Pentru H-3, C-14 și gazele nobile, viteza de depunere totală se consideră ca fiind zero [2].

2.3. Depunere umedă

- Depunerea umedă este procesul prin care materialul radioactiv este îndepărtat prin intermediul precipitațiilor (ploaie sau zăpadă) din norul radioactiv și depus pe sol.
- Există două mecanisme care sunt considerate în descrierea procesului de spălare a atmosferei și care produc depunerea umedă de material radioactiv pe sol: spălarea în norul de ploaie și spălarea sub baza norului de ploaie.

- Factorul de corecție pentru depunerea umedă se calculează cu ecuația:

$$(DEP)_w = \exp(-\Lambda t),$$
(35)

unde

Λ = coeficientul de spălare a atmosferei (s^{-1}),

t = timpul cât materialul radioactiv este supus procesului de spălare.

- Coeficientul de spălare este funcție de mulți parametri, cum ar fi: starea chimică și fizică a materialului radioactiv, dimensiunea picăturilor de ploaie sau forma cristalelor de zăpadă, intensitatea și rata precipitațiilor. Valorile recomandate ale coeficientului de spălare (limite inferioare și superioare), preluate din literatura de specialitate, sunt prezentate în tabelul 7.
- Se recomandă ca în ecuația (35) să se utilizeze limitele inferioare ale coeficientului de spălare.
- Se recomandă ca în calculul depunerii umede de material radioactiv pe sol să se considere limitele superioare ale coeficientului de spălare.

Tabelul 7. Valori recomandate pentru coeficientul de spălare, (s^{-1}) [7].

Radionuclidul	Ploaie, mm/h				Zăpadă, mm/h (echiv. apă)				
	0.5	1	3	5	0.5	1	3	5	
Tritiu și Iod	Λ_L	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	$< 10^{-7}$	1×10^{-7}	2×10^{-7}	3×10^{-7}
	Λ_H	1×10^{-4}	2×10^{-4}	4×10^{-4}	6×10^{-4}	2×10^{-7}	4×10^{-7}	8×10^{-7}	1×10^{-6}
Alți radionuclizi	Λ_L	1×10^{-5}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	5×10^{-5}	3×10^{-4}	5×10^{-4}	8×10^{-4}	1×10^{-3}
	Λ_H	2×10^{-4}	3×10^{-4}	7×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	2×10^{-2}	4×10^{-2}	5×10^{-2}

Λ_L - valoare relativ scăzută (limită inferioară), utilizată în general în calculul concentrației radioactive în aer;

Λ_H - valoare relativ crescută (limită superioară), utilizată în general în calculul depunerii umede pe sol.

iii). Calculul concentrației radioactive depuse pe sol

1. Depunere uscată

- Concentrația radioactivă depusă pe sol în absența precipitațiilor, la un punct receptor situat pe direcția principală a vântului, se calculează prin înmulțirea concentrației în aer integrată în timp (ecuația (29)) cu viteza de depunere uscată, v_d :

$$\omega_d = v_d \left(\frac{\chi}{Q} \right) Q_0 (DEC) (DEP), \quad (\text{Bq/m}^2). \quad (36)$$

- Din motive de conservatorism, se recomandă utilizarea, în ecuația (36), a valorilor superioare ale vitezei de depunere, prezentate în tabelul 6.

2. Depunere umedă

- Activitatea depusă pe unitatea de suprafață în condiții de precipitații, se calculează, pentru un punct receptor de coordonate (x, y, z) , cu ecuația:

$$\omega_w = \int_0^{\xi} \Lambda \chi(x, y, z) dz, \quad (\text{Bq/m}^2). \quad (37)$$

unde

ξ = înălțimea (în m) din norul radioactiv care este supusă procesului de spălare.

- Valoarea maximă pentru depunerea umedă pe sol se obține atunci când se consideră că întregul nor radioactiv este supus procesului de spălare, adică $\xi \rightarrow \infty$ și pentru Λ se iau limitele superioare din tabelul 7.
- Depunerea umedă pe sol, pentru o emisie instantanee sau de scurtă durată, pentru orice înălțime efectivă de emisie, se calculează cu formula:

$$\omega_w = \frac{\Lambda_H Q_0 (DEC) \exp(-\Lambda_L t)}{\sqrt{2\pi u \Sigma_y}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \text{ (Bq/m}^2\text{)}. \quad (38)$$

- Depunerea umedă pe sol, pentru o emisie de durată prelungită sau de lungă durată, pentru orice înălțime efectivă de emisie, se calculează cu formula:

$$\omega_w = \frac{\Lambda_H Q_0 (DEC) \exp(-\Lambda_L t)}{u \theta_L x} \text{ (Bq/m}^2\text{)}. \quad (39)$$

- Se presupune, în mod conservativ, că odată depus, materialul radioactiv nu este îndepărtat de pe sol prin procedee mecanice sau alte procese fizice.

3. Calculul resuspensiei

- Odată depus pe sol, materialul radioactiv poate fi antrenat înapoi în aer (resuspendat), ca urmare a vântului la sol sau a activităților umane. Inhalarea de material radioactiv resuspendat de pe sol poate deveni, în anumite condiții, o importantă cale de expunere a organismului uman.
- Relația între concentrația depusă pe sol și concentrația de material radioactiv resuspendat în aer este dată de factorul de resuspensie K ,

$$K \text{ (m}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Concentrația în aer de material resuspendat (Bq/m}^3\text{)}}{\text{Depunerea pe sol (Bq/m}^2\text{)}}. \quad (40)$$

- Dependența temporală a factorului de resuspensie K poate fi descrisă de două componente exponențiale:

$$K = A \exp(-\lambda_1 t) + B \exp(-\lambda_2 t), \quad (41)$$

unde

A și B sunt constante,

A - valorile preluate din literatura de specialitate sunt în intervalul 10^{-4} - 10^{-6} m^{-1} ,

B - valorile preluate din literatura de specialitate sunt în intervalul 10^{-8} - 10^{-10} m^{-1} ,

λ_1 reprezintă o rată efectivă de îndepărtare pe termen scurt, cu timp de înjumătățire de ordinul săptămânilor,

λ_2 reprezintă o rată efectivă de îndepărtare pe termen lung, cu timp de înjumătățire cuprins în intervalul 50 - 100 ani.

- Valorile de referință pentru constantele din ecuația (41) sunt:

$$A = 10^{-5} \text{ m}^{-1}, B = 10^{-9} \text{ m}^{-1}, \lambda_1 = 1 \times 10^{-2} \text{ zile}^{-1} \text{ și } \lambda_2 = 2 \times 10^{-5} \text{ zile}^{-1}.$$

vi). Acuratețea predicțiilor modelului Gaussian

- Modelul gaussian prezentat mai sus are limitări și predicțiile lui prezintă un inerent nivel de incertitudine.

- Pentru distanțe mai mici de 1 km, în condiții ideale de teren uniform plat și condiții meteorologice stabile în timp, concentrația în aer integrată în timp, maximă, pe direcția principală a vântului, la nivelul solului, calculată cu modelul gaussian este corectă în proporție de doar 20%, pentru o emisie la nivelul solului și în proporție de 40% pentru o emisie la coș. Incertitudinea asociată predicțiilor modelului în intervalul $\pm 2 \Sigma_y$, față de direcția principală a vântului este estimată a varia până la un factor 2.
- Atunci când modelul gaussian este aplicat în condiții meteorologice și de teren apropiate de condițiile ideale, pentru distanțe mai mici de 10 km, împrăștierea valorilor estimate crește și incertitudinea asociată predicțiilor variază cu un factor 2.
- Atunci când modelul gaussian este aplicat pentru distanțe mari, până la 100 km, în condiții meteorologice reale, incertitudinea asociată predicțiilor variază cu un factor 4 până la 10.
- În situații meteorologice cu vânt slab (< 2 m/s), șerpuirea norului radioactiv și schimbările rapide de direcție a vântului pot fi mult subestimate de modelul gaussian, ducând la supraestimarea concentrațiilor în aer integrate în timp.
- Incertitudinile asociate predicțiilor modelului gaussian la diferite distanțe față de sursă, pentru emisii cu înălțimea efectivă de emisie < 100 m și în condiții meteorologice cu vânt > 2 m/s sunt prezentate în tabelul 8.

Tabelul 8. Incertitudini asociate predicțiilor modelului gaussian de dispersie a materialului radioactiv în atmosferă [7].

Tipul emisieii	100 m $< x < 1$ km	1 km $< x < 10$ km	10 km $< x < 100$ km
Emisie de scurtă durată	cu un factor 2	cu un factor 5	cu un factor 10
Emisie de durată prelungită sau de lungă durată	cu un factor 1.4	cu un factor 2	cu un factor 4

v). Considerații speciale privind dispersia materialului radioactiv eliberat în atmosferă ca urmare a unui incendiu sau explozie ne-nucleară

1. Incendiu [1]

- În situația specială a unui incendiu care implică eliberare în atmosferă de material radioactiv, cum ar fi de exemplu un accident cu avion prăbușit în piscina cu combustibil a unui reactor nuclear, dispersia materialului radioactiv în atmosferă se simulează cu ecuațiile modelului gaussian, descrise anterior, cu câteva considerații speciale.

- Supraînălțarea penei de poluant radioactiv se datorează energiei calorice a materialului emis, astfel încât efectul principal care produce înălțarea materialului este efectul de portanță. Efectul de impuls este nesemnificativ în astfel de situații.
- Parametrii importanți în calculul înălțimii efective de emisie sunt puterea calorică a materialului eliberat la incendiu, Q , cal/s, și parametrul de flux portant, F , m^4/s^3 .
- Pentru un incendiu de combustibil, puterea calorică a materialului emis în atmosferă se calculează cu ecuația:

$$Q = VdH(1 - f)/t, \quad (42)$$

unde

Q = puterea calorică a materialului eliberat la incendiu, cal/s,

V = volumul de combustibil ars în timpul t , m^3 ,

d = densitatea combustibilului ars, kg/m^3 ,

H = căldura de ardere, cal/kg,

f = fracțiunea din căldura de ardere care este eliberată,

t = durata incendiului, s.

- Volumul de combustibil consumat în timpul t determină supraînălțarea materialului radioactiv în atmosferă. Experimente au arătat că rate de ardere, exprimate în rate de adâncime de piscină, se încadrează în general în intervalul a 1 - 5 mm pe minut.
- Valori recomandate pentru termenii din ecuația (42) sunt: $f = 30\%$, $d = 0.810 \text{ g/cm}^3$, $H = 1.2 \times 10^4 \text{ cal/kg}$.
- Parametrul de flux portant, F , m^4/s^3 se calculează, funcție de puterea calorică a materialului eliberat, cu ecuația:

$$F = \frac{gQ}{\pi C \rho T}, \quad (43)$$

unde

g = accelerația gravitațională (9.8 m/s^2),

C = căldura specifică a gazelor emise ($\text{cal}/(\text{kg}\cdot\text{K})$),

ρ = densitatea aerului, (kg/m^3),

T = temperatura aerului ambiant (K).

- Ecuațiile de calcul a supraînălțării prezentate anterior (formulele lui Briggs) se aplică în cazul emisiei care are loc la coș, considerat de diametru interior neglijabil.
- Pentru o piscină care arde, de rază R , supraînălțarea se calculează cu formula:

$$H_1 = \left[H^3 + \left(\frac{R}{\gamma} \right)^3 \right]^{1/3} - \frac{R}{\gamma}, \quad (44)$$

unde

H = înălțimea efectivă de emisie, calculată cu metodologia Briggs, m,

R = raza incendiului la sol (raza piscinei arzând), m,

γ = coeficient de antrenare = 0.6.

- Odată ce se calculează înălțimea efectivă la care se ridică materialul radioactiv, raza de dispersie a materialului la înălțimea H_1 se consideră ca fiind:

$$R_{nor} = 0.6H_1. \quad (45)$$

- Pentru a modela distribuția inițială de material radioactiv la înălțimea H_1 , se presupune existența unui termen sursă virtual, pe direcția vântului, poziționat la distanța $-x$ față de punctul de emisie. Termenul sursă virtual creează deasupra punctului de emisie, la înălțimea H_1 , parametri de dispersie care au valorile:

$$\sigma_y(x=0) = \sigma_z(x=0) = \max(0.5R_{nor}, 0.5R_{piscina}). \quad (46)$$

2. Explozie ne-nucleară [1]

- Cinci termene sursă modelează distribuția inițială de material radioactiv în situația unei explozii. Pentru fiecare sursă reală se presupune existența a două termene sursă virtuale, pe direcția vântului, poziționate la distanța $-dy$, respectiv $-dz$, față de punctul exploziei, aceste termene sursă virtuale generând în punctul de emisie, la înălțimea finală, parametri de dispersie σ_y și σ_z .

- Distribuția surselor se consideră ca fiind:

4% la nivelul solului ($h_1=0$),

16% la $h_2=0.2$ din înălțimea norului format în urma exploziei,

25% la $h_3=0.4$ din înălțimea norului format în urma exploziei,

35% la $h_4=0.6$ din înălțimea norului format în urma exploziei,

20% la $h_5=0.8$ din înălțimea norului format în urma exploziei.

- Parametrii caracteristici norului format în urma exploziei se calculează cu ecuațiile:

$$H_{nor} = 76w^{0.25}, \quad (\text{m}) \quad (47)$$

$$R_{nor} = 0.20H_{nor}, \quad (\text{m})$$

unde

H_{nor} = înălțimea norului format în urma exploziei,

R_{nor} = raza, la nivelul solului, a norului format în urma exploziei,

w = cantitatea de explozibil folosită la explozie.

- Înălțimea efectivă de emisie se consideră ca fiind: $H_{eff} = 0.8H_{nor}$.
- Parametri de dispersie σ_y și σ_z se calculează, deasupra punctului de explozie, cu ecuațiile:

$$\sigma_y(x=0) = 0.5R_{nor}, \quad (48)$$

$$\sigma_z(x=0) = 0.2H_{nor}.$$

Anexa 3.

Calculul dispersiei acvatice a materialului radioactiv

Modelele de dispersie a materialului radioactiv în mediul acvatic presupun rezolvarea ecuației:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = A + D - R + P - \lambda C, \quad (1)$$

unde

- C = concentrația în apă a radionuclidului considerat, (Bq/m³);
- t = timpul mediu necesar deplasării radionuclidului la punctul receptor, (s);
- A = termen de advecție;
- D = termen de difuzie;
- R = termen referitor la captura de radionuclizi de către sedimentul aflat în suspensie;
- P = termen care consideră sursele externe sau absorbția de radionuclizi (eliminările din sistem) la limite, sedimentarea, fixarea biologică, dar nu transferul de la sau la sedimentele în suspensie;
- λ = constanta de dezintegrare a radionuclidului.

Termenii ecuației (1) se scriu, în condiții de echilibru:

$$A = u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z}$$
$$D = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2)$$
$$R = K_d S \frac{\partial C}{\partial t},$$

unde

- u, v, w = componentele vitezei apei de-a lungul axelor de coordonate x, y și z ;
- K_x, K_y, K_z = coeficienții de difuzie turbulentă pe direcțiile x, y și z ;
- S = concentrația sedimentelor aflate în suspensie în apă;
- K_d = coeficientul de distribuție la echilibru între fazele solidă și lichidă.

- Datorită complexității interacțiilor considerate, ecuația (1) nu poate fi rezolvată în general decât prin tehnici numerice. Pentru a obține soluții analitice, trebuie elaborate ipoteze simplificatoare. Ipotezele trebuie să reprezinte bine situația reală.
- Modelarea matematică a dispersiei acvatice presupune, în general, trei faze:
 - faza 1: amestec inițial,
 - faza 2: se extinde de la faza 1 până la distanțe la care s-a realizat amestecul complet pe toată secțiunea transversală a mediului acvatic,
 - faza 3: se extinde în continuarea fazei 2 și presupune, în general, și considerarea interacțiilor cu sedimentul.
- Amestecul inițial al efluenților radioactivi lichizi cu volumul de apă al mediului receptor depinde de factori ca: geometria de deversare (punctul de deversare, la

suprafață sau imersat, una sau mai multe guri de deversare, lărgimea și adâncimea jetului de deversare), temperatura și viteza de ieșire a efluenților, geometria mediului acvatic receptor, caracteristicile curenților de curgere, incluzând viteze de curgere, direcții și temperaturi.

- Determinarea directă a coeficienților de difuzie se realizează prin diferite metode de măsurare cu trasori, cum ar fi coloranți fluorescenți, substanțe radioactive sau elemente stabile.
- Se recomandă utilizarea ca trasori a unor elemente neutre în raport cu mediul ambiant, pentru a evita efecte secundare și complicații în interpretare.

1. Transportul radionuclizilor în fluvii/râuri

- Pentru simularea dispersiei efluenților radioactivi lichizi în mediul acvatic, acesta este divizat în patru categorii: fluvii / râuri, lacuri, estuare și zone maritime costiere.
- În cuprinsul acestei anexe se va face o descriere a modelării matematice a transportului și diluției de material radioactiv în fluvii (râuri) sau construcții hidrotehnice tip canal.
- Metodologia de calcul prezentată în continuare se bazează pe soluții analitice ale ecuațiilor de transport ce descriu migrarea radionuclizilor în ape de suprafață, obținute în anumite ipoteze simplificatoare:
 - regim staționar de curgere (caracteristicile de curgere ale mediului acvatic, de ex. viteza de curgere și adâncimea apei nu se schimbă semnificativ cu distanța),
 - procese simple de determinare a coeficienților de dispersie și a parametrilor specifici fluviului,
 - geometria fluviului (secțiunea transversală) nu se modifică semnificativ cu distanța,
 - radionuclizii în apă și sediment, în condițiile unei emisii continue, de rutină, sunt în echilibru.

1.1. Caracteristicile specifice fluviului în care are loc deversarea

- Pentru calculul concentrației radionuclizilor în apa fluviului, trebuie determinate caracteristicile specifice fluviului:
 - a) lărgimea fluviului B , (m),
 - b) adâncimea fluviului d , (m),
 - c) debitul total de curgere al fluviului, Q (m^3/s).
- Caracteristicile cursului de apă trebuie determinate pe baza studiilor hidrologice desfășurate în zona de influență a instalației nucleare.
- În absența unor rezultate experimentale, se pot utiliza următoarele relații:

$$d = 0.163 \cdot Q^{0.447}, \quad (3)$$

$$B = 10 \cdot Q^{0.460}, \quad (4)$$

unde

B = lărgimea fluviului (m),

d = adâncimea fluviului (m),

Q = debitul de curgere al fluviului (m^3/s).

- Pentru a estima debitul, lărgimea și adâncimea fluviului, ca valori minime obținute în ultimii 30 ani, se va proceda astfel:
 - se estimează lărgimea fluviului, prin observații sau cu ajutorul unei hărți, B ;
 - cu valoarea obținută pentru B , se estimează, cu formula (4) sau utilizând valorile din tabelul 1, debitul mediu anual, Q ;
 - se calculează debitul minim multi-anual (pentru o perioadă de 30 ani), ca fiind $1/3$ din debitul mediu anual;
 - cu valoarea debitului minim multi-anual se obțin, cu formulele (3) și (4) sau utilizând valorile calculate în tabelul 1, B și d corespunzătoare nivelului minim al debitului fluviului, calculat pentru o perioadă de 30 ani.

Tabelul 1. Relații între Q , B și d [2]. (*)

Q (m ³ /s)	B (m)	d (m)	Q (m ³ /s)	B (m)	d (m)
0.1	3.47	0.058	100	83.2	1.28
0.2	4.77	0.079	200	114	1.74
0.3	5.75	0.095	300	138	2.09
0.4	6.56	0.108	400	157	2.37
0.5	7.27	0.120	500	174	2.62
0.6	7.91	0.130	600	190	2.84
0.7	8.49	0.139	700	204	3.05
0.8	9.02	0.148	800	216	3.24
0.9	9.53	0.156	900	229	3.41
1	10.0	0.16	1 000	240	3.57
2	13.8	0.22	2 000	330	4.87
3	16.6	0.27	3 000	398	5.84
4	18.9	0.30	4 000	454	6.64
5	21.0	0.34	5 000	503	7.34
6	22.8	0.36	6 000	547	7.96
7	24.5	0.39	7 000	587	8.53
8	26.0	0.41	8 000	624	9.05
9	27.5	0.44	9 000	659	9.54
10	28.8	0.48	10 000	692	10.0
20	39.7	0.63	20 000	952	13.6
30	47.8	0.75	30 000	1150	16.3
40	54.6	0.85	40 000	1310	18.6
50	60.5	0.94	50 000	1450	20.5
60	65.8	1.02	60 000	1580	22.3
70	70.6	1.09	70 000	1690	23.9
80	75.1	1.16	80 000	1800	25.3
90	79.2	1.22	90 000	1900	26.7
			100 000	2000	28.0

(*) – interpolare liniară între valori.

- Viteza de curgere a fluviului, u (m/s), corespunzătoare debitului minim multi-anual se calculează cu formula:

$$u = \frac{Q}{dB}. \quad (5)$$

1.2. Formule empirice de calcul al coeficienților de difuzie turbulentă

- Coeficienții de difuzie turbulentă variază semnificativ de la un fluviu/râu la altul și chiar pe parcursul aceluiași fluviu/râu.
- Coeficienții de difuzie longitudinal (K_x) și lateral (K_y) variază cu câteva ordine de mărime în funcție de dimensiunile fluviului.
- Următoarele expresii empirice de calcul oferă predicții în acord destul de bun cu realitatea, pentru un domeniu larg de variație a caracteristicilor fluviului/râului:
 - coeficientul de difuzie vertical se calculează cu ecuația:

$$K_z = 0.067 \cdot u_* \cdot d, \quad (6)$$

unde

u_* = viteza tangențială (m/s) = $0.1u$.

- coeficienții de dispersie longitudinal și lateral se calculează cu ecuațiile:

$$K_x = \frac{u^2 B^2}{30u_* d}, \quad (7)$$

$$K_y = \alpha \cdot d \cdot u_*, \quad (8)$$

unde

α = coeficient de proporționalitate, ce variază între 0.1 – 0.2 pentru râuri mici și canale de irigații și între 0.6 – 2.0 pentru fluvii; ca valoare de referință se consideră $\alpha = 0.6$.

- Ecuațiile (6) – (8) se scriu, cu considerarea $u_*=0.1u$ și $\alpha = 0.6$:

$$K_z = 0.0067 \cdot u \cdot d, \quad (9)$$

$$K_x = \frac{uB^2}{3d}, \quad (10)$$

$$K_y = 0.06 \cdot d \cdot u. \quad (11)$$

1.3. Condiții de amestec parțial / complet

- Pentru a obține distanțele, de-a lungul direcției de curgere a fluviului, la care amestecul efluentului radioactiv cu mediul receptor este complet, se face presupunerea că amestecul, în plan orizontal, respectiv în plan vertical, este realizat atunci când concentrația minimă este cel puțin egală cu jumătate din concentrația maximă în plan orizontal, respectiv în plan vertical.

- Presupunând că efluentul radioactiv este deversat de pe unul din malurile fluviului, la adâncimea $d/2$, distanțele longitudinale la care se produce amestecul în plan orizontal, respectiv în plan vertical, sunt:

$$L_y = 0.18 \frac{uB^2}{K_y} = 3 \frac{B^2}{d}, \quad (12)$$

$$L_z = 0.045 \frac{ud^2}{K_z} = 7d. \quad (13)$$

- Întrucât aproape orice fluviu/râu are o lărgime mai mare decât adâncimea, distanța L_y este mai mare decât L_z .
- Astfel încât, la distanțe mai mari decât L_y , în lungul direcției de curgere a apei, efluentul radioactiv este complet amestecat atât în plan orizontal, cât și în plan vertical.
- În regiunea în care $x < L_z$, distribuția radionuclizilor se tratează tridimensional. Pentru această regiune se poate considera că nu există diluție a efluentului radioactiv cu apa fluviului. Această abordare este practic independentă de tipul mediului acvatic în care se face deversarea, iar concentrația radioactivă în apă se calculează cu ecuația:

$$C_{w,i} = C_0 = \frac{W_i}{Q}, \quad (14)$$

unde

$C_{w,i}$ = concentrația radionuclidului i în apă, Bq/m³,

C_0 = concentrația radioanucidului în efluentul lichid la eliberarea în mediul acvatic, Bq/m³,

W_i = media anuală a ratei de deversare pentru radionuclidul i , Bq/s,

Q = debitul efluentului lichid, m³/s.

1.4. Ecuații de transport și soluții analitice în situația unei emisii de lungă durată și cu considerarea amestecului complet între efluentul radioactiv și apa fluviului

- După realizarea amestecului complet, ecuația de transport a radionuclizilor în apa fluviului poate fi scrisă ca fiind bi-dimensională. Cu considerarea doar a fenomenului de dezintegrare radioactivă, ecuația se scrie:

$$ud \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (K_y d \frac{\partial C}{\partial y}) - (\lambda d)C, \quad (15)$$

unde termenii au fost definiți anterior.

- Întrucât, în situații reale, u și d sunt funcții variabile de y , ecuația (15) nu va avea, în general, soluții analitice. Pentru modificarea formei ecuației, se introduce variabila independentă q , definită ca:

$$q = \int_0^y (ud) dy. \quad (16)$$

Cantitatea q exprimă debitul cumulat între $y = 0$ și un y oarecare, pe direcția perpendiculară de curgere. Atunci când $y \rightarrow B$, rezultă că $q \rightarrow Q$, unde B este lățimea fluviului și Q este debitul total de curgere.

Înlocuind ecuația (16) în ecuația (15), rezultă următoarea ecuație de transport:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial q} \left[(K_y u d^2) \frac{\partial C}{\partial q} \right] - \frac{\lambda}{u} C. \quad (17)$$

În termenul de dezintegrare, se poate înlocui u cu viteza medie \bar{u} . În acest caz, se poate scrie:

$$C(x, q) = \chi(x, q) \exp\left(-\frac{\lambda x}{\bar{u}}\right). \quad (18)$$

Rezultatul este următoarea ecuație de transport pentru concentrația χ :

$$\frac{\partial \chi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial q} \left[(K_y u d^2) \frac{\partial \chi}{\partial q} \right]. \quad (19)$$

Cantitatea $D=K_y u d^2$ este cunoscută ca factor de difuzie. Factorul de difuzie D , variabil, poate fi înlocuit printr-un factor constant definit ca:

$$\overline{K_y u d^2} = \frac{1}{Q} \int_0^Q K_y u d^2 dq. \quad (20)$$

Ecuația (19) se poate scrie acum:

$$\frac{\partial \chi}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \chi}{\partial q^2}, \quad (21)$$

unde prin D se înțelege factorul de difuzie constant.

Ecuația (21) este o ecuație de difuzie tipică care permite soluții analitice.

Presupunând că deversarea de efluenți radioactivi se realizează cu o rată constantă W (Bq/s) și considerând coordonatele sursei ca fiind $x=0$ și $y=y_s$ și corespunzător lui y_s ca fiind debitul cumulat q_s , soluția analitică a ecuației (21) este:

$$\chi = \frac{W}{Q} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D x}{Q^2}\right) \cos\left(\frac{n \pi q_s}{Q}\right) \cos\left(\frac{n \pi q}{Q}\right) \right]. \quad (22)$$

Cu presupunerea că dispersia efluentului are loc într-un canal uniform, rectangular și cu margini relativ drepte, cu viteza constantă U , în ecuația (22) se pot face transformările ca în parantezele următoare:

$$\left\{ \begin{array}{l} D/Q^2 \\ q \\ Q \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K_y / UB^2 \\ y \\ B \end{array} \right\}.$$

Forma generală prezentată în (22) este de preferat, totuși, în situația unor cursuri de apă neregulate.

1.5. Emisii accidentale

- Există multe situații în care deversarea de efluenți radioactivi se face discontinuu, cu întreruperi, în loturi de efluenți. Această situație se întâlnește și în cazul unor evacuări accidentale de efluenți lichizi.
- În astfel de situații, concentrația radionuclizilor trebuie calculată ca funcție dependentă de timp și spațiu.
- Concentrația radionuclidului într-un canal rectangular, cu margini drepte, corespunzătoare unei emisii instantanee a unei cantități finite de material, la o sursă de coordonate $x=0$ și $y=y_s$ se calculează cu ecuația:

$$C = \frac{M}{(4\pi K_x t)^{1/2} A} \exp\left\{-\frac{[x-ut]^2}{4K_x t} - \lambda t\right\} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 K_y t}{B^2}\right) \cos\left(n\pi \frac{y_s}{B}\right) \cos\left(n\pi \frac{y}{B}\right)\right] \quad (23)$$

A = aria secțiunii transversale,

M = activitatea eliberată (în Bq),

t = timpul scurs de la emisie,

iar restul termenilor au fost definiți anterior.

- Utilitatea ecuației (23) este aceea că permite calculul concentrației radionuclizilor în situații reale de evacuare. În cazul unei evacuări de scurtă durată, împrăștierea radionuclizilor în lungul direcției de curgere a apei (cu considerarea lui K_x) poate fi un mecanism important de dispersie, care nu este considerat în modelul emisiilor de lungă durată.

1.6. Ecuații simplificate de calcul a concentrațiilor radionuclizilor

- Ecuațiile generale prezentate în paragraful 1.4 pot fi simplificate, pe baza considerentelor făcute în paragrafele 1.1 – 1.3, după cum urmează: cu considerarea ratei de amestec, a timpului mediu în care radionuclizii ajung de la sursă la punctul receptor și a fenomenului de dezintegrare radioactivă, ecuația (14) devine:

$$C_{w,i} = P \frac{W_i}{Q} M_p \exp(-\lambda_i t_p), \quad (24)$$

unde

P = factor de conversie ce leagă unitățile de rată de emisie și debitul fluviului cu cele de concentrație în apă,

M_p = rata de amestec, inversul factorului de diluție, adimensional,

λ_i = constanta de dezintegrare radioactivă (s^{-1}),

t_p = timpul mediu necesar deplasării radionuclidului i la punctul receptor (s).

- Rata de amestec M_p în ecuația (24) are valoarea 1 pentru efluent nediluat și are valoarea Q/R în situație de amestec total, unde R este valoarea medie anuală a debitului fluviului.
- Pentru aflarea concentrației radionuclizilor la un punct receptor situat pe malul opus punctului de deversare, se utilizează ecuația:

$$C_{w,i} = \frac{W_i}{Q} \exp\left(-\frac{\lambda_r x}{U}\right) = C_t, \quad (25)$$

unde

x este distanța între punctul de deversare și punctul receptor.

- Pentru aflarea concentrațiilor radionuclizilor la un punct receptor situat pe același mal cu punctul de deversare, se consideră două situații:
 - a) $x < L_z$, situație în care se presupune că materialul radioactiv nu este diluat și concentrația radionuclizilor în apa fluviului se calculează cu ecuația (14) și
 - b) $x > L_z$, situație în care se presupune că s-a realizat amestecul complet în plan vertical al materialului radioactiv cu apa fluviului; concentrația materialului radioactiv în apa fluviului trebuie corectată cu un coeficient de amestec parțial P_r , care consideră că amestecul în plan orizontal poate fi incomplet la distanța x corespunzătoare punctului receptor: $C_{w,i} = C_t P_r$, (26)

unde P_r se obține din tabelul 2, în funcție de indexul de amestec parțial A , calculat

cu ecuația: $A = \frac{1.5dx}{B^2}$; pentru $x > 3B^2/d$, $P_r \cong 1$.

Tabelul 2. Valori recomandate pentru factorul de corecție pentru amestec parțial, P_r [2]. (*)

A	P_r	A	P_r	A	P_r	A	P_r
1×10^{-6}	31.0	1×10^{-4}	20.9	1×10^{-2}	10.7	1	2.6
2	29.8	2	19.4	2	9.3	2	2.0
3	28.9	3	18.5	3	8.5	3	1.7
4	28.2	4	17.8	4	7.9	4	1.5
5	27.6	5	17.4	5	7.5	5	1.4
6	27.2	6	17.1	6	7.2	6	1.3
7	26.9	7	16.7	7	6.9	7	1.3
8	26.7	8	16.4	8	6.6	8	1.2
9	26.4	9	16.1	9	6.3	9	1.1
1×10^{-5}	26.1	1×10^{-3}	15.9	1×10^{-1}	6.0	10	1.0
2	24.8	2	14.2	2	4.8	20	1.0
3	23.6	3	13.3	3	4.2	30	1.0
4	22.9	4	12.8	4	3.7	40	1.0
5	22.5	5	12.2	5	3.4	50	1.0
6	22.1	6	11.8	6	3.2	60	1.0
7	21.6	7	11.5	7	3.0	70	1.0
8	21.3	8	11.2	8	2.8	80	1.0
9	21.1	9	11.0	9	2.7	≥ 90	1.0

(*) – interpolare liniară între valori.

2. Transportul radionuclizilor în canale de deversare

- Există două tipuri de bazine de deversare, în care are loc evacuarea efluenților lichizi de la instalația nucleară:
 - bazine cu circuit aproape închis pentru efluenții deversați, în care efluenții sunt răciți și recirculați în instalația nucleară; o cantitate din apa bazinului trebuie evacuată din sistem, ca apă de purjare, pentru a menține concentrația solidelor dizolvate sub un anumit nivel limită; apă proaspătă este adăugată în sistem pentru a compensa efectul proceselor de evaporare și evacuare ca apă de purjare;
 - canale de deversare, cu circulație deschisă, în care efluenții nu sunt recirculați sau sunt parțial recirculați în instalația nucleară; efluentul este evacuat în canalul de deversare, de unde, mai departe, efluentul este evacuat într-un mediu receptor (fluviu/râu) de dimensiuni mai mari.

- Modele simple de calcul se pot utiliza pentru determinarea concentrației radionuclizilor în bazinele de deversare.

- În cuprinsul prezentei anexe se va descrie situația canalelor de deversare, cu circulație deschisă.

- Concentrația radionuclizilor în canalul de deversare, presupunând că nu există recirculare a efluentului, se calculează cu ecuația:

$$C = C_0 \exp(-\lambda V_T / q_b), \quad (1)$$

unde

C_0 = concentrația radionuclidului în efluentul lichid, Bq/m³

V_T = volumul canalului de deversare,

q_b = debitul efluentului prin canalul de deversare.

- Atunci când are loc o recirculare parțială a efluentului lichid și influențele apei de purjare și a pompelor instalației nucleare influențează semnificativ debitul, modelul matematic de calcul trebuie modificat, astfel încât să considere atât rata de pompare a instalației, q_p , cât și rata de pierdere din sistem prin ape de purjare, q_b .
- Se definește factorul de recirculare, R , ca fiind:

$$R = \frac{q_b}{q_p}.$$

- Concentrația radionuclizilor în canalul de deversare, în regim staționar, se calculează cu ecuația:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{R}{(R+1) \exp\left[\frac{R}{\tau(R+1)} \ln 2\right] - 1}, \quad (2)$$

unde

$$\tau = \frac{T_{1/2} q_b}{V_T} = \frac{\ln 2 \cdot q_b}{\lambda \cdot V_T}$$

- Presupunând că efluentul nu este recirculat, $R \rightarrow \infty$ și ecuația (2) se reduce la forma prezentată în ecuația (1).

3. Interacția efluentului radioactiv cu sedimentele acvatice

3.1. Coeficientul de distribuție, K_d

- Atunci când sedimentele interacționează cu radionuclizii prezenți în apă, concentrația radionuclizilor în faza dizolvată poate scădea, ca urmare a proceselor de sorbție pe particulele de sediment.
- Un radionuclid aflat în stare dizolvată în apă poate fi adsorbit/absorbit de către particulele în suspensie și invers, radionuclizii adsorbiți/absorbiți de către suspensii pot trece în stare dizolvată în apă. Neglijând termenii care descriu dezintegrarea radioactivă, ecuațiile care descriu procesele de interacție sunt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial t} &= -K_1 \chi + K_2 \chi_s, \\ \frac{\partial \chi_s}{\partial t} &= K_1 \chi - K_2 \chi_s \end{aligned} \quad (1)$$

unde

- χ = concentrația de radionuclizi în stare dizolvată în volumul de apă considerat, V
- χ_s = concentrația de radionuclizi adsorbiți/absorbiți de particulele în suspensie,
- K_1 = rata de adsorbție/absorbție a radionuclizilor din starea dizolvată,
- K_2 = rata de transfer din starea adsorbită/absorbită în stare dizolvată.

- În condiții de echilibru,

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} = \frac{\partial \chi_s}{\partial t}, \quad (2)$$

de unde rezultă

$$\frac{\chi_s}{\chi} = \frac{K_1}{K_2} \equiv K_d \quad (3)$$

unde K_d este coeficientul de distribuție sau repartiție.

- Coeficientul de distribuție K_d (L/kg) se definește ca fiind raportul concentrațiilor unui radionuclid în două faze aflate în contact, care se găsesc la echilibru. Pentru un radionuclid se pot defini mai mulți coeficienți de distribuție în funcție de fazele între

care este distribuit. Coeficientul de distribuție al unui radionuclid pentru sediment în suspensie și apă se obține cu relația:

$$K_d = \frac{\text{concentratia de radionuclid / kg sediment aflat in suspensie}}{\text{concentratia de radionuclid / litru apa}} \quad (4)$$

- K_d depinde de tipul de sediment, calitatea apei și alți factori, și poate varia cu ordine de mărime pentru fiecare radionuclid în parte. De aceea este foarte importantă alegerea lui K_d în funcție de specificul situației evaluate.
- În absența unor date determinate experimental, la nivel local, se pot utiliza valori obișnuite ale K_d , cum sunt cele prezentate în tabelul 3.
- De regulă, cu cât sedimentul este mai fin, cu atât K_d are valoare mai mare, pentru aceeași calitate a apei.

Tabelul 3. Valori uzuale ale coeficientului de distribuție, pentru ape dulci. [2]

Radionuclidul	K_d (L/kg)
Am	5×10^3
C	5
Ce	1×10^4
Cm	5×10^3
Co	5×10^3
Cr	1×10^4
Cs	1×10^3
Eu	5×10^2
Fe	5×10^3
H	0
I	10
Mn	1×10^3
Np	10
P	50
Pm	5×10^3
Pu	1×10^5
Ra	500
Ru	500
Sb	50
Sr	1×10^3
Tc	5
Th	1×10^4
U	50
Zn	500
Zr	1×10^3

3.2. Concentrația radionuclizilor în apa filtrată

Concentrația radionuclidului în faza dizolvată (apa filtrată) se calculează cu ecuația:

$$C_{w,s} = \frac{C_{w,tot}}{1 + 0.001K_d S_s}, \quad (5)$$

unde

S_s = concentrația sedimentului suspendat în apă, kg/m³ sau g/L;

0.001 = coeficient de conversie a K_d din L/kg în m³/kg.

- În calculele de doze suplimentare la populație, ca urmare a ingerării de apă și pește, se recomandă utilizarea concentrației radionuclidului în apa nefiltrată, fără considerarea proceselor de interacție cu sedimentul.
- Interacția cu sedimentul se va considera doar în evaluarea dozeșor primite ca urmare a expunerii la sediment.
- Concentrația în apa nefiltrată se calculează cu ecuațiile prezentate în paragrafele anterioare.
- Concentrația sedimentului suspendat variază semnificativ cu caracteristicile mediului acvatic.
- De aceea, se recomandă utilizarea unor valori determinate experimental, pentru situația evaluată. În absența unor date experimentale, pentru apele dulci ale unui fluviu/râu se poate utiliza valoarea $S_s = 5 \times 10^{-2}$ kg/m³.

3.3. Concentrația radionuclizilor în sedimentele suspendate

Concentrația radionuclizilor adsorbiți/absorbiți pe sedimentul suspendat, $C_{s,w}$ (Bq/kg) se calculează cu ecuația:

$$C_{s,w} = \frac{0.001K_d C_{w,tot}}{1 + 0.001S_s K_d} = 0.001K_d C_{w,s}. \quad (6)$$

- Concentrația radionuclizilor în sedimentele suspendate în apă poate fi importantă în situațiile în care sedimentul este utilizat ca sursă de sol superficial (de suprafață).

3.4. Concentrația radionuclizilor în sedimentele de fund

- Sedimentele de fund vor conține radionuclizi ca urmare a proceselor directe de sorbție cu radionuclizii prezenți în apă și prin procese de depunere a sedimentelor suspendate (radioactive) pe fundul apei.
- Datele experimentale obținute arată că valorile coeficientului de distribuție sunt mult mai scăzute pentru sedimentele de fund decât pentru sedimentele suspendate. Se poate aprecia că pentru sedimentele de fund, K_d reprezintă o zecime din valoarea lui K_d pentru sedimentul suspendat, în același mediu acvatic. Presupunerea

reprezintă o supraevaluare a lui K_d pentru sedimentul de fund, care conduce la evaluarea conservativă a dozei de expunere la sedimentul de fund contaminat, pentru situații deosebite în care acest sediment este dragat și adus la suprafață în lucrări speciale de amenajare a unor soluri.

- Concentrația radionuclizilor în sedimentul de fund în sedimente de fund, $C_{s,b}$ (Bq/kg) se calculează cu ecuația:

$$C_{s,w} = \frac{(0.1)(0.001)K_d C_{w,tot}}{1 + 0.001S_s K_d} \times \frac{1 - \exp(-\lambda_i T_e)}{\lambda_i T_e} = 0.1C_{s,w} \times \frac{1 - \exp(-\lambda_i T_e)}{\lambda_i T_e}, \quad (7)$$

unde

T_e = timpul efectiv de acumulare a radionuclidului în sedimentul de fund, (s); o valoare tipică recomandată pentru timpul efectiv de acumulare este $T_e = 3.15 \times 10^7$ s.

4. Incertitudini asociate

- Incertitudinile asociate predicțiilor ecuațiilor prezentate în această anexă provin din nerespectarea presupunerilor făcute și din cât de mult situația reală evaluată se depărtează de presupunerile modelului.
- Pentru a nu introduce incertitudini mari, în zona de amestec parțial geometria fluviului/râului și caracteristicile curgerii trebuie să fie relativ constante. După ce se realizează amestecul complet, aceste cerințe nu mai sunt la fel de critice.
- Interacția cu sedimentele și utilizarea unor coeficienți de distribuție preluați din literatura de specialitate, în locul unor valori determinate local, pot introduce de asemenea erori semnificative în rezultatul final al evaluării.

Referințe bibliografice pentru Anexele 2 și 3:

- [1] LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY, HOTSPOT Health Physics Codes and Documentation, Livermore, California, 1996
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No. 19, Vienna, 2001
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Safety Series No. 57, Vienna, 1982
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Dispersion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in the Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-3.1
- [5] Murphy, C.E. Jr, Tritium transport and cycling in the environment, Health Physics, vol. 65(6), 1993
- [6] NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD, NRPB Emergency Data Handbook, 1986
- [7] NATIONAL STANDARD OF CANADA, CAN/CSA-N288.2-M91, Guidelines for Calculating Radiation Doses to the Public from a Release of Airborne Radioactive Material under Hypothetical Accident Conditions in Nuclear Reactors, 1991
- [8] NATIONAL STANDARD OF CANADA, CAN/CSA-N288.1-M87, Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities, 1987
- [9] RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AUTHORITY STUK – FINLAND, Calculation of the dispersion of radioactive releases from a nuclear power plant, Guide YVL 7.3, 1997
- [10] SLADE, D.H., Meteorology and Atomic Energy, US Atomic Energy Commission, 1968
- [11] UNITED NATIONS, Sources and effects of ionizing radiation, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000, vol. I, New York 2000
- [12] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, REGULATORY GUIDE 1.113, Estimating aquatic dispersion of effluents from accidental and routine reactor releases for the purpose of implementing Appendix I, Rev. 1, 1977