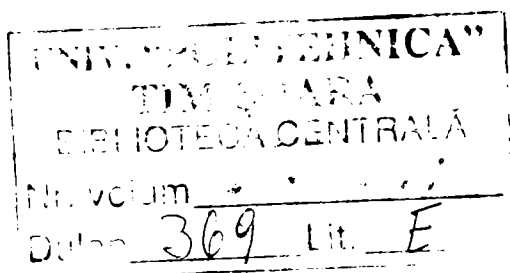


**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE HIDROTEHNICĂ**

**METODE MATEMATICE DE SIMULARE A IMPACTULUI
AMENAJĂRILOR ȘI SURSELOR DE POLUARE ASUPRA
REGIMULUI APELOR SUBTERANE
STUDII DE CAZ PENTRU SPAȚIUL DIN JUDEȚUL BIHOR**

TEZĂ DE DOCTORAT



**Conducător științific:
Prof. dr. ing. DAVID IOAN**

**Doctorand:
Turcan Radu Olimpiu Calin**

2005

CUPRINS

	Pag.	
1	Introducere	2
1.1	Importanța apelor subterane	2
1.2	Interdisciplinaritate	3
1.3	Structura lucrării	5
2	Prezentarea generală a sistemului acvifer	7
3	Bazele modelării mișcării fluidelor în medii poroase	12
3.1	Descrierea fenomenologică a mișcării fluidelor în medii poroase	12
3.2	Descrierea matematică a curgerii fluidelor în mediul poros	16
3.2.1	Mărimi fizice caracteristice mediului poros	17
3.2.2	Principiile mecanicii mediilor continue aplicabile mediilor continue poroase	19
3.2.3	Ecuatii constitutive	21
3.2.4	Considerente matematice	22
3.2.5	Ecuatii fundamentale	24
3.2.5.1	Ecuatia de continuitate	25
3.2.5.2	Ecuatia conservării impulsului	28
3.2.5.3	Ecuatia conservării energiei. Legea lui Darcy	30
3.2.5.3.1	Generalizări ale legii lui Darcy	33
4	Bazele modelării transportului poluanților în apele subterane	35
4.1	Procese fizico- chimice de transport	36
4.2	Ecuatii caracteristice. Metode de obtinere	50
4.3	Metode de rezolvare a ecuațiilor de transport	56
4.3.1	Metode analitice de rezolvare a ecuațiilor de transport	57
4.3.2	Metode numerice de rezolvare a ecuației de transport	64
4.4	Softuri specializate în simularea curgerii și transportului poluanților în acvifere	69
4.4.1	Prezentarea programului ASMWIN	70
4.4.1.1	Generalitati, module componente	70
4.4.1.2	Realizarea modelelor, date de intrare, rezultate	71
5	Identificarea unor posibile surse de poluare din spațiul județului Bihor cu impact semnificativ asupra apelor subterane	76
5.1	Prezentarea hidrogeologica a zonei de interes (Conul aluvionar Crișul Repede)	76
5.2	Identificarea surselor de poluare din zona de interes	80
6	Construirea modelului numeric al zonei de interes	92
6.1	Schematizarea și stabilirea parametrilor de modelare a zonei de interes	92
6.2	Simularea și evaluarea impactului surselor posibile de poluare reprezentative în zona de interes. Variante, scenarii	96
6.3	Interpretarea rezultatelor simulărilor	98
7	Concluzii	101
*	Bibliografie	104
*	Anexe	108

1. Introducere

1.1 Importanța apelor subterane

Importanța apelor pentru omenire, derivă din indispensabilitatea acesteia pentru viață în general, din componența ei în ceea ce numim mediul ambiant și nu în ultimul rând ca și resursă în cadrul componentei sociale și geopolitice.

Dintre **multiplele folosințe ale apelor**, deloc de neglijat, **este cea privind alimentarea cu apă a centrelor populate**. Aceasta se poate face din surse de suprafață respectiv din surse subterane. Avantajul surselor de apă subterane, acolo unde acestea sunt disponibile derivă din calitatea net superioară a acestora, reducând pe această cale costurile.

Dezvoltarea durabilă a societății nu poate fi făcută, fără ceea ce numim, protecția și conservarea mediului, iar în cadrul acestei noțiuni generale, prin protecția apelor, respectiv a apelor subterane.

Această din urmă activitate, trebuie făcută în primul rând la nivelul individului, printr-o educație și conștientizare pînă la un anumit nivel, iar ulterior prin politici și acțiuni locale, regionale-naționale și mai nou la o scară mai mare, chiar europeană, ca urmare a proceselor politice actuale și a tendinței generale de globalizare.

La rândul lor, **politicile de protecție a apelor** trebuie duse la îndeplinire prin **organisme competente și abilitate**, a căror competență este asigurată de activitatea și experiența profesional-științifică a membrilor ei chemați să o pună în aplicare.

Necesitatea cunoașterii, înțelegerii, stăpînirii și aplicării politicilor și tehnicilor de protecție a apelor, derivă dintr-un fenomen cvasicunoscut și acut în zilele noastre și anume **poluarea**.

Se numește *poluarea apelor*, în baza multiplelor definiții uzitate în literatură ficute de diverși autori, *modificarea proprietăților fizice, chimice și biologice ale acestora, care o fac improprie unei anumite folosințe, ori din punct de vedere ecologic*.

Dacă în diverse etape istorice, anterioare, ale gospodăririi apelor accentul se punea pe asigurarea cantităților necesare de apă, **în zilele noastre problema acută în gospodărirea apelor** este cea *calitativă*, alături de *prevenirea și atenuarea dezastrelor hidrologice*, ca urmare a schimbărilor climatice. Din acest punct de

vedere, **principala problemă a apei este calitatea ei** și aceasta totuși fără a neglija aspectul că, *apa nu este o resursă inepuizabilă*.

Față de poluarea altor factori de mediu cum ar fi aerul și solul, necesitatea tratării cu importanța cuvenită a poluării apelor rezidă din *caracteristicile apei* și anume :

- posibilitatea dizolvării de către aceasta a substanțelor chimice :
- posibilitatea transportului poluanților chimici sau sedimente în curenți de suprafață ori subterani constituind pe această cale un vector de transport și difuzare prin procese fizico-chimice specifice :
- existență în ape a condițiilor favorabile pentru procese fizice, chimice și biologice, specifice diverselor tipuri de poluanți și, nu în ultimul rând,
- apa constituie cea mai importantă substanță pentru procese biologice în cadrul lanțurilor alimentare.

1.2 Interdisciplinaritate

Poluarea apelor și în special a celor subterane, este un proces complex, interdisciplinar, la care sunt chemate să-și aducă contribuția o largă gamă de științe/discipline, reunite sub paleta terminologică atât de uzitată azi și anume **ingineria mediului**.

A considera că fenomenul de poluare a apelor, respectiv a apelor subterane, reprezintă apanajul sau chemarea unor anumiți specialiști sau a altora, capabili să adâncească cunoașterea în domeniul propriu până la nivelul superspecializat vehiculat azi sub termenul de nanotehnologii este o greșeală.

O primă categorie de discipline implicate în studiul poluării apelor subterane sunt cele ce studiază tehnica pământurilor ca și componentă a mediilor poroase, a acviferelor conținând ape subterane, cum ar fi: geologia, geotehnica, mecanica rocilor. Cu ajutorul acestora se stabilesc elemente fizice/proprietăți necesare studiului și definirii scheletului solid : textura, structura, permeabilitate, porozități, tortuozități.

O altă categorie de științe, sunt cele au ca obiect de studiu circuitului apei în natură, scurgerea, infiltrarea, migrarea apelor subterane, curgeri cu nivel liber, stabilind pe această cale legi, formule de calcul în studiul mișcării. Din această categorie, fac parte, științe reunite sub domeniul hidrotehnicii : meteorologie,

mecanica fluidelor, hidrologie, hidrogeologie, hidraulica aplicată, hidraulică subterană.

În categoria mare a științei chimie, intră subdiscipline care au ca sarcină studiul compoziției substanțelor chimice, a poluanților și comportamentul acestora în mediul hidric : chimie fizică, organică, anorganică, hidrochimie, chimie analitică și instrumentală, etc.

Tot aici, s-ar putea include și biochimia, studiind procese/comportamente chimice în prezența apei și în legătură cu diverse biotopuri desiguri pe baza conceptelor oferite de biologie și ecologie.

În baza celor arătate mai sus, curgerea apelor subterane și transportul poluanților în acestea, pot fi modelate din punct de vedere matematic, cu ajutorul unor ecuații specifice, de obicei ecuații cu derivate parțiale.

În aceste ecuații, *funcția necunoscută*, definită pe un domeniu de definiție spațio-temporal, având condiții la limită și inițiale (o problemă la limită), *urmează a fi determinată*, folosind *diverse metode de rezolvare*. Este aici, locul științelor matematice cum ar fi analiza matematică, matematici speciale, algebră liniară, analiză numerică, metode numerice să ofere soluții spațiale și temporale pentru problema la limită specifică acestui fenomen.

Mijloacele moderne de calcul electronic au făcut absolut necesară și oportună contribuția științelor informatice și de tehnică de calcul (software și hardware), alături de tehnici moderne de teledetecție, topografie, sisteme geografice informaționale (GIS), la obținerea de soluții rapide și precise pentru aceeași problemă la limită.

Studiul transportului poluanților în apele subterane, a cunoscut în ultimii ani, un ritm alert de dezvoltare, demonstrat de : lucrări științifice publicate, conferințe, simpozioane, fapt care explică și obligă interdisciplinaritatea arătată mai sus. Alături de științele/disciplinele menționate mai sus apar altele noi, de graniță care combină și adâncesc cunoștințele existente într-un tot unitar (transportul poluanților, protecția resurselor de apă, ingineria mediului etc., a se vede bibliografia), creând pe această bază, instrumente de studiu specializate.

Necesitatea acestor discipline noi/ instrumente specializate de studiu, prognoză și evaluare se impune din următoarele considerente:

- *monitorizarea integrată a factorilor de mediu și pe această cale a apei ca și garanție a unei dezvoltări durabile a societății cunoscând importanța acestei resurse;*

- *proiectarea și execuția amenajărilor noi de gospodărire a apelor în deplină cunoștință de cauză a efectelor posibile a poluării pe baza unor scenarii profesionale;*
- *estimarea evoluției și efectelor poluărilor în caz de accidente și luarea operativă a măsurilor de informare și remediere ce se impun pentru fiecare caz în parte;*
- *politici industriale, guvernamentale și legislative, în spiritul uzanțelor internaționale moderne, specializate în prevenire, instruire și conformare, având drept scop protecția mediului respectiv protecția apelor subterane.*

1.3 Structurarea lucrării

Prezenta lucrare este structurată în 7 capitole și anume:

- **Capitolul 1**, prezintă o parte introductivă, care evidențiază importanța apelor subterane, interdisciplinaritatea întâlnită în procesul complex de modelare a mișcării apelor subterane și a transportului poluanților în acestea;
- **Capitolul 2**, prezintă sistemul acvifer, într-o formă succintă, pe baza proprietăților fizice specifice ale acestuia;
- **Capitolul 3**, tratează bazele modelării mișcării fluidelor (în speța apei) în medii poroase, descriind metodologic și matematic acest aspect, cu scopul de a prezenta calea prin care se obțin ecuațiile fundamentale ale mișcării fluidelor, în medii poroase. Tot în acest capitol sunt prezentate și metode de rezolvare a ecuațiilor fundamentale caracteristice;
- **Capitolul 4**, prezintă bazele modelării transportului poluanților în apele subterane, cunoscând procesele fizico-chimice specifice de transport și ecuațiile fundamentale. Sunt prezentate metode de rezolvare a ecuațiilor, precum și cele mai simple softuri specializate, care permit rezolvarea numerică a ecuațiilor mișcării fluidelor în medii poroase și transportul poluanților în acestea.
- **Capitolul 5**, prezintă un studiu de caz, cuprinzând potențialele surse de poluare, într-un spațiu reprezentativ din județul Bihor, luând în considerare scenarii posibile, care ar putea polua apele subterane.

- **Capitolul 6**, tratează modelarea numerică a curgerii apelor subterane și a transportului poluanților în zona aleasă pentru studiu, precum și simulări, respective evaluări a posibilului impact al surselor de poluare, pentru scenarii reprezentative, prezentate în capitolul V, asupra acviferelor din acest spațiu hidrografic.

Variantele de simulare iau în considerare poluarea apelor subterane, din posibilele surse de poluare : Palota, Alor, Sinteza și halda CET I.

- În **capitolul 7**, sunt prezentate concluziile modelării numerice a regimului de curgere și transport a poluanților, în conul aluvionar al Crișului Repede.

2. Prezentarea generală a sistemului acvifer

Se numesc **acvifere**, stratele subterane de o anumită stratificație, delimitate în plan, purtătoare de apă subterană.

Există multiple clasificări ale acviferelor, cea mai elocventă fiind cea care are ca și criteriu de clasificare : presiunea apei subterane la nivelul superior.

În acest sens, există acvifere freatice sau cu nivel liber, care sunt primele strate întâlnite de la suprafața pământului. Zonarea lor și reprezentarea grafică într-un plan orizontal, în funcție de adâncime se face cu ajutorul izofreatelor.

Acviferele în care presiunea apei este superioară presiunii atmosferice se numesc acvifere sub presiune sau captive. În funcție de adâncimea la care se întâlnesc acviferele sub presiune pot fi de medie adâncime (15-120 m) sau de mare adâncime (> 120 m). Reprezentarea grafică, în plan, pentru aceste acvifere se face cu ajutorul hidroizohipselor. Reprezentarea schematică a celor două tipuri de acvifere este arătată în figurile nr.1 și nr.2.

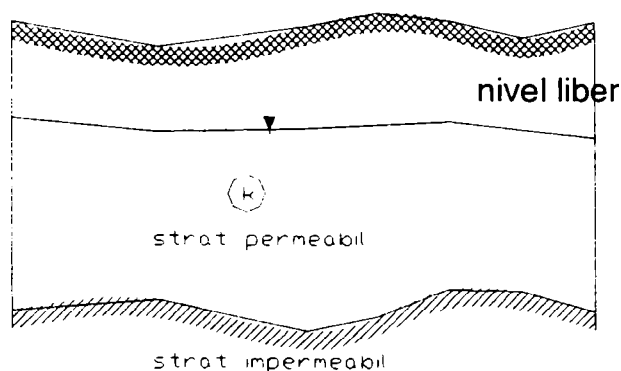


Figura 1. Acvifer cu nivel liber

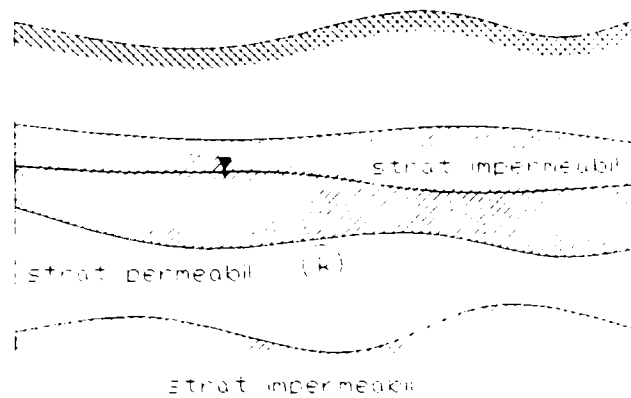


Figura 2 Acvifer sub presiune

În general, prin **mediu poros** se înțelege un mediu fizic (material) constituit din mai multe faze: o *fază solidă*, care prezintă goluri numite pori, care alcătuiesc o rețea complexă de tuburi de diverse forme geometrice, dimensiuni, lungimi, trasee. rețea ce poate fi ocupată de o fază gazoasă (aer), respectiv de o fază lichidă (în principal apa).

În cazul acviferelor, definite mai sus, considerate ca medii poroase, faza solidă este reprezentată de particule solide ce au o anumită textură (compoziție granulometrică) dispuse aleator: argilă, prafuri, marnă, nisipuri, pietrișuri, bolovănișuri. Clasificarea acestora poate fi făcută în mod diferit din punctul de vedere al diferitelor discipline tehnice: mecanica rocilor, hidrologia și hidrogeologia, geotehnica respectiv pedologia.

Mișcarea fazei lichide (a apei), în rețeaua de goluri, are loc sub acțiunea unor cauze de natură mecanică.

Caracteristicile mediului poros, din punctul de vedere al hidraulicii subterane sunt : *porozitatea, porozitatea efectivă, permeabilitatea, respectiv tortuozitatea*, care au fost introduse pe bază experimentală.

Porozitatea mediului poros, este conferită acestuia de existența porilor. Totalității golurilor existente în mediul poros îi corespunde porozitatea medie absolută, iar a golurilor interconectate le corespunde porozitatea efectivă.

Adoptând spațiul euclidian tridimensional \mathbb{R}^3 ca model de reprezentare spațială pentru mediul poros, într-un volum spațial arbitrar V , porozitățile medii mai sus amintite se pot defini matematic astfel:

$$m = \frac{V_g}{V} \quad (1)$$

$$m_e = \frac{V_e}{V} \quad (2)$$

unde: - m , porozitatea medie absolută, adimensională
 - m_e , porozitatea medie efectivă, adimensională
 - V_g , volumul golurilor, $[L^3]$
 - V_e , volumul golurilor interconectate, $[L^3]$
 - V , volumul total ocupat de mediul poros, $[L^3]$

Alte științe, de exemplu geotehnica, folosesc pentru definirea porozității alte mărimi fizice cum ar fi indicele porilor, definit prin:

$$e = \frac{V_g}{V_s} \quad (3)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (4)$$

unde: e – indicele porilor, adimensional;

V_s -volumul de schelet solid $[L^3]$.

Pentru un anumit tip de mediu poros, porozitatea este dependentă de o mulțime de factori, dintre care cel mai important este textura (compoziția granulometrică) și modul de așezare a elementelor ce alcătuiesc scheletul solid, ceea ce definește structura.

Valorile porozităților absolute și efective pentru diverse compoziții granulometrice se determină în laborator și sunt prezentate în tabelul nr. 1.

Permeabilitatea este *proprietatea mediului poros de a permite mișcarea fluidelor (gaze și lichide) prin rețeaua de goluri interconectate, sub acțiunea unor cauze de natură mecanică*. Ea se evaluează prin coeficientul de permeabilitate. Permeabilitatea este totuși este o noțiune generală și sintetică. Alte științe o particularizează după specificul acestora și scopul urmărit folosind noțiuni specifice ca: conductivitate, coeficient de infiltrație, coeficient de filtrație.

Tabelul nr.1. Valorile porozităților absolute și efective

Nr.crt	Denumire	Porozitate absolută (%)	Porozitate efectivă
1	Nisip grosier	0.25	0.2-0.22
2	Nisip mare	0.31	0.25-0.28
3	Nisip mediu	0.32	0.25-0.28
4	Nisip fin	0.34	0.24-0.30
5	Nisip foarte fin	0.36	0.28-0.32
6	Argilă	0.38	0.36-0.40

Pentru descrierea permeabilității se folosește parametrul denumit coeficient de filtrație “k”, care s-a introdus pe bază experimentală și se poate defini, pentru o coloană filtrantă, prin relația :

$$k = \frac{v}{I} \quad (5)$$

unde:

k - coeficientul de filtrație [LT⁻¹]

v - viteza de filtrație, definită la rândul ei prin relația : $v = \frac{Q}{A}$, unde Q-

debitul ce curge prin coloană, A – aria totală ; [LT⁻¹]

I - gradientul hidraulic, adimensional.

Cercetări de laborator au ajuns la concluzia că, **coeficientul de filtrație, depinde nu numai de structura porilor, ci și de temperatură**, de proprietățile fluidului în mișcare prin mediul poros, respectiv vâscozitate și greutate specifică. Eliminând dependența coeficientului de proporționalitate a fluidului se poate introduce un nou coeficient numit coeficient de permeabilitate intrinsec definit prin:

$$K = \frac{\eta}{\rho \cdot g} \cdot k \quad (6)$$

sau exprimând invers :

$$k = \frac{\rho \cdot g}{\eta} k_i \quad (7)$$

unde:

-K coeficient de permeabilitate intrinsec, [m²]

-k_i coeficient de filtrație intrinsec, [L T⁻¹]

- η coeficient de vâscozitate dinamică a fluidului, [M L⁻¹T⁻¹]

- ρ - densitatea fluidului

Coeficientul de filtrație se determină în laborator pentru medii poroase de textură specifică sau în câmp, pentru cazul studiilor de teren ce implică areale largi.

Valorile curente ale coeficientului de permeabilitate sunt prezentate în tabelul nr.2

Tabelul nr.2. Valorile coeficientului de permeabilitate

Nr.crt	Specificare	Coeficient de filtrație < cm/s . 10 ⁻⁶ >
1	Nisip grosier	110.0
2	Nisip mare	31.0
3	Nisip mediu	21.0
4	Nisip fin	7.1
5	Nisip foarte fin	4.1
6	Argilă	0.1

Aceste mărimi fizice caracteristice introduse inițial, pe bază experimentală, vor fi în continuare, în paragraful următor redefinite pentru un **model de mediu continuu**, al mediului poros.

3. Bazele matematice ale modelării mișcării fluidelor în medii poroase

3.1. Descrierea mișcării fluidelor în medii poroase

În mecanica fluidelor, metodologia de studiu în hidrodinamică este fundamentată teoretic și deja cunoscută, având în vedere că fluidele sunt corpuri, **medii continue**. Fundamentarea teoretică, folosește noțiuni ca *modele de fluid*, *corpul material continuu*, proprietăți fizice, interacțiuni, principiile mecanicii mediilor continue, derivata materială, într-o schemă de lucru, ce are drept scop obținerea **ecuațiilor fundamentale**. Aceste ecuații fundamentale împreună cu tehnici specifice de mediere și simplificare, alături de experimente conduc la rezolvarea unor probleme ingineresti. Schema generală posibilă de obținere a ecuațiilor fundamentale ale hidraulicii este prezentată în figura nr.3 [9].

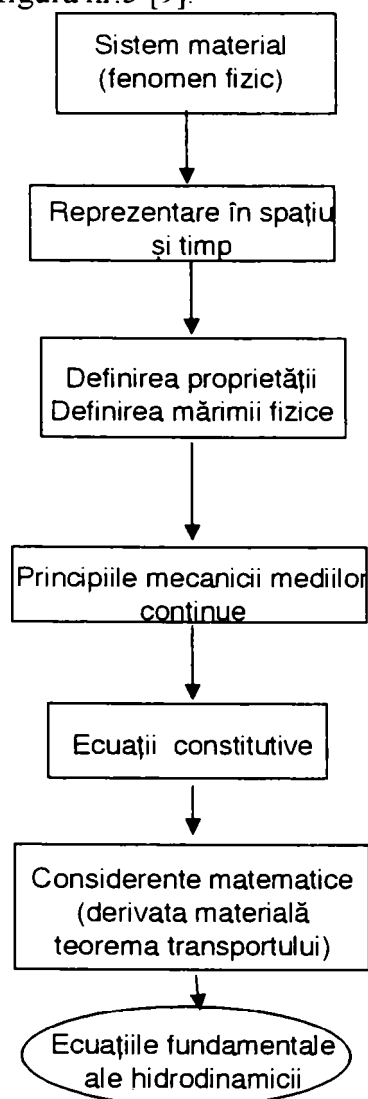


Figura 3. Schema generală pentru obținerea ecuațiilor fundamentale ale hidrodinamicii

Față de mecanica fluidelor, unde se lucrează cu fluide (lichide și gaze), reprezentate prin diferite modele de fluid, ce țin cont de vâscozitate, compresibilitate, regimuri de mișcare, în hidraulica subterană se fac următoarele ipoteze simplificatoare :

- fluidul de mișcare, numit fluid liber (faza lichidă), se consideră incompresibil;
- faza solidă este considerată nedeformabilă și structurată, pentru un regim de curgere;
- regimul de mișcare în pori este laminar, caracterizat prin numere Reynolds mici ($Re=3-6$).

Curgerea apei are loc după legile generale ale hidrodinamicii, care se simplifică prin ipotezele descrise mai sus, într-un sistem complex de tuburi de curent cu frontieră rigidă (pori). Studiul mișcării însă, pe această cale, oferită de legile hidrodinamice și obținerea unor relații de calcul utile pentru aplicații ingineresti în probleme de medii poroase este practic imposibilă datorită variației de-a dreptul haotice a geometriei golurilor considerate tuburi de curent. În plus, dacă se ia în considerare și deformabilitatea mediului poros (posibilă și reală), respectiv compresibilitatea apei (deși mică) studiul este de-a dreptul imposibil.

Pentru definirea dificultăților semnalate, se renunță la studiul mișcării fluidelor prin mediul poros pe bazele prezentate mai sus, se introduce modelul de mediu continuu.

Pentru definirea modelului mediu continuu, trebuie să se țină seama, pe de o parte de structura reală a porilor, iar pe de altă parte această structură dispăre, atunci când se operează cu modelul de mediu continuu.

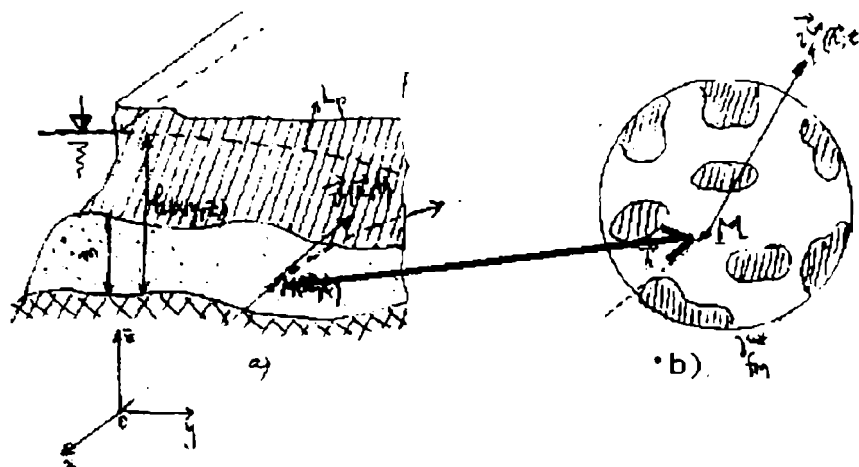
Acest paradox, se depășește, prin introducerea așa-zisului Volum-Elementar-Reprezentativ (VER), [1], [9].

Observații :

1. Volumul VER trebuie să fie suficient de mic, astfel încât raportat la scară macroscopică, pentru ca modelul de mediu continuu să poată fi asimilat cu un punct M.

2. Volumul VER trebuie să fie suficient de mare, astfel încât, mărimile aferente lui VER să rămână constante.

Modelul de mediu continuu



**Fig 3. Schema modelului de mediu continuu (după David I, 1998),
Tehnica de transbordare**

Noutăți : macrostructura (conductor subteran / acvifer), secțiune transversală.

Legendă :

Fig. 3a – Macrostructura (conductor subteran/acvifer) → secțiune transversală



– strat de pământ (rocă) impermeabil;



– strat de pământ permeabil (conductorul subteran);

L_p – linie de presiune a apei freatice;

$h = h(x, y, z)$ – înălțimea piezometrică;

m – grosimea inductorului de apă freatică;

\vec{r} – vectorul de poziție al punctului $M(\vec{r}; t)$ situat în conductorul subteran;

Fig. 3b – Microstructura – VER

(VER = volum elementar reprezentativ)

V_{fM}^* – volum de fluid mărit;

sau VER – volum reprezentativ mărit;

$\vec{v}_r^*(\vec{r}; t)$ – vectorul viteză din VER;

\vec{u}_i – distribuția reală a vitezei în pori

Distribuția reală a vitezei fluidului în pori \vec{u}_i , va fi înlocuită prin **mediere** cu o **viteză mediată**, $\vec{v}(M; t)$, asociată modelului de mediu continuu, în punctul M și la momentul t (din macrostructură).

În mod similar se va proceda și cu celelalte mărimi, care descriu mediul poros, adică : vor fi considerate ca mărimi de câmp (funcții de punct M și respectiv timp t).

Concret :

- 1) Porozitatea efectivă : $m_e = m_e \cdot (M)$ sau $m_e = m_e \cdot (x, y, z)$
- 2) Coeficientul de filtrație : $k = k(M)$
- 3) Presiunea : $p = p(M, t)$ sau $p = p(x, y, z)$
- 4) Înălțimea piezometrică $h = h(M, t)$ sau $h = h(x, y, z)$
- 5) Starea de tensiune descrisă prin vectorul de tensiune : $\vec{t} = \vec{t}(M, t)$
- 6) Forțele de frecare (frânare) a mișcării $\vec{f}_r = \vec{f}_r(M, t)$

Fluidului de filtrație (considerat ca mediu continuu), îi putem asocia următoarele mărimi caracteristice :

- a) masa fluidului (ce ocupă volumul V , la momentul t)

$$m(V) = \int_V \rho \cdot m_e \cdot dV$$

- b) viteza de filtrație : $\vec{v} = \vec{v}(P, t)$ sau $\vec{v} = m_e \cdot \vec{u}(P, t)$

- c) impulsul (fluidului de filtrație) $\vec{H}(v) = \int_V \rho \cdot m_e \cdot \vec{u} \cdot dV$

- d) energia cinetică : $E_c = \int_V \rho \cdot m_e \cdot \frac{u^2}{2} \cdot dV$

Acest mediu continuu are următoarele caracteristici (proprietăți): mișcarea globală generalizată, porozitatea efectivă medie, respectiv masa fluidului liber.

Mișcarea globală generalizată este definită în tot domeniul spațial dat de volumul V ocupat de mediul poros, inclusiv în zonele ocupate de faza solidă, rezultând astfel un câmp de viteze efective continuu, $\vec{u} = \vec{u}(M, t)$, unde M reprezintă un punct din domeniul tridimensional $M \in V$.

Porozitatea efectivă medie : m_e se presupune a fi și ea o funcție continuă $m_e = m_e(M)$, ceea ce implică ca și volumul golurilor asociat volumului total să fie tot o mărime continuă. În formă diferențială, aceasta se mai scrie:

$$m_e = \frac{dV_e}{dV} \quad (8)$$

Masa fluidului liber : $m(V)$, asociată volumului total de mediu poros V este o mărime continuă, care în relația cu densitatea fluidului $\rho = \rho(M, t)$ se poate exprima astfel:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (9)$$

$$\rho_{me} = \frac{dm}{dV_e} \quad (10)$$

unde:

- ρ -densitatea fluidului liber, [ML⁻³]
- d_{me} -elementul de masă, [M]
- dV -elementul de volum aferent golurilor interconectate, [L³]
- dV_e -elementul de volum total, [L³]

3.2 Ecuațiile fundamentale ale mișcării fluidelor prin mediul poros

Pe baza introducerii conceptului de **mediu continuu**, prezentată anterior, pentru modelarea mișcării fluidelor în mediul poros, se va urma pentru deducerea ecuațiilor fundamentale, schema principială, din figura 4.

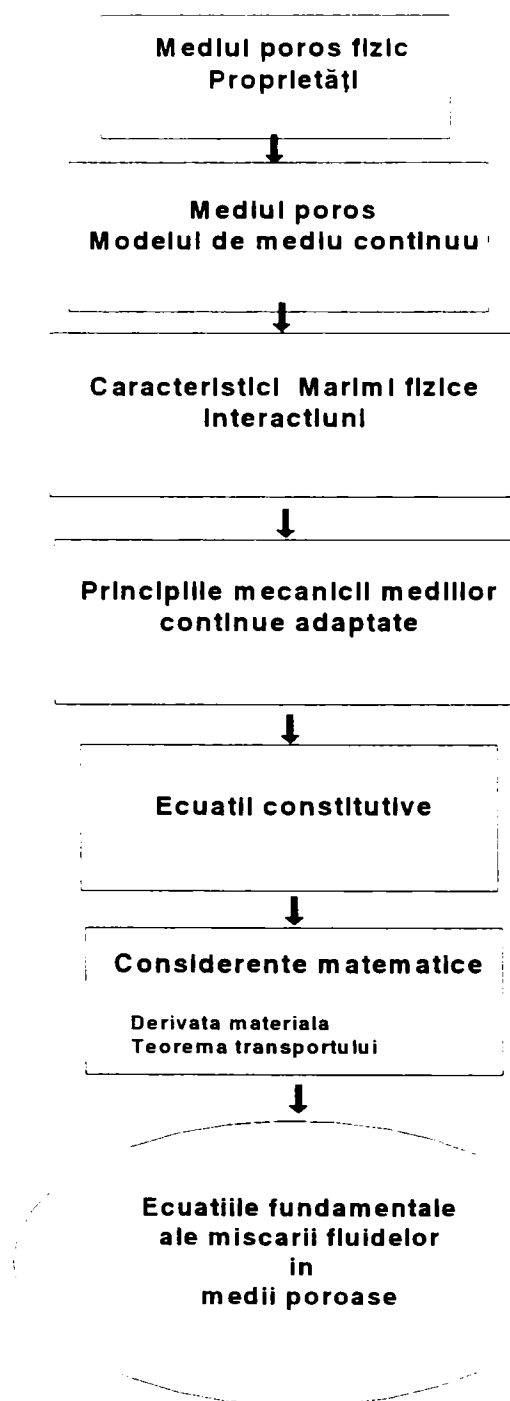
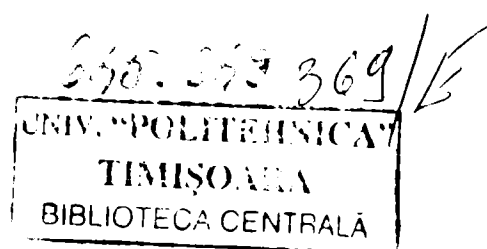


Figura 4. Obținerea ecuațiilor fundamentale

3.2.1. Mărimi fizice caracteristice mediului poros

Introducerea modelului de mediu continuu, pentru mediul poros numit în continuare fluid de filtrație și pe baza proprietăților acestuia prezentate în paragraful anterior, face posibilă introducerea în continuare a unor mărimi fizice globale. Aceste mărimi fizice vor fi exprimate sub formă integrală, pentru un volum V , care la



momentul t ocupă domeniul spațiat Vt . Utilizând mărimile fizice locale, introduse în 3.1, se reamintește faptul că modelul matematic pentru spațiul ocupat de mediul poros considerat ca mediu continuu este spațiul euclidian tridimensional IR^3 , cu toate proprietățile cunoscute, iar modelul matematic al timpului este spațiul unidimensional IR^1 . [David, curs]

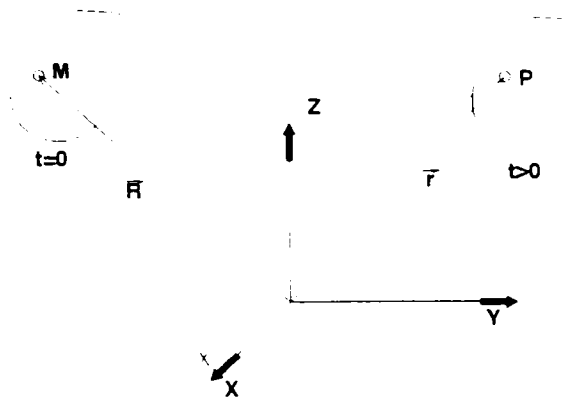


Figura 5 Identificarea volumului de fluid de filtrație în mișcare

Mărimile fizice globale, asociate volumului material Vt în cauză, vor fi

- 1) **masa mediului poros;**
- 2) **momentul impulsului sau momentul cinetic;**
- 3) **energia cinetică;**
- 4) **energia internă.**

Masa fluidului mediului poros : $m(V)$, o mărime scalară:

$$m(V) = \int_{V_t} \rho \ m_e \ dV \quad (11)$$

Viteza de filtrație $\bar{v}(M, t)$, o mărime vectorială, definită cu ajutorul porozității și a vitezelor efective \vec{u}

$$\bar{v}(M, t) = m_e \vec{u}(M, t) \quad (12)$$

unde cu $\vec{u}(M, t)$ s-a notat viteza reală a fluidului în mediul poros.

Impulsul mediului poros, aflat în mișcare, $\vec{I}(V)$ o mărime vectorială:

$$\vec{I}(V) = \int_{V_t} \vec{u} \ \rho \ m_e \ dV \quad (13)$$

Momentul impulsului sau momentul cinetic $\vec{M}(V)$, o mărime vectorială:

$$\vec{M}(V) = \int_V \vec{r} \times \vec{u} \rho \, dV \quad (14)$$

Energia cinetică $Ec(V)$, o mărime scalară:

$$Ec(V) = \int_V \rho \, m_e \frac{u^2}{2} dV \quad (15)$$

Energia internă $Ei(V)$, o mărime scalară:

$$Ei(V) = \int_V \rho \, m_e \, e_i dV \quad (16)$$

În exprimările matematice de mai sus, față de notațiile deja folosite, s-a notat:

- ρ -densitatea medie a mediului poros fizic [ML^{-3}],
- \vec{r} -vectorul de poziție al punctului M
- e_i -densitatea de energie internă [L^2T^{-2}]

3.2.2 Principiile mecanicii mediilor continue, aplicate modelului de mediu continuu a medilor poroase

Principiile mecanicii mediilor continue, aplicabile în mecanica fluidelor pot fi adaptate mediului poros, având același enunț și exprimări integrale, cu observația că termenii componenți din expresiile integrale conțin elementele fizice caracteristice mediului poros, interacțiunile specifice prezentate mai sus. (vezi David, curs vol II)

În esență, aceste principii sunt principiul conservării masei, principiul conservării impulsului, principiul conservării momentului impulsului și principiul conservării energiei. Ele sunt enunțate, prezentate sub formă integrală pentru un element de volum de mediu poros dV având frontiera elementul de suprafață dS . Se face observația că noțiunile de impuls, moment al impulsului, energia cinetică și energia internă au fost definite în paragraful 2.2.1.

- **Principiul conservării masei**

Pentru un volum elementar, de mediu poros variația în timp a masei acestuia este nulă (fără surse interne) :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_i} \rho \cdot m_e \cdot dV = 0 \quad (17)$$

- **Principiul conservării impulsului**

Pentru un volum elementar de mediu poros aflat în mișcare, variația în timp a impulsului acestuia este egală cu suma forțelor exterioare, reprezentate de forța masică, superficială și cea de frecare:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_i} \vec{u} \cdot \rho \cdot m_e \cdot dV = \int_{V_i} \rho \cdot m_e \cdot \vec{g} \cdot dV + \int_{S_i} \rho \cdot m_e \cdot \vec{t} \cdot dS + \int_{V_i} \rho \cdot m_e \cdot \vec{f}_r \cdot dV \quad (18)$$

- **Principiul conservării momentului impulsului**

Pentru un volum elementar de mediu poros în timp aflat în mișcare, variația în timp a momentului impulsului este egală cu momentul forțelor exterioare față de același punct definit printr-un vector de poziție \vec{r} :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_i} \vec{r} \times \vec{u} \cdot \rho \cdot m_e \cdot dV = \int_{V_i} \vec{r} \times \rho \cdot m_e \cdot \vec{g} \cdot dV + \int_{S_i} \vec{r} \times \rho \cdot m_e \cdot \vec{t} \cdot dS + \int_{V_i} \vec{r} \times \rho \cdot m_e \cdot \vec{f}_r \cdot dV \quad (19)$$

- **Principiul conservării energiei**

Pentru un volum elementar de mediu poros, variația în timp a energiei totale (cinetică și internă), este egală cu puterea mecanică a forțelor exterioare, neglijând transferul termic dinspre exterior spre volumul de mediu poros considerat:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_i} \rho \cdot m_e \left(\frac{u^2}{2} + e_i \right) dV = \int_{V_i} \vec{u} \cdot \rho \cdot m_e \cdot \vec{g} \cdot dV + \int_{S_i} \vec{u} \cdot \rho \cdot m_e \cdot \vec{t} \cdot dS + \int_{V_i} \vec{u} \cdot \rho \cdot m_e \cdot \vec{f}_r \cdot dV \quad (20)$$

Observații :

a) Față de forma matematică, întâlnită la principiile mecanicii mediilor continue din mecanica fluidelor, se observă în acest caz, *prezența suplimentară a porozității efective, respectiv a forței de frecare \vec{f}_r* .

b) Forța de frecare \vec{f}_r , care așa cum s-a prezentat în paragraful precedent (3.2.1), reprezintă efectul integrat al forțelor de tensiune tangențiale pe interfețele fluid-solid, în VER.

c) În această formă, expresiile matematice integrale ale principiilor mecanicii mediilor continue, scrise pentru mediul poros considerat mediu continuu, în baza unor dezvoltări matematice, vor servi la *obținerea ecuațiilor de mișcare a fluidelor prin medii poroase*.

3.2.3. Ecuații constitutive

Ecuațiile constitutive, reflectă în sens fizic, modalitățile concrete de răspuns a fluidului la condițiile specifice mișcării în medii poroase, oferind expresii explicite pentru tensiunea $\vec{\tau}$ și intensitatea forțelor de frecare \vec{f}_r . Se acceptă următoarele consecințe ale proprietăților fluidelor, respectiv, ipotezele simplificatoare:

- tensiunea de suprafață $\vec{\tau}$ este normală pe suprafața S a volumului de mediu poros V și este doar de compresiune. Aceasta înseamnă că vectorul tensiune de suprafață $\vec{\tau}$ se va exprima în funcție de presiune p (care este o mărime scalară), având orientarea normalei la suprafața S. Semnificația tehnică de compresiune are în vedere exprimarea între cele două mărimi, cu semn schimbat:

$$\vec{\tau} = -p\vec{n} \quad (21)$$

unde p reprezintă presiunea, o mărime scalară ce depinde de vectorul de poziție al unui punct oarecare M , situat pe suprafața S.

- intensitatea forțelor de frecare \vec{f}_r , se admite a fi un vector dirijat după direcția vitezei de filtrație \vec{v} , însă de sens contrar: (vezi Jukoński, David)

$$\vec{f}_r = -\lambda \vec{v} \quad (22)$$

cu λ definit ca o funcție scalară de punct, dependent de structura porilor.

- fluidul este considerat incompresibil, ceea ce se exprimă prin $\rho = \text{constant}$.
- porozitatea efectivă este constantă : $m_e = \text{constant}$

Observație:

Din punct de vedere matematic, necesitatea ecuațiilor constitutive, rezidă din neînchiderea sistemului de ecuații de curgere, ce se va obține în final, astfel încât numărul de ecuații să fie egal cu cel al necunoscutelor (mărimilor fizice).

3.2.4. Considerente matematice, privind introducerea noțiunii de derivată materială (în raport cu timpul)

Legătura între cei doi vectori de poziție: $\vec{r}(x, y, z)$ la momentul t și $\vec{R}(X, Y, Z)$, la momentul t_0 (vezi fig 5) poate fi exprimată formal, prin:

$$\vec{r} = \vec{r}(\vec{R}, t) \quad (23)$$

Pentru o anumită proprietate ϕ , asociată corpului fluid, $\phi(\vec{r}, t)$ se pot folosi explicitările:

$$\phi(\vec{r}, t) = \phi^\circ(\vec{R}, t) = \phi(\vec{r}(\vec{R}, t), t) \quad (24)$$

Derivata (materială), în raport cu timpul a funcției Φ , devine :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi(\vec{r}, t)}{dt} = \frac{d\phi(\vec{r}(\vec{R}, t), t)}{dt} \quad (25)$$

care se poate exprima și sub forma :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + v_i \frac{\partial\phi}{\partial x_i} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\phi \quad (26)$$

unde ∇ operatorul lui Hamilton :

$$\nabla \stackrel{\text{def.}}{=} \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (27)$$

Observație :

- 1) În relația (26), componenta $\frac{\partial\phi}{\partial t}$ reprezintă variația locală, iar termenul $(\vec{v} \cdot \nabla)\phi$, componenta convectivă a proprietății ϕ .
- 2) Deoarece în expresiile principiilor mecanicii mediilor continue, apare operatorul de derivare : $\frac{d}{dt}$; este necesar a explicita această

derivată și pentru integrale de volum de forma : $\int_{V_t} \phi dv$.

- 3) Derivata materială pentru o integrală de volum V_t , în mișcare la momentul t , va trece la volumul V_0 , pentru momentul t_0 . Aceasta se face printr-o schimbare de variabilă, de formă generală : $x_i = x_i(X; Y; Z)$. Din analiza matematică se cunoaște că, elementul de volum dV , se poate exprima în funcție de : dV_0 prin relația :

$$dV = \mathfrak{J} dV_0 \quad (28)$$

unde \mathfrak{J} , reprezintă Jacobianul transformării :

$$\mathfrak{J} = \frac{D(x_i)}{D(X_i)} \quad (29)$$

Pentru prescurtare am nota \vec{x} cu $x_i = x, y, z$ coordonate spațiale și $X_i = X, Y, Z$ coordonate materiale.

Pe această bază se poate scrie:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} \phi dV = \frac{d}{dt} \int_{V_0} (\phi^* \mathfrak{J}) dV_0 = \int_{V_0} \frac{d}{dt} (\phi^* \mathfrak{J}) dV_0 = \int_{V_0} \left(\frac{d\phi^*}{dt} \mathfrak{J} + \phi^* \frac{d\mathfrak{J}}{dt} \right) dV_0 \quad (30)$$

cu $\phi^*(\vec{R}, t) = \phi(\vec{r}, t)$.

- 4) Explicând derivata Jacobianului $\frac{d\mathfrak{J}}{dt}$, și revenind la volumul V_t , prin intermediul transformării inverse $X_i = X_i(x, y, z)$ se obține forma:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} \phi dV = \int_{V_t} \left(\frac{d\phi}{dt} + \phi(\nabla \cdot \vec{v}) \right) dV \quad (31)$$

ceea ce reprezintă: prima formă a derivatei materiale, a unei integrale de volum.

- 5) Prin exprimarea termenului $\frac{d\phi}{dt}$, din (31) se obține cea de-a doua formă a derivatei :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} \phi dV = \int_{V_t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla(\phi \vec{v}) \right) dV \quad (32)$$

- 6) În continuare, prin transformarea unei integrale de volum, într-o integrală de suprafață, în baza formulei Gauss-Ostrogradski, se obține : cea de-a treia formă a derivatei :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} \phi dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_t} \phi dV + \int_{S_t} \vec{n} \cdot \phi \vec{v} dS \quad (33)$$

cu $S_i = Fr V_i$ (frontiera volumului) iar \bar{n} fiind normala exterioară a suprafeței S_i .

- 7) Cele trei forme (31), (32) și (33) pentru derivata materială a unei integrale de volum, mai sunt cunoscute în literatura de specialitate, ca și teorema transportului.

3.2.5. Ecuațiile fundamentale ale curgerii fluidelor în medii poroase

Aceste ecuații, vor fi obținute pe baza principiilor mecanicii mediilor continue, adaptate mediilor poroase, pe baza considerentelor matematice prezentate anterior. Ele pot fi obținute într-o formă globală sau locală, conform schemei dată mai jos :

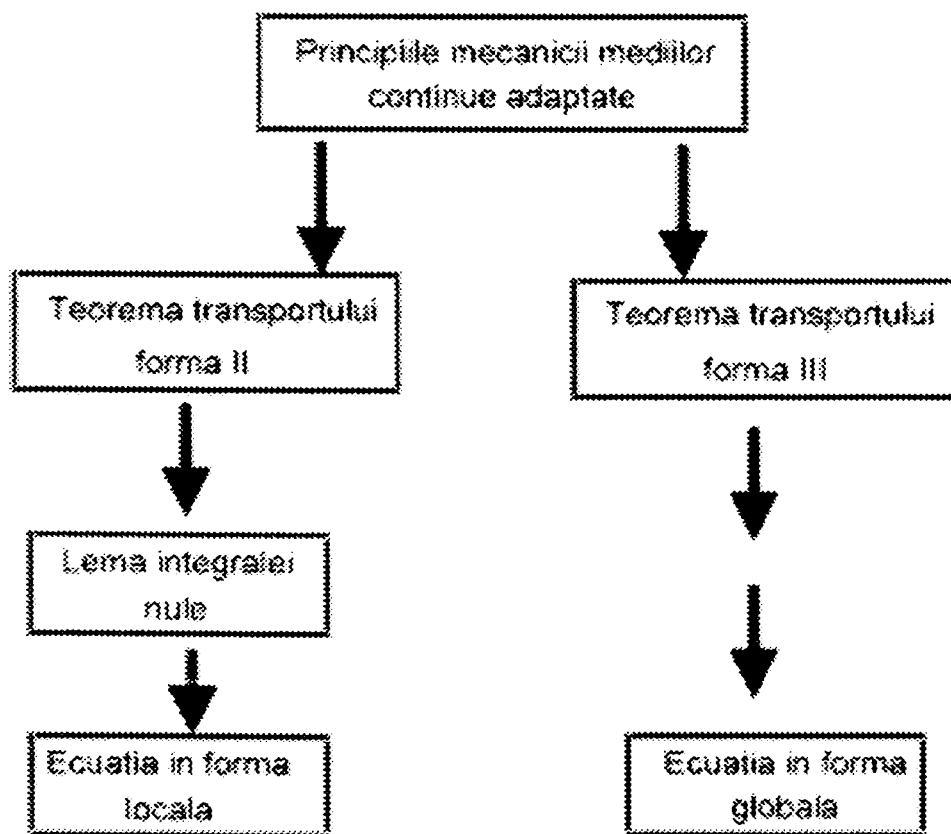


Figura 6. Schema obținerii ecuațiilor în formă globală și locală

3.2.5.1 Ecuația de continuitate

Din principiul conservării masei (17), prin aplicarea formei a treia transportului, se obține ecuația de continuitate în forma globală:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho m_e dV + \int_S \rho m_e \vec{n} \cdot \vec{v} dS = 0 \quad (34)$$

respectiv în forma locală, se obține prin aplicarea formei a doua, a aceluiași principiu:

$$\int_V \left[\frac{\partial(\rho m_e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho m_e \vec{u}) \right] dV = 0 \quad (35)$$

rezultă lema integralei nule : $\frac{\partial(\rho \cdot m_e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot m_e \cdot \vec{u}) = 0$ - forma locală, pentru

ecuația de continuitate.

Pentru o categorie importantă de mișcări, cum sunt cele cu nivel liber, se poate obține o formă particulară a ecuației de continuitate, prin neglijarea componentei verticale v_z a vitezei v .

În figura 7, se prezintă un volum particular de mediu poros, având dimensiuni elementare dx, dy, dz după direcțiile axelor de coordonate x, y, z , pentru care forma (34) a ecuației de continuitate devine, după transformări matematice :

$$\frac{\partial(m_e \cdot h)}{\partial t} + \nabla h \vec{u} = \varepsilon \quad (36)$$

sau

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_e \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x}(h v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(h v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(h v_z) = \varepsilon \quad (36')$$

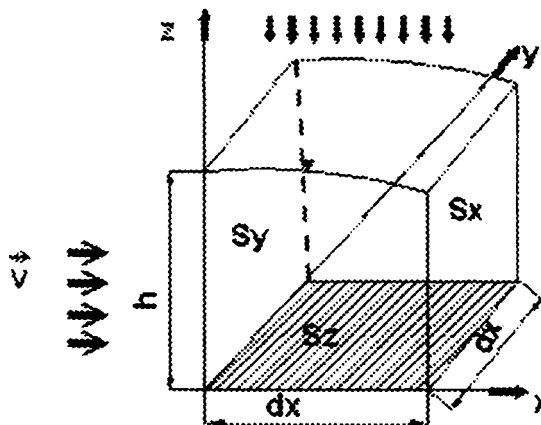


Figura 7 Volum particular de mediu poros

Observații :

Obs1) Ecuația de continuitate, sub formă globală (integrală), are forma :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot m_e \cdot dV + \int_S \rho \cdot m_e \cdot \vec{n} \cdot \vec{v} \cdot dS = 0,$$

iar sub formă locală, se prezintă astfel :

$$\frac{\partial(\rho \cdot m_e)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot m_e \cdot \vec{u} = 0 \quad (38)$$

Obs2) În regim de mișcare staționar, avem : $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, iar ecuația (36),

devine :

$$\nabla \cdot (h \cdot \vec{u}) = \varepsilon \quad (39)$$

sau echivalent : $\frac{\partial}{\partial x}(h \cdot v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(h \cdot v_y) = \varepsilon$ (pentru cazul bidimensional)

(39')

unde ε - aportul rezultat din precipitații (care se infiltrează în acviferul cu nivel liber, vezi figura 7)

Obs3) Ecuația de continuitate, pentru mișcări în acvifere cu nivel liber, cazul 2D (bidimensional) și în regim nepermanent $\left(\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0\right)$, are forma :

$$m_e \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(v_x \cdot h) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y \cdot h) = \varepsilon \quad (40)$$

și se deduce prin evaluarea celor doi termeni : $\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot m_e \cdot dV$ și $\int_S \vec{n} \cdot \vec{v} \cdot dS$;

termeni ce apar în ecuația de continuitate (pentru mediul poros), scris sub formă integrală, mai sus.

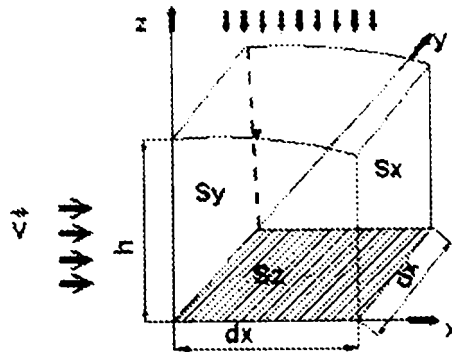
Concret, această evaluare se realizează astfel :

Evaluarea celor doi termeni, amintiți anterior, o realizăm în felul următor :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot m_e \cdot dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot m_e) dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot m_e) dx \cdot dy \cdot dz = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot m_e \cdot h) dx \cdot dy \quad (1')$$

unde $dz = h$

Volum particular de mediu poros



$$\int_S \vec{n} \cdot \vec{v} \cdot dS = ? \Leftrightarrow \begin{cases} S = ? \\ S_x = ? \quad S_{x+dx} = ? \quad S_{x+dx} - S_x = ? \\ \text{analog pentru } S_y \text{ si } S_z \dots S_n = ? \end{cases} \quad (2')$$

$$\text{Deci } S = Fr.V = (S_x \cup S_{x+dx}) \cup (S_y \cup S_{y+dy}) + (S_z + S_n) \quad (3')$$

Unde : $\int_{S_i} \vec{n} \cdot \vec{v} \cdot dS = - \int_{S_i} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS$, iar

$$\int_{S_i} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS = \int \left| \vec{i} \right| \cdot \left| \vec{v} \right| \cdot \cos 0^\circ \cdot \rho \cdot dS = \int_{S_i} v \cdot \rho \cdot dS = \int_{S_i} v_x \cdot \rho \cdot dy \cdot dz = \left(\int_0^h \rho \cdot v_x \cdot dz \right) dy \equiv (\rho \cdot v_x \cdot h) dy$$

$$\int_{S_i} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS = (\rho \cdot v_x \cdot h) dy \quad (4')$$

Deci : \Rightarrow

$$\int_{S_{i+dx}} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS = (\rho \cdot v_x \cdot h) dy$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \int_{S_{i+dx}} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS - \int_{S_{S_i}} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS &= [(\rho \cdot v_x \cdot h)_{x+dx} - (\rho \cdot v_x \cdot h)_x] dy = \frac{(\rho \cdot v_x \cdot h)_{x+dx} - (\rho \cdot v_x \cdot h)_x}{dx} dx dy = \\ &= \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{(\rho \cdot v_x \cdot h)_{x+dx} - (\rho \cdot v_x \cdot h)_x}{dx} dx dy = \frac{\partial(\rho \cdot v_x \cdot h)}{\partial x} dx dy \end{aligned}$$

Concluzie parțială :

$$\int_{S_{i+dx}} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS - \int_{S_i} \vec{i} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS \cong \frac{\partial(\rho \cdot v_x \cdot h)}{\partial x} dx dy \quad (5')$$

În mod analog se arată că :

$$\int_{S_{y+z}} \vec{j} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS - \int_{S_y} \vec{j} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS \equiv \frac{\partial(\rho \cdot v_y h)}{\partial y} dx dy \quad (6')$$

$$\int_{S_{z+\varepsilon}} \vec{k} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS - \int_{S_z} \vec{k} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS = \int_{S_x} \vec{n} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS = \int_{S_x} v_n \rho \cdot dS = -\varepsilon \rho \int_{S_x} \vec{k} \cdot \vec{n} \cdot dS = -\varepsilon \rho dx dy \quad (7')$$

Concluzie finală :

Cei doi termeni, a cărei evaluare am realizat-o mai sus, au următoarele expresii :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot m_e dV = \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot m_e h) dx dy \quad (17), \text{ respectiv}$$

$$\int_S \vec{n} \cdot \vec{v} \cdot dS = \frac{\partial(\rho \cdot v_x h)}{\partial x} dx dy + \frac{\partial(\rho \cdot v_y h)}{\partial y} dx dy + (-\varepsilon \rho dx dy) = \left[\frac{\partial(\rho \cdot v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y h)}{\partial y} + (-\varepsilon \rho) \right] dx dy \quad (1)$$

$$\text{Atunci în final : } \frac{d}{dt} \int_V \rho \cdot m_e \cdot dV = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot m_e dV + \int_S \vec{n} \cdot \vec{v} dS = 0 \quad (11)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot m_e h) dx dy + \left[\frac{\partial(\rho \cdot v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y h)}{\partial y} + (-\varepsilon \rho) \right] dx dy = 0$$

$$\Leftrightarrow \rho \left[\frac{\partial(v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y h)}{\partial y} + \frac{\partial(m_e h)}{\partial t} \right] dx dy = \varepsilon \rho dx dy$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} (v_x h) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y h) + m_e \frac{\partial h}{\partial t} = \varepsilon \quad (41)$$

q.e.d.

3.2.5.2 Ecuația transferului impulsului

Ecuația transferului impulsului, forma globală, se obține pe baza principiului conservării impulsului (18), transformând primul termen cu ajutorul teoremei transportului și ținând cont de ecuațiile constitutive : (21) și (22) :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot m_e \vec{v} dV = \int_V \rho m_e \vec{g} dV - \int_S p m_e \vec{n} dV - \int_S p \frac{\vec{v}}{m_e^2} \vec{n} \cdot \vec{v} dS - \int_V \rho \cdot m_e \cdot \lambda \cdot \vec{v} \cdot dV \quad (37)$$

Ae obține , transformând integrala de suprafață, în integrală de volum, și prin aplicarea lemei integralei nule.

Viteza de filtrație : $\vec{v} = m_e \vec{u}$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{m_e} (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nabla \left(\vec{g}z + \frac{p}{\rho} \right) + \lambda \vec{v} = 0 - \text{ecuația generală a mișcării fluidului prin medii poroase sub formă locală} \quad (42)$$

Observație :

Precizarea coeficientului λ (o caracteristică a mediului poros, fluidului și regimului de mișcare) se va face într-un alt paragraf, destinat legii lui Darcy.

• **Ecuția transferului energiei**

Ca și în cazul ecuației de continuitate și aici pentru a obține forma globală a ecuației transferului energiei, se fac o serie de transformări matematice, folosind la bază, principiul conservării energiei.

Astfel, pentru primul termen din principiul conservării energiei, prin aplicarea teoremei transportului, pentru derivata energiei cinetice și în baza ecuației de continuitate, se poate scrie:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho m_e \frac{u^2}{2} dV = \int_V \rho m_e \vec{u} \frac{d\vec{u}}{dt} dV \quad (43)$$

rezultând astfel:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho m_e \frac{u^2}{2} dV = \int_V \vec{v} \rho \vec{g} dV - \int_S \vec{n} \cdot \vec{v} p \vec{g} dS + \int_V \rho \vec{v} \vec{f}, dV \quad (44)$$

ceea ce conduce la exprimarea derivatei energiei interne de forma:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho m_e e_i dv = 0 \quad (45)$$

Din punct de vedere fizic, relația (45) exprimă faptul că mișcarea fluidului în mediul poros are loc, fără modificarea energiei interne.

În ecuația (44) transformând primul termen, pe baza teoremei transportului, pe baza ecuațiilor constitutive se obține forma globală a transferului energiei :

$$\frac{\hat{c}}{\hat{c}t} \int_V \rho \frac{v^2}{2m_e} dV = - \int_S \rho \vec{n} \cdot \vec{v} \left[\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right] dS + \int_V \rho \vec{v} \cdot \vec{f}_r dV \quad (46)$$

Forma globală : (46) arată că variația locală a energiei cinetice din volumul de mediu poros (termenul stâng) are loc pe seama transferului energiei totale (cinetice, de poziție și de presiune) prin frontiera S a volumului V la care se adaugă transferul energiei rezultate prin forțele de frecare (ultimul termen).

Observație :

1) Pentru regimul de mișcare permanent, derivata parțială în raport cu timpul, se anulează, ceea ce conduce la forma :

$$\int_S \rho \vec{n} \cdot \vec{v} \left[\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right] dS = \int_V \rho \vec{v} \cdot \vec{f}_r dV \quad (47)$$

care se interpretează prin faptul că : transferul energiei totale prin frontiera volumului de mediu poros se face exclusiv pe seama forțelor de rezistență (de frecare) din volumul considerat, care din punct de vedere hidraulic reprezintă o energie disipată (o pierdere de energie).

2) Pentru această energie disipată, în baza ecuațiilor constitutive se poate scrie:

$$E_d = \int_V \rho \vec{v} \cdot \vec{f}_r dV = - \int_V \rho \lambda \vec{v} \cdot \vec{v} dV = - \int_V \rho \lambda v^2 dV \quad (48)$$

semnul minus, arătând faptul că : energia disipată este negativă.

3.2.5.3 Ecuația transferului energiei, pentru un tub de curent : Legea lui Darcy

Pentru un tub de curent particular, de formă cilindrică, având ca și limite secțiunile circulare ortogonale de intrare și de ieșire, respectiv frontiera laterală rigidă, se va particulariza în continuare, ecuația transferului energiei (47) pentru regimul de mișcare permanent și uniform.

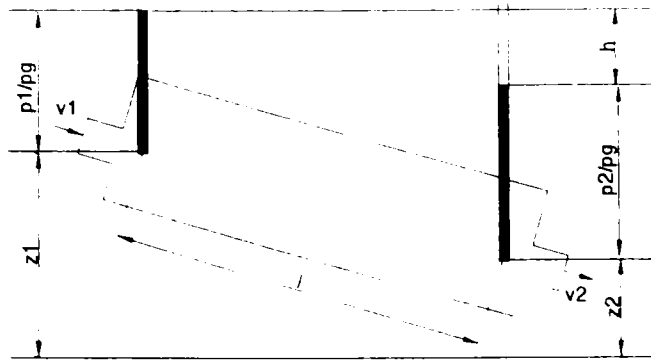


Figura 8. Tub de curent cilindric

Pentru aceasta, se introduc coeficienții de neuniformitate ai distribuției de viteză :

$$\alpha = \frac{v_m^3}{S} \int_s \left(\frac{v}{v_m} \right)^3 dS \quad \beta = \lambda_m \frac{v_m^2}{S} \int_s \frac{\lambda}{\lambda_m} \left(\frac{v}{v_m} \right)^2 dS \quad (49)$$

cu \bar{v}_m viteza de filtrație medie, respectiv coeficientul constitutiv mediu : λ_m într-o secțiune, mărimi date de relațiile::

$$\bar{v}_m = \frac{1}{S} \int_s \bar{v} dS \quad (50)$$

$$\lambda_m = \frac{1}{S} \int_s \lambda dS \quad (51)$$

În același timp, din ecuația transferului impulsului (39), se remarcă faptul că de-a lungul unui vector elementar, energia potențială specifică (de poziție și de presiune) este constantă:

$$\left(\bar{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \lambda m_e \bar{v} \right) \cdot d\vec{l} = 0 \quad (52)$$

$$\bar{g}z - \frac{p}{\rho} = const. \quad (53)$$

Pe baza acestor precizări, notații introduse, forma integrală globală a transferului energiei (46) devine:

$$\int_s \rho \vec{n} \cdot \bar{v} \left[\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right] dS = \rho \bar{v} \int_{s2} \left(\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right) dS - \rho \bar{v} \int_{s1} \left(\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right) dS \quad (54)$$

echivalentă, prin introducerea coeficienților λ_m cu:

$$\int_S \rho \vec{n} \cdot \vec{v} \left[\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right] dS = \rho Q \left[\int_{S_2} \left(\frac{\alpha v_m^2}{2m_c^2} + gz + \frac{p}{\rho} \right) dS - \rho \vec{v} \int_{S_1} \left(\frac{\alpha v_m^2}{2m_c^2} + gz + \frac{p}{\rho} \right) dS \right] \quad (55)$$

iar prin evaluarea integralei, conținând produsul scalar $\vec{v} \cdot \vec{v}$:

$$\int_V \rho \lambda \vec{v} \cdot \vec{v} dV = \int_V \rho \lambda v^2 dV = \int_l \rho \left(\int_S \lambda v^2 dS \right) dl = \rho \beta Q \lambda_m l v_m \quad (56)$$

unde cu Q s-a notat debitul:

$$Q = v_m S \quad (57)$$

Considerând că pentru un tub de curent cilindric $\alpha_1 = \alpha_2$ și $v_{m1} = v_{m2}$ se obține:

$$v_m = \frac{g}{\beta \lambda_m} \frac{1}{l} \left[\left(gz_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(gz_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) \right] dS = \frac{g}{\beta \lambda_m} \frac{h_1 - h_2}{l} = \frac{g}{\beta \lambda_m} \frac{h}{l} \quad (58)$$

Observație:

Ultima ecuație obținută (58), permite următoarele concluzii:

- ◆ termenii conținuți de ecuație conțin mărimi fizice (hidraulice) mediate;
- ◆ \vec{v}_m reprezintă viteza de filtrație medie pentru un tub de curent considerat, într-o secțiune transversală normală pe generatoarea tubului de curent, situație dată de însăși definiția tubului de curent din mecanica fluidelor;
- ◆ raportul: $\frac{h}{l}$, respectiv pierderea de sarcină, raportată la lungimea tubului de curent, în hidraulică, se numește pantă hidraulică, notându-se cu I_m :
- ◆ termenul: $\frac{g}{\beta \lambda_m}$ reprezintă o caracteristică a mediului poros, fluidului în mișcare și mișcării propriu-zise, iar în mod formal se poate nota cu k , definit anterior ca și coeficient de filtrație sau permeabilitate.

În baza acestor concluzii, ecuația (58) se poate scrie în forma consacrată:

$$v_m = k I_m \quad (59)$$

o relație cvasicunoscută, ca fiind: legea lui Darcy, pentru mișcarea fluidelor în medii poroase, stabilită experimental de către autor, H.P.G. Darcy, în anul 1856.

Asupra legii lui Darcy, trebuie menționate următoarele observații:

- 1) Ecuația (59) reprezintă o ecuație liniară între variabilele viteză și pantă hidraulică;

- 2) Există limitări asupra valabilității acestei ecuații și liniarității ei, limite impuse de regimul de mișcare, caracterizat prin numărul lui Reynolds, definit în mod diferit de către diverși cercetători, consacrați însă prin rezultate deosebite;
- 3) Cu toate aceste limitări, restricții evaluate, ulterior legea lui Darcy, privind mișcarea fluidelor prin medii poroase, este general acceptată și folosită ca instrument teoretic și tehnic, în rezolvarea problemelor de hidraulică subterană.
- 4) Față de forma ei simplă, mediată (59), această lege permite generalizări și dezvoltări, care vor fi prezentate în paragraful următor.

3.2.5.3.1 Forme matematice ale legii lui Darcy. Generalizări

Rezultatele experimentale obținute de Darcy, au avut ca și caz particular curgerea fluidelor prin mediul poros mărginit de un tub de curent rigid, însă de o formă particulară (figura 8). Pentru a utiliza legea lui Darcy, în domenii de curgere de formă oarecare (cazurile practice ale acviferelor), este necesară o formă diferențială (locală) a acestei legi.

În baza observației că : pentru un tub de curent, viteza de filtrație este paralelă cu elementul de linie $d\vec{l}$, iar curgerea are loc în sensul descreșterii sarcinii, se poate scrie o primă formă diferențială :

$$v = -k \frac{dh}{dl} \quad (60)$$

Pentru un tub de curent, ce permite o mișcare tridimensională, având sistemul de referință ortogonal cu axa Oz orientată după verticala ascendentă, legea lui Darcy se poate generaliza în continuare sub forma :

$$\vec{v} = -k \nabla h \quad (61)$$

cu h reprezentând sarcina de poziție și de presiune:

$$h = \frac{P}{\rho g} + z \quad (62)$$

Mișcarea tridimensională presupune, existența a trei componente ale vitezei de filtrație, obținute din (61) de forma :

$$v_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}; \quad v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}; \quad v_z = -k \frac{\partial h}{\partial z}; \quad (63)$$

Observație :

În expresiile anterioare, din aceste generalizări, mărimea k , coeficientul de filtrație considerat o funcție de punct, caracteriza mediile omogene în care acesta este constant. Dacă acest coeficient, nu mai este constant, mediile sunt neomogene, cazul cel mai întâlnit în practică. În plus, dacă acest coeficient prezintă variații după nouă direcții diferite date de combinațiile axelor de coordonate, în sistemul de axe tridimensional, pentru același gradient hidraulic, vitezele de curgere nu vor mai fi aceleași. Asemenea medii poroase, se numesc **anizotrope**, caz în care coeficientul defiltrație, nu mai este un scalar, ci un tensor de ordinul doi, iar legea lui Darcy ia forma:

$$\vec{v} = -\vec{k} \nabla h \quad (64)$$

care poate fi scrisă într-un sistem de coordonate ortonormat $Oxyz$ sub forma matricială:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (65)$$

4. Bazele modelării transportului poluanților în apele subterane

Modelarea transportului poluanților în apele subterane, are ca scop *prinderea fenomenului fizico-chimic într-un aparat matematic* (ecuații specifice), ce reprezintă într-o anumită măsură procesele definitorii, ecuații care suportă rezolvări/soluții matematice.

Funcția matematică necunoscută în acest caz, este reprezentată de concentrația C în apa subterană a unei specii de poluant dizolvat care nu modifică densitatea apei subterane și nici temperatura, în mod semnificativ, fără deci a considera procese termice sau termodinamice. Ținând cont de componența fizică a acviferului, ca mediu poros, dată de existența celor trei faze (solidă, lichidă, fluidă), concentrația unei specii de poluant se poate defini:

$$C = \frac{m_p}{V_e} \quad (66)$$

unde:

- C - concentrația masică a speciei de poluant, [ML⁻³];
- m_p - masa speciei de poluant, [M];
- V_e - volumul golurilor interconectate, conținând apă subterană, [L³];

Pentru un volum elementar de mediu poros, dV, masa totală de poluant având concentrația C va fi dată de expresia integrală :

$$m_p = \int_V C m_e dv \quad (67)$$

unde m_e, porozitatea efectivă, (a fost definită în capitolul II).

Observații :

- 1) În expresia integralei (67) toate mărimile conținute sub semnul integralei sunt desigur valori medii.
- 2) Dacă densitatea speciei de poluant ρ_s este mult diferită de cea a apei și cantitatea speciei prezente este considerabilă, va avea loc o modificare (mărire) a densității soluției ρ_m după relația:

$$\rho_m = \rho + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) C \quad (68)$$

- 3) Această modificare a densității soluției, influențează forma ecuațiilor hidrodinamice ale curgerii. În cele ce urmează se va neglija acest fenomen considerând densitatea apei subterane nemodificată, caz care este cunoscut drept ca și cazul substanțelor poluante trasoare.
- 4) Procesele fizico-chimice de transport ale poluanților în acvifere, se vor reprezenta prin așa numitele fluxuri de transport, mărimi vectoriale care exprimă cantitatea (masa) de substanță poluantă printr-o secțiune unitară în unitatea de timp.
- 5) Prin metode specifice se vor obține ulterior, ecuațiile de transport ale poluanților în medii poroase, ecuații cu derivate parțiale, în varianta generală tridimensională (3D).
- 6) Desigur, că pentru acviferele freatice această formă 3D, nu este reprezentativă, de aceea se vor prezenta și formele particulare ale acestor ecuații, respectiv forma 2D care este uzuală.
- 7) Metodele de rezolvare a ecuațiilor de transport (analitice, numerice, combinate) întregesc modelarea matematică a transportului poluanților în acvifere, oferind pe această cale un instrument de investigare, evaluare și concluzionare în acest domeniu atât de complex.

4.1 Procese fizico-chimice de transport

Procesele fizico-chimice de transport ale poluanților în acvifere se deosebesc prin cauze diferite de natură fizico-chimică, expresia fluxurilor caracteristice de poluant pe care le generează care conțin parametri specifici. Ele sunt : *convecția, dispersia, difuzia, adsorbția și degradarea*.

a) Convecția

Este cel mai important proces de transport fizic de transport, datorat vitezei de curgere a apelor subterane. Este un proces pur mecanic fără amestec în care poluantul este antrenat cu aceeași viteză cu a apei, interfața dintre poluant și apă rămânând abruptă.

Fluxul convectiv de poluant, este dat de expresia:

$$\vec{q}_c = m_c (C \vec{V}) = C \vec{V}_c \quad (69)$$

unde

\vec{q}_c fluxul convectiv de poluant, $[ML^{-2}T^{-1}]$.

cu V_r și V_o definite în capitolul 2 și considerate valori medii

Reprezentarea schematică a convecției, cu evidențierea caracterului abrupt al interfeței dintre poluant și apa conținută de mediul poros, pentru cazul 3D și injecție de tip instantaneu este prezentată în figura 9.

Pentru cazul injecției continue, în același caz 3D, reprezentarea grafică a convecției este cea din figura 10.

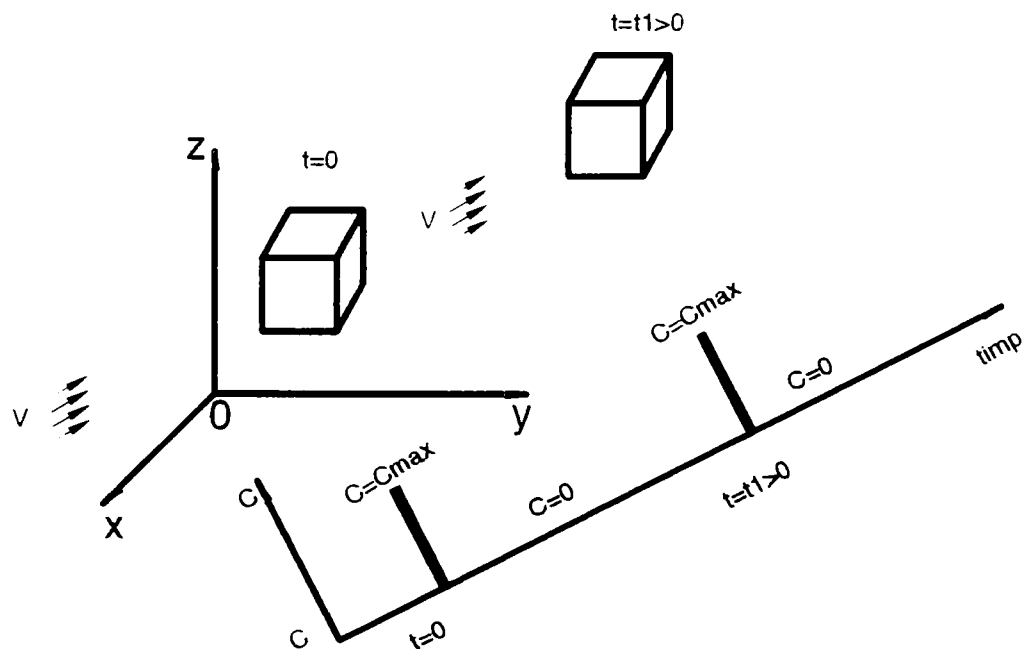
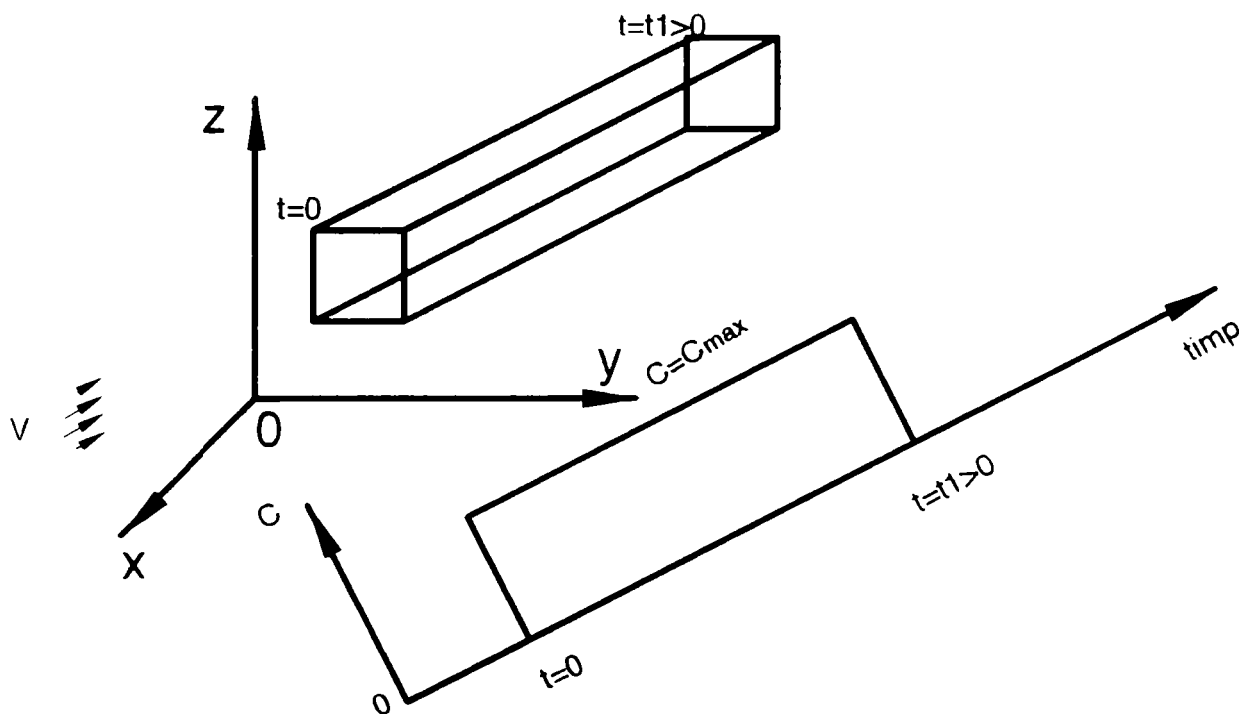


Figura 9 Schema convecției pentru injecția instantanee



Figură 10 Schema convecției pentru injecția continuă

b) Dispersia

Dispersia reprezintă cel de-al doilea proces de transport ca importanță de natură hidrodinamică, *constând în reducerea concentrației și întinderea penei poluante în mișcarea apei și poluantului în mediul poros.*

Cauzele dispersiei sunt date de :

- variabilitatea câmpului de viteză (mărime, direcție);
- variabilitatea traseelor de curgere (date de tortuozitate);
- forma și mărimea variabilă a secțiunilor de curgere, respectiv a porilor.

Observație :

Dacă fenomenul este studiat la scări diferite ale mediului poros (microscară, scară mică-medie, macroscară), unde dimensiunile geometrice ale mediului poros sunt de *mm*, *m*, *km*, atunci se poate vorbi chiar de microdispersie, dispersie respectiv macrodispersie. Acest aspect este reprezentat sugestiv în figura 11.

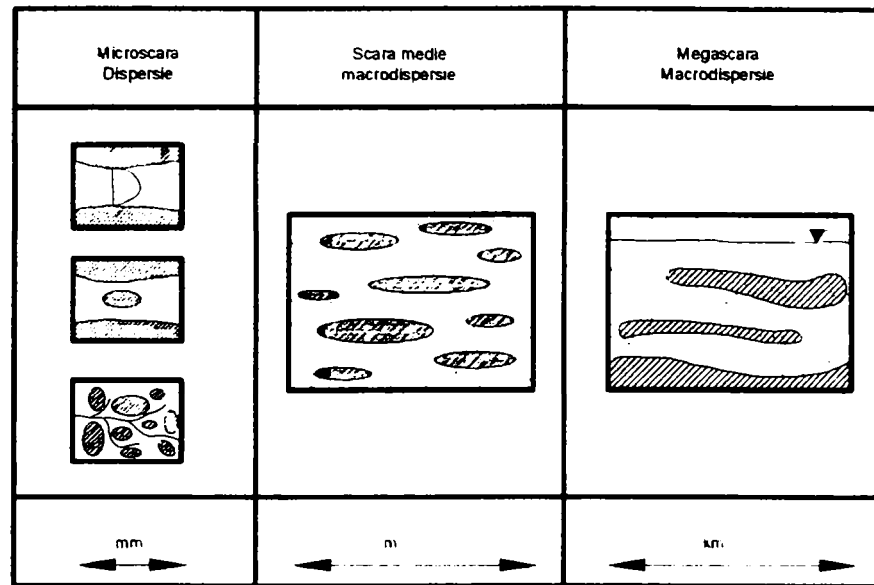


Figura 11. Scări de dispersie

În cazul dispersiei interfața poluant-apă nu mai este abruptă. Volumul de poluant reprezentat schematic printr-un volum elementar de control (VEC) va fi deformat în timpul curgerii. Practic într-o secțiune de control la timpul t_1 la care ar trebui să ajungă masa masivă poluantă convectivă, o parte a poluantului depășește această secțiune iar o parte rămâne în urmă. Si acest aspect este reprezentat în mod grafic într-un mod sugestiv, în figura 12.

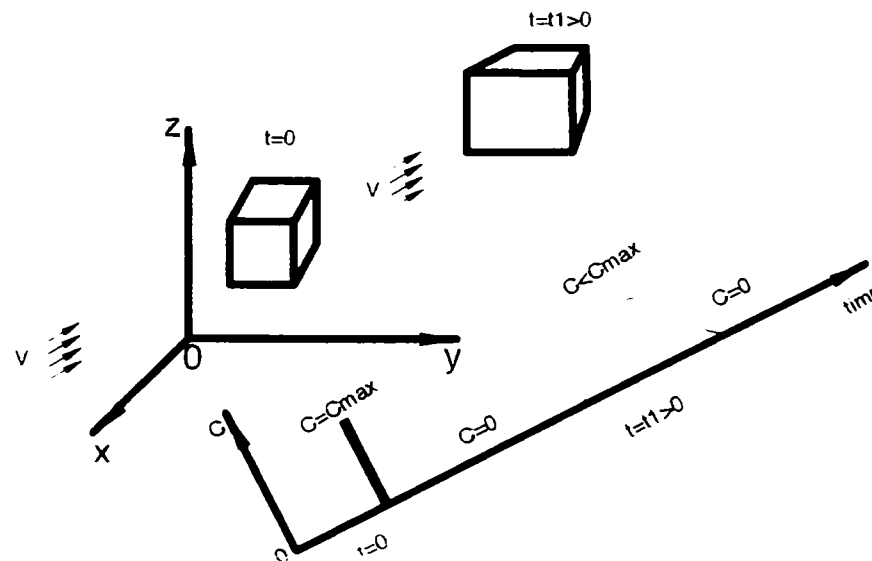
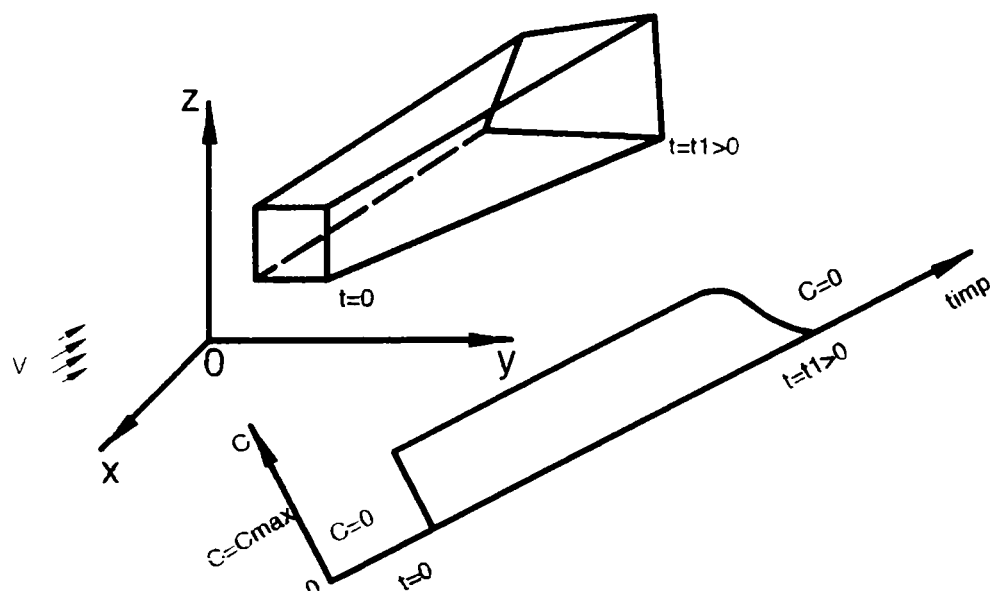


Figura 12. Schema dispersiei pentru injectia instantanee (3D)



Figură 13 Schema dispersiei pentru injectia continuă

Fluxul masic dispersiv, este dat de expresia:

$$\bar{q}_{Ls} = -m_c \bar{D}_{Ls} \cdot \nabla C \quad (70)$$

unde:

- \bar{q}_{Ls} - flux masic dispersiv de poluant, $[ML^{-2}T^{-1}]$,

- \bar{D}_{Ls} - tensorul coeficient de dispersie, $[L^2T^{-1}]$

- ∇C - gradientul concentrației, $[ML^{-4}]$

cu:

$$\nabla C = \frac{\partial C}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial C}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial C}{\partial z} \bar{k} \quad (71)$$

În cazul tridimensional tensorul coeficient de dispersie, un tensor de ordinul doi, are nouă componente date de matricea:

$$D_{Ls} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Componentele matricii (72) pot fi exprimate funcție de componentele vitezei în 3D:

$$V_u = V_{ux} \bar{i} + V_{uy} \bar{j} + V_{uz} \bar{k} \quad (73)$$

$$D_{xx} = a_L \frac{V_{ax}^2}{V_a} + a_T \frac{V_{ay}^2 + V_{az}^2}{V_a} \quad (74)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (a_L - a_T) \frac{V_{ax}V_{ay}}{V_a} \quad (75)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (a_L - a_T) \frac{V_{ax}V_{az}}{V_a} \quad (76)$$

$$D_{yy} = a_L \frac{V_{ay}^2}{V_a} + a_T \frac{V_{ax}^2 + V_{az}^2}{V_a} \quad (77)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (a_L - a_T) \frac{V_{ay}V_{az}}{V_a} \quad (78)$$

$$D_{zz} = a_L \frac{V_{az}^2}{V_a} + a_T \frac{V_{ax}^2 + V_{ay}^2}{V_a} \quad (79)$$

unde : a_L reprezintă dispersivitatea longitudinală [L], exprimând efectul dispersiei după direcția vitezei, respectiv a_T dispersivitatea transversală, [L], exprimând efectul aceluiași proces după o direcție perpendiculară pe cea a vitezei. Valorile dispersivităților depind de scara de studiu a problemei. După unii cercetători, (Fried 1975), în urma experimentelor de laborator, valorile dispersivității longitudinale a_L se situează în intervalul 10^{-4} - 10^{-2} m. La scară macro, în natură, pentru modelări pe acvifere de dimensiuni de ordinul kilometrilor valoarea aceleiași dispersivități a_L oscilează în jurul valorii 0.07 m. Pentru alte scări ale problemei studiate, valorile a_L sunt redată în graficul prezentat în figura 14.

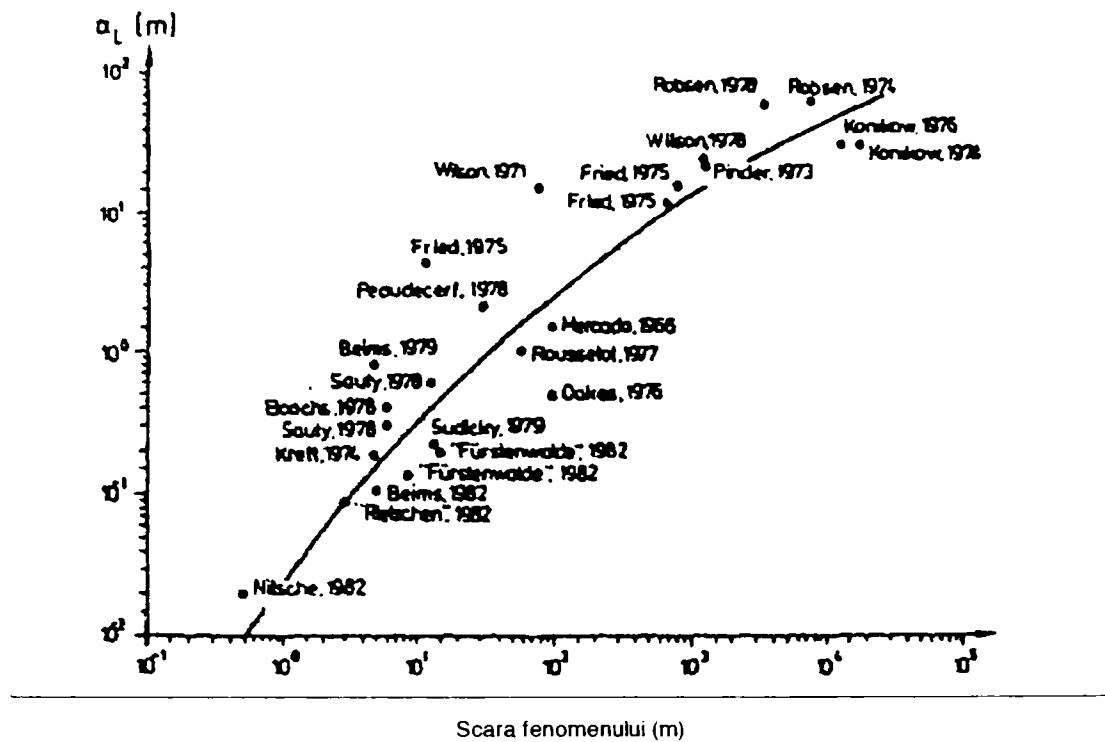


Figura 14. Variația dispersivității longitudinale cu scara fenomenului

Dispersivitatea transversală, se apreciază ca fiind inferioară celei longitudinale, coeficientul de reducere fiind între 8-10, depinzând și în acest caz de scara problemei.

Cazuri particulare :

Componentele tensorului coeficient de dispersie date de matricea (72) exprimate explicit în funcție de componentele vitezei și dispersivitățile longitudinală și transversală sunt în cazul general 3D. Dacă curentul subteran, exprimat prin componentele vitezei, nu este tridimensional sau dispersia nu este în acest caz, se întâlnesc cazuri particulare și anume:

- *Curent unidimensional* (1D), $\vec{V}_a = V_{ax} \vec{i}$; $V_{ay} = V_{az} = 0$, și dispersie 3D pentru

care componentele tensorului \vec{D}_{ds} sunt obținute din (74-79):

$$\begin{aligned} D_{xx} &= a_L V_{ax} = D_L \\ D_{yy} &= a_T V_{ax} = D_T \\ D_{zz} &= a_T V_{ax} = D_T \end{aligned} \quad (80)$$

iar matricea are forma:

$$D_{Ds} = \begin{bmatrix} \overline{D}_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{bmatrix} \quad (81)$$

- Curent 2D, $\vec{V}_a = V_{ax}\vec{i} + V_{ay}\vec{j}$; $V_{az} = 0$, și dispersie 2D:

$$D_{xx} = a_L \frac{V_{ax}^2}{V_a} + a_T \frac{V_{ay}^2}{V_a} \quad (82)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (a_L - a_T) \frac{V_{ax}V_{ay}}{V_a} \quad (83)$$

$$D_{yy} = a_L \frac{V_{ay}^2}{V_a} + a_T \frac{V_{ax}^2 + V_{ay}^2}{V_a} \quad (84)$$

- Curent 1D și dispersie 2D :

$$\begin{aligned} D_{xx} &= a_L V_{ax} = D_L \\ D_{yy} &= a_T V_{ax} = D_T \end{aligned} \quad (85)$$

$$D_{Ds} = \begin{bmatrix} \overline{D}_L & 0 \\ 0 & D_T \end{bmatrix} \quad (86)$$

- Curent 1D și dispersie 1D :

$$D_{Ds} = a_L V_{ax} = D_L \quad (87)$$

c) Difuzia

Difuzia reprezintă un fenomen fizico-chimic de transport, constând în reducerea concentrației în apa subterană dinspre punctele/zonile de concentrație ridicată înspre cele cu concentrație scăzută, chiar în absența mișcării. Difuzia reprezintă efectele de transfer macroscopic ale poluantului (de fapt un transfer de masă) care are cauze microscopice.

Cauzele difuziei sunt date de : mișcarea moleculară Browniană (care are loc și în repaus), alături de difuzia turbulentă, un fenomen ce ține de aspecte hidrodinamice ale curgerii. Efectul combinat al celor două cauze, este dat de fluxul difuziv, exprimat de ecuația (88), cunoscută ca **prima lege a lui Fick**:

$$\vec{q}_d = -m_e D_{mp} \nabla C \quad (88)$$

- \vec{q}_d - flux masic difuziv de poluant, $[ML^{-2}T^{-1}]$;

- D_{mp} - coeficient de difuzie în mediul poros, [L^2T^{-1}]

- ∇C - gradientul concentrației, [ML^{-4}]

Efectul difuziei asupra procesului de transport, respectiv forma interfeței poluant-apă subterană, este similar celui de la dispersie dar mult mai redus.

Observații :

- 1) Difuzia poluanților în mediul poros, *diferă sub multe aspecte* față de difuzia aceluiași poluant în apă. De aceea coeficientul de difuzie în mediul poros D_{mp} se va exprima funcție de coeficientul de difuzie în apă (care se poate determina în laborator) printr-o relație de forma de forma:

$$D_{mp} = \omega D_0 \quad (89)$$

unde :

- D_0 -coeficientul de difuzie în apă, [L^2T^{-1}]

- ω -coeficient de reducere.

- 2) Coeficientul de difuzie în apă, se determină în laborator, depinde într-o oarecare măsură de concentrație dar mai ales de temperatură.
- 3) Coeficientul de reducere al difuziei are o valoare subunitară, după unii autori fiind 0.7 la curgerea prin nisip, și depinde de tortuozitatea mediului poros.
- 4) Datorită valorii scăzute a coeficientului de difuzie în apă (10^{-9} la $25^\circ C$) aportul procesului de difuzie în ansamblul procesului de transport este relativ mic. Acesta este un motiv pentru care difuzia se poate neglija, ori se poate include în procesul de dispersie, efectele asupra procesului de transport fiind similare dar la o scară mult mai mică.

Mărimi adimensionale

Pentru a răspunde la întrebarea : “Care dintre cele trei procese fizico-chimice de transport (convecție, dispersie, difuzie) este dominant ?” (pentru un caz dat, cu

parametrii cunoscuți) este nevoie de un criteriu. Acest criteriu este dat de o mărime adimensională numită **numărul Peclet**, definit prin :

$$Pe = \frac{V_x d}{D_0} \quad (90)$$

unde d reprezintă caracteristica fazei solide a mediului poros, (după unii autori $d = d_{50\%}$).

Studiind următoarele trei funcții:

$$\begin{aligned} \frac{D_L}{D_0} &= f_1(Pe) \\ \frac{D_T}{D_0} &= f_2(Pe) \\ \frac{D_L}{V_{ax}} &= f_3(Pe) \end{aligned} \quad (91)$$

se întâlnesc următoarele situații, privind procesul sau procesele dominante pentru un caz dat:

- a) difuzie moleculară pură, viteze mici de deplasare, dispersie longitudinală de același ordin cu difuzia, $D_L/D_0 = 0.67$;
- b) suprapunerea dispersiei longitudinale peste difuzie;
- c) dispersie longitudinală predominantă, fără neglijarea difuziei;
- d) dispersie longitudinală predominantă, cu neglijarea difuziei;
- e) mișcarea apei subterane iese din valabilitatea legii lui Darcy.

Situațiile prezentate mai sus, pot fi prezentate grafic în figura 15.b).

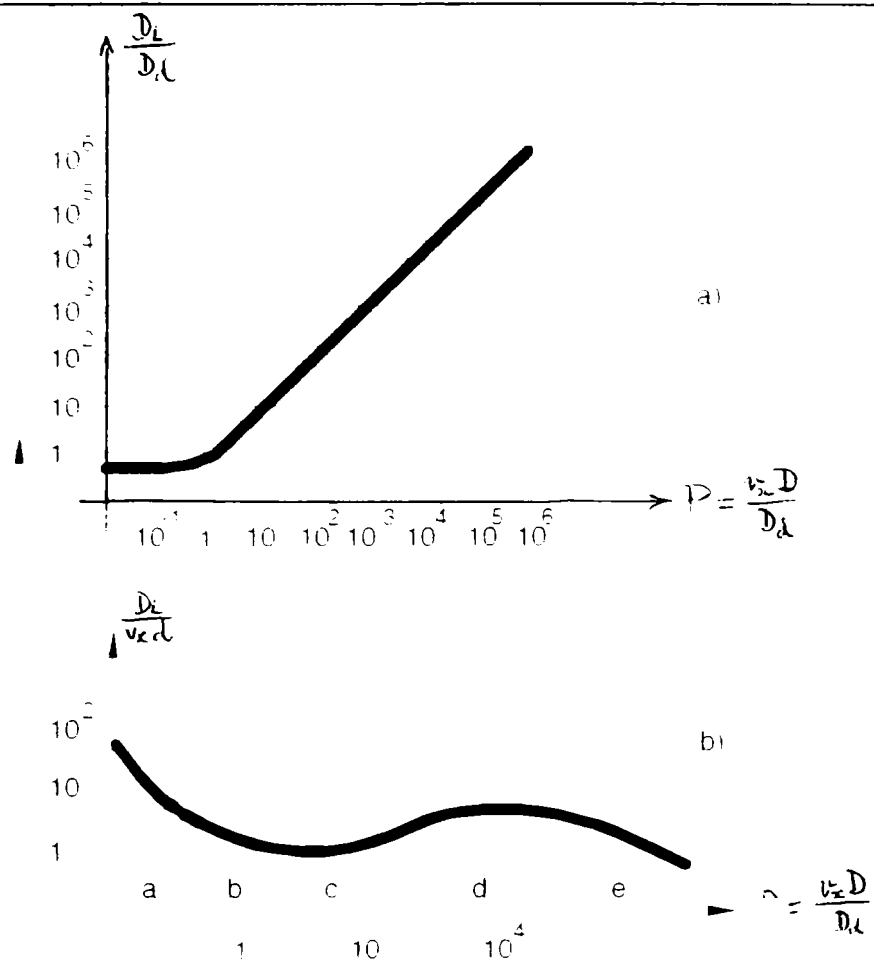
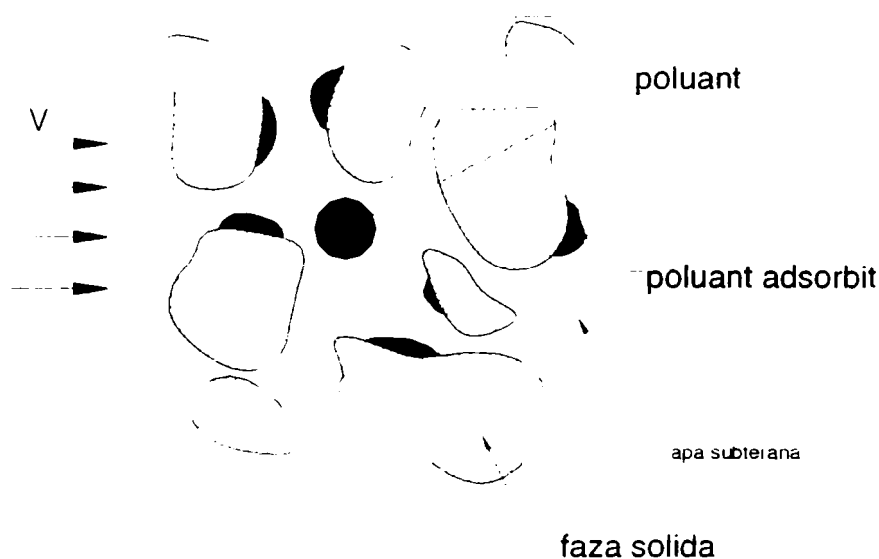


Figura 15 Trecerea de la difuzie moleculară la dispersie

d) Alte procese de transport

d1) Adsorbția

Adsorbția reprezintă un proces de reducere a concentrației speciei de poluant din apa subterană, prin adsorbția acesteia de către scheletul solid al mediului poros din cauze de natură fizico-chimică. Prin acest proces particulele de poluant sunt reținute de scheletul solid nemaiparticipând la fluxurile de transport definite anterior (convectiv, dispersiv, difuziv).



Figură 16 Schema adsorbției

Ulterior, prin procese de aceeași natură fizico-chimică poluantul adsorbit este eliberat, prin desorbție, participând astfel la fluxul general de transport. Prin adsorbție/desorbție se creează formal o reducere, respectiv o producție suplimentară de poluant.

La nivel microstructural, gradul de adsorbție se poate exprima prin mărimea adimensională:

$$C_{ak}^* = \frac{m_{pol}}{m_{sch}} \quad (92)$$

unde:

- C_{ak}^* - coeficientul de adsorbție microstructural;

- m_{pol} - masa de poluant adsorbit, [M];

- m_{sch} - masa scheletului solid, [M].

Notând cu ρ_k^* densitatea scheletului solid, atunci la același nivel microstructural masa de substanță poluantă adsorbită va fi m_a^* , dată de relația:

$$m_a^* = \rho_k^* C_{ak}^* \quad (93)$$

La nivelul unui volum elementar de control (VEC), având volumul unitar, și porozitatea efectivă m_e , volumul scheletului solid este reprezentat de $(1 - m_e)$, iar masa de substanță adsorbită de scheletul solid, va fi dată de expresia integrală :

$$m_a = \frac{1}{V} \int_V \rho_k C_a (1 - m_e) dV \quad (94)$$

unde: - m_a - masa de substanță poluantă adsorbită, [M];

- ρ_k - densitatea medie a scheletului solid, [ML⁻³];

- C_a - coeficient de adsorbție mediu.

Pentru o specie de poluant conținut în apa subterană și adsorbit de scheletul solid al mediului poros, pentru un volum elementar de control, masa totală de poluant, va fi dată de expresia :

$$m_p = C m_e + (1 - m_e) \rho_k C_a \quad (95)$$

sau introducând o nouă mărime, masa de poluant devine:

$$m_p = C m_e R \quad (96)$$

cu:

$$R = 1 + \frac{1 - m_e}{m_e} \rho_k \frac{C_a}{C} \quad (97)$$

unde R se numește coeficient de întârziere.

Observații :

1)

- a. Valoarea $R=1$ semnifică faptul că procesul este fără adsorbție.
- b. Valoarea $R>1$ indică o întârziere a penei de poluant, datorită adsorbției
- c. Valoarea $R<1$ arată că pana poluantă depășește frontul convectiv-dispersiv.

Concentrația de poluant adsorbit de scheletul solid C_a depinde de concentrația poluantului în apă, după o relație :

$$C_a = f(C) \quad (98)$$

2) Funcția $f(C)$ este cunoscută ca și izotermă, reprezentând relația de echilibru între cantitatea de poluant dizolvat în soluție și cea reținută, la temperatură constantă.

Funcția $f(C)$ poate fi exprimată în principal prin două forme și anume:

a. **forma liniară:**

$$C_a = K_D C \quad (99)$$

unde K_D reprezintă un coeficient de distribuție, respectiv:

b. **forma neliniară** după diverși autori (Freundlich (1926), Langmuir (1918), van Genugten (1974), citați de Bear (1991):

$$\begin{aligned} C_a &= K_1 C^{K_2} \\ C_a &= \frac{K_3 C}{1 + K_4 C} \\ C_a &= K_5 C e^{-2K_6 C} \end{aligned} \quad (100)$$

unde $K_1 \dots K_6$ reprezintă constante.

3) Pentru cazul adsorbției lente, când între substanța dizolvată și cea adsorbită nu mai există echilibru, izotermele se completează cu ecuații cu derivate parțiale de forma (Bear 1991):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= K_r C \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= K_r \left(\frac{K_7 C}{1 + K_8 C} - C_a \right) \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= K_r (K_9 C^{K_{10}} - C_a) \end{aligned} \quad (102)$$

cu $K_7 \dots K_{10}$ constante iar K_r coeficient ce exprimă rata cinetică a procesului de adsorbție.

d2) Degradarea

Degradarea intră în categoria proceselor de pierdere de poluant din apa subterană. Degradarea poate fi de natură chimică, biologică sau radioactivă.

Degradarea chimică constă în reacțiile chimice dintre specia de poluant și alți compuși chimici din apa subterană sau conținuți de scheletul solid ceea ce conduce la consumul de poluant și implicit la reducerea concentrației acestuia în apa subterană. Viteza de reacție depinde de natura poluantului și a compușilor chimici de la caz la caz.

Degradarea biologică are drept cauză interacțiunea dintre masa biologică conținută de mediul poros și specia de poluant, constând tot într-o reducere de poluant din apa subterană. Procesul este specific apelor freatice și se reduce odată cu adâncimea apelor subterane.

Degradarea radioactivă se datorează activității radioactive a apelor subterane care traversează zone de această natură în prezența poluantului.

Procesele de degradare afectează atât poluantul conținut de apa subterană cât și poluantul absorbit de scheletul solid.

Cantitatea de poluant pierdută prin degradare se definește printr-o rată (viteză) de degradare (σ_d) și se evaluează printr-o relație empirică de forma:

$$\sigma_d = -\lambda [Cm_e + (1-m_e)\rho_s C_a] \quad (103)$$

unde:

σ_d – rată de degradare

λ -coeficient de degradare

Rata de degradare exprimă cantitatea de poluant pierdută printr-un anumit proces de degradare (chimic, biologic, radioactiv) în unitatea de timp și poate fi exprimată ca unități de măsură în $\langle \text{mg}/\text{m}^3\text{s} \rangle$.

Folosind expresia coeficientului de întârziere R dată de relația (), relația () devine:

$$\sigma_d = -\lambda C m_e R \quad (104)$$

4.2. Ecuații caracteristice. Metode de obținere

Introducerea conceptului de mediu continuu pentru mediu poros permite utilizarea considerentelor matematice prezentate în capitolul 3 (*derivata materială, teorema*

transportului) în vederea obținerii ecuațiilor de transport pentru o specie de poluant în apele subterane.

Acest lucru este posibil prin identificarea funcției oarecare de punct $\varnothing = \varnothing(P)$, prin masa speciei de poluant în apa subterană, respectiv absorbită de scheletul solid.

Cea mai utilizată metodă acceptată unanim este metoda bilanțului masei de poluant într-un volum elementar de control.

În acest scop se vor revedea următoarele **elemente specifice procesului de transport**:

- Fluxuri de transport, definite anterior :

- fluxul convectiv

$$\bar{q}_C = m_e C \bar{V}_a \quad (105)$$

- fluxul difuziv

$$\bar{q}_D = -m_e D_{mp} \nabla C \quad (106)$$

- fluxul dispersiv

$$\bar{q}_{Ds} = -m_e \bar{D}_{Ds} \nabla C \quad (107)$$

care se pot grupa într-un flux total de transport de poluant :

$$\bar{q}_t = \bar{q}_C + \bar{q}_D + \bar{q}_{Ds} \quad (108)$$

- Masa de poluant prezentă în acvifer (în apă și absorbită în scheletul solid) :

$$m_p = C m_e + (1 - m_e) \rho_s C_a \quad (109)$$

sau:

$$m_p = C m_e R \quad (110)$$

- Rata (viteza) de degradare :

$$\sigma_d = -\lambda C m_e R \quad (111)$$

- Surse de poluare, diferențiate după modul de injecție :

- injecție continuă de poluant considerată printr-o suprafață dată A, ce constituie frontiera unui volum elementar V, având normala exterioară \bar{n} :

$$\sigma_{ic} = \int_{A_t} \bar{n} \cdot \bar{q}_i C_i dS \quad (112)$$

unde:

σ_{ic} - rata de injecție continuă

\bar{q}_i - fluxul de poluant injectat continuu la sursă

C_i - concentrația de poluant

- injecție instantanee de poluant dintr-o sursă punctuală concentrată într-un volum elementar V :

$$\sigma_{ic} = \int_{V_i} m_i dV \quad (113)$$

unde m_i reprezintă masa de poluant injectată.

Reprezentarea grafică a surselor de poluare (continuă, instantanee) într-un sistem de coordonate timp/concentrație este redată în figurile din anexă.

În vederea obținerii *ecuației de transport* se aplică principiul conservării masei de poluant conținut într-un volum de mediu poros care la un moment dat ocupă volumul V_t , având frontiera A_t :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_p dV = \int_{A_t} \bar{n} \cdot \bar{q}_i C_i dS + \int_{V_t} (m_i + \sigma_d) dV \quad (114)$$

Pentru primul termen al relației (114) se poate aplica teorema transportului (relatia 33) :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} m_p dV = \int_{V_t} \frac{\partial m_p}{\partial t} dV + \int_{A_t} \bar{n} \cdot \bar{q}_i dS \quad (115)$$

Combinând ecuațiile (114) și (115) se obține :

$$\int_{V_t} \frac{\partial m_p}{\partial t} dV + \int_{A_t} \bar{n} \cdot \bar{q}_i dS = \int_{A_t} \bar{n} \cdot \bar{q}_i C_i dS + \int_{V_t} (m_i + \sigma_d) dV \quad (116)$$

Folosind transformarea Gauss, pentru o integrală de suprafață, se obține :

$$\int_{V_t} \left[\frac{\partial m_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{q}_i - \bar{q}_i C_i) - m_i - \sigma_d \right] dV = 0 \quad (117)$$

Forma locală a ecuației transportului poluanților se obține din (117) prin lema integralei nule, reorganizând termenii, vom avea :

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q}_t - \sigma_d = \begin{cases} m_i \\ \nabla \cdot \vec{q}_i C_i \\ 0 \end{cases} \quad (118)$$

Tot o formă locală, a ecuației de transport, dar dezvoltată se obține din ecuația anterioară (118), explicitând masa de poluant m_p , respectiv fluxul total de transport \vec{q}_t ,

$$\frac{\partial}{\partial t}(Rm_e C) + \nabla \cdot (\vec{V}_a m_e C - m_e \vec{D} \cdot \nabla C) - \lambda C m_e R = \begin{cases} m_i \\ \nabla \cdot \vec{q}_i C_i \\ 0 \end{cases} \quad (119)$$

unde cu \vec{D} s-a notat tensorul coeficient de difuzie/dispersie într-o formă combinată:

$$\vec{D} = D_{mp} \vec{I} + \vec{D}_{Ds} \quad (120)$$

Forme particulare ale ecuației de transport :

Formele particulare ale ecuației de transport a poluanților în apele subterane se obțin prin :

- 1) procedee de simplificare/mediere a caracteristicilor mediului poros (omogenitate) ;
- 2) a neglijării proceselor de transport care au un aport redus sau chiar nesemnificativ, pentru fenomenul general de transport ;
- 3) reducerea numărului de coordonate spațiale.

Astfel, pentru mediul poros considerat omogen ($m_e = \text{const.}$), adsorbția liniară izotermă, dată de relația (99) ecuația transportului poluanților devine :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{R} \nabla \cdot (\vec{V}_a C - \vec{D} \cdot \nabla C) - \lambda C = \begin{cases} \frac{m_i}{m_e R} \\ \frac{1}{m_e R} \nabla \cdot \vec{q}_i C_i \\ 0 \end{cases} \quad (121)$$

respectiv prin anularea termenului drept:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{R} \nabla \cdot \left(\vec{V}_a C - \vec{D} \cdot \nabla C \right) - \lambda C = 0 \quad (122)$$

În cazul adsorbției neliniare, coeficientul de întârziere rămâne în integrala parțială temporală obținând astfel ecuația transportului poluanților în **formă globală**:

$$\int_{V_t} \frac{\partial}{\partial t} (R m_e C) dV + \int_{A_t} \vec{n} \cdot \left(\vec{V}_a m_e C - m_e \vec{D} \cdot \nabla C \right) dS - \int_{V_t} \lambda C m_e R dV = \int_{A_t} \vec{n} \cdot \vec{q}_i C_i dS + \int_{V_t} m_i dV \quad (123)$$

Observații :

Particularizări mai mari ale ecuației de transport în formă locală (118), (119) sau (121) pot fi obținute prin reducerea numărului de dimensiuni (3D→2D→1D) cazuri în care componentele vitezei de curgere, ale tensorului coeficient de difuziune/dispersie (\vec{D}), se reduc, iar ecuația (119) sau (121) se reduce și ea în consecință.

Ecuația de transport în formă adimensională

Forma adimensională a ecuației de transport (121), poate fi obținută folosind mărimi adimensionale ca și componente ale ecuației, obținute la rândul lor prin raportarea parametrilor de transport la mărimi fizice de referință ale procesului de transport și ale mediului poros.

Astfel, pe baza mărimilor de referință introduse formal mai jos

C_0 -concentrația la sursă,

λ_0 -coeficient de degradare de referință,

T_0 -timp de studiu de referință,

V_0 -viteză de referință în mișcarea apei subterane

D_0 -coeficient de difuziune/ dispersie de referință

se pot obține mărimile fizice/ parametrii de transport în formă adimensională, având aceeași semnificație fizico-chimică pentru procesele de transport ca și cele prezentate în capitolul 3.

$$\begin{aligned}
 C^* &= \frac{C}{C_0} \\
 t^* &= \frac{t}{T_0} \\
 \vec{v}_a^* &= \frac{\vec{V}_a}{V_0} \\
 \vec{D}^* &= \frac{\vec{D}}{D_0} \\
 \lambda^* &= \frac{\lambda}{\lambda_0}
 \end{aligned} \tag{124}$$

Cu aceste noi mărimi/parametri de transport, dar în formă adimensională, ecuația de transport (122) devine :

$$N_e \frac{\partial C^*}{\partial t^*} + Pe \nabla^* \cdot (\vec{V}_a^* C^*) - \nabla^* \cdot (\vec{D}^* \cdot \nabla^* C^*) - Ze \lambda^* C^* = 0 \tag{125}$$

ecuație care conține suplimentar trei produse/mărimi adimensionale noi, introduse și definite după cum urmează:

- Ne - numărul lui Neumann :

$$Ne = \frac{L_0^2}{D_0 T_0} \tag{126}$$

- Pe - numărul lui Peclet

$$Pe = \frac{V_0 L_0}{D_0} \tag{127}$$

- Ze - numărul lui Zerfall

$$Ze = \frac{\lambda_0 L_0^2}{D_0} \tag{128}$$

Cele trei numere, Neumann, Peclet și Zerfall definite de ecuațiile (126), (127), (128) dau o imagine preliminară a naturii procesului de transport în apele subterane. În funcție de valoarea acestora se poate concluziona că procesul de transport pentru un anumit

caz dat este irelevant (poluarea este nesemnificativă) sau relevant respectiv din procese de transport (*convecție, difuziune, dispersie, degradare*) au un aport mic/mare.

4.3. Metode de rezolvare a ecuației de transport

Pe baza ecuației transportului poluanților în apele subterane, a condițiilor la limită și initiale pentru funcția concentrație $C=C(x,t)$ și a considerentelor prezentate în paragraful precedent, metodele de rezolvare a acestei ecuații, sunt prezentate în schema principală dată de figura 17.

În esență, metodele de rezolvare a ecuației de transport se împart în două mari categorii : metode analitice și metode numerice.

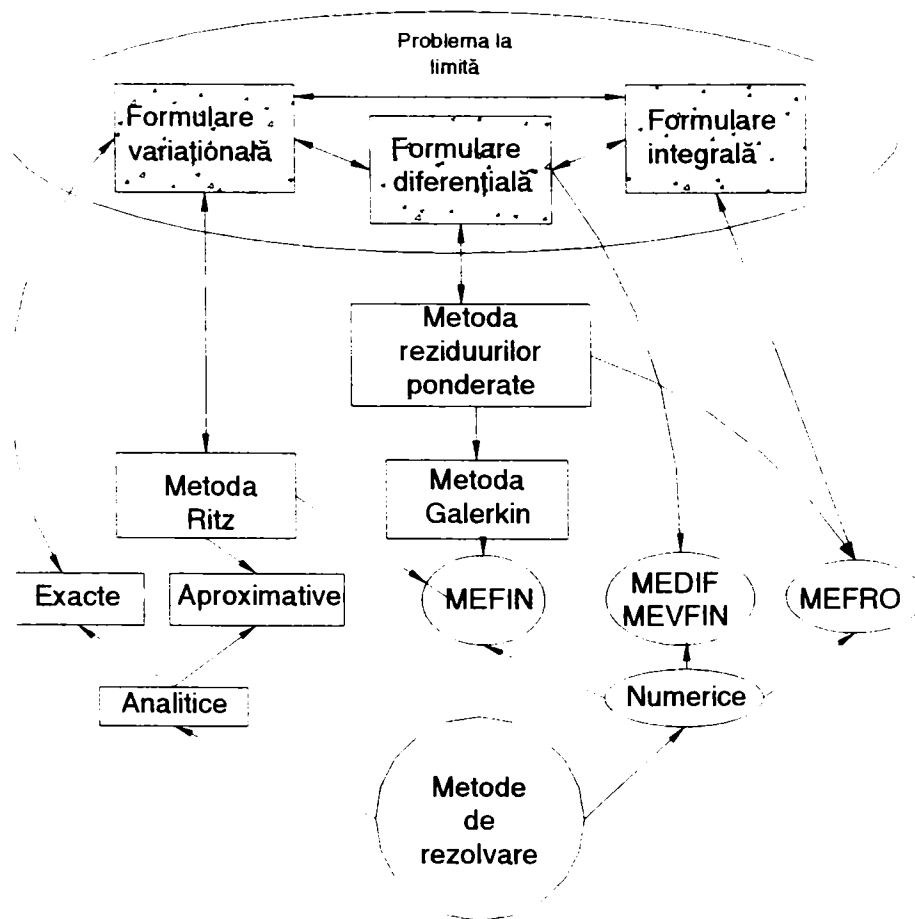


Figura 17. Metode de rezolvare a ecuației de transport

4.3.1 Metode analitice

Metodele analitice de rezolvare a ecuației de transport a poluanților în apele subterane sunt cu atât mai complexe cu cât numărul parametrilor de transport/procese considerate respectiv numărul dimensiunilor spațiale cresc.

Utilitatea metodelor analitice constă în primul rând în efortul mic de calcul, rapiditatea obținerii soluțiilor. Pe de altă parte soluțiile analitice oferă ordinul de mărime al funcției căutate, respectiv al concentrației și pe această cale a intensității fenomenului de poluare.

Limitările acestor soluții analitice sunt date de numărul de dimensiuni spațiale, tipul câmpului vectorial al vitezelor respectiv variabilitatea parametrilor considerați pentru un caz concret de modelare/ simulare.

Trebuie avut în vedere că în practică acviferele sunt *neomogene* și *anizotrope*, dispersia este o mărime variabilă, motiv pentru care din punct de vedere matematic este exprimată printr-un tensor iar câmpul vectorial al vitezelor are cea mai mare variabilitate în spațiu și timp. Din acest motiv se apelează la tehnici de mediere și simplificare, până la urmă o tehnică destul de uzuală în tehnică.

Forma matematică a soluțiilor va depinde deci de următorii parametri :

- câmpul de viteze;
- procesele de transport considerate (convecție, difuzie-dispersie, absorbție, degradare);
- tipul acviferului (infini, semiinfini) exprimat prin condițiile la limită;
- tipul injectiei de poluant (continuă, instantanee, mixtă) exprimat prin condițiile inițiale;
- numărul de dimensiuni spațiale considerate și implicit tipul tensorului dispersie;

În funcție de acești parametri se vor prezenta în continuare câteva soluții uzuale cunoscute în literatura de specialitate .

Soluția 1

Caracteristici/parametri :

- acvifer 1D, infinit

$$C = C(x, t); x \in (-\infty, +\infty) \quad (129)$$

- transport convectiv, dispersiv/difuziv, degradare, absorbție
- injecție instantanee, sursa liniară de masă M_0 [ML^{-1}]
- câmp de viteze unidimensional, V_a

Ecuția de bază :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_a}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \lambda C = 0 \quad (130)$$

Condiții inițiale :

$$C(x, t = 0) = \frac{M_0}{mnR} \delta(x - 0) \quad (131)$$

Condiții la limită :

$$C(\pm \infty, t) = 0 \quad (132)$$

Soluția analitică, în acest caz este dată de relația:

$$C(x, t) = \frac{M_0}{2mnR\sqrt{\pi Dt/R}} e^{\left\{ -\frac{(x-V_a t/R)^2}{4Dt/R} - \lambda t \right\}} \quad (133)$$

cu:

$$C_{\max} = \frac{M_0}{mnR} \quad (134)$$

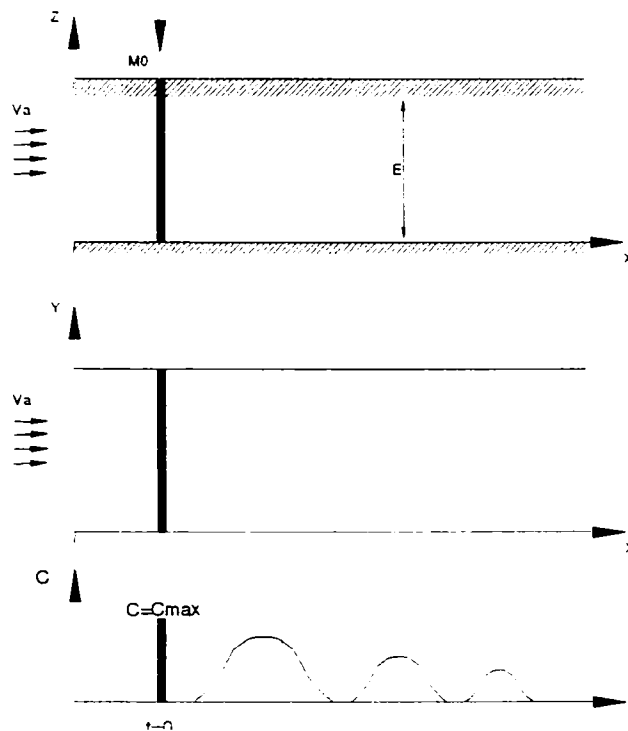
unde:

- M_0 - masa de injecție de poluant la sursă
- $\delta(x - 0)$ funcția delta a lui Dirac
- m - grosimea acviferului
- D - coeficient exprimând efectul combinat dispersie/difuzie
- C_{\max} concentrația maximă inițială la sursă.

cu respectarea condiției:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} mnRC(x, t) dx = M_0 e^{-\lambda t} \quad (135)$$

Reprezentarea grafică, a acestei soluții analitice, este prezentată în figura următoare:



Figură 18.Reprezentarea grafica in soluția 1

Soluția 2

Caracteristici/parametri:

- acvifer 2D, infinit :

$$C = C(x, y, t) ; x, y \in (-\infty, +\infty) \quad (136)$$

- câmp de viteze unidimensional, V_a ;
- transport convectiv, dispersiv / difuziv 2D, degradare, absorbție:
- injecție instantanee, sursa punctiformă de masă M_0 .

Ecuția de bază

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_a}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{R} \left(D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \lambda C = 0 \quad (137)$$

Condiții inițiale :

$$C(x, y, t = 0) = \frac{M_0}{mnR} \delta(x - 0, y - 0) \quad (138)$$

Condiții la limită :

$$C(r \rightarrow \pm\infty, t) = 0 \quad (139)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Soluția analitică, în acest caz, este dată de relația

$$C(x, y, t) = \frac{M_0}{mnV_d t \sqrt{a_L a_T}} e^{\left(-\frac{(x-V_d t/R)^2}{4a_L a_T V_d t/R} - \frac{y^2}{4a_T V_d t/R} - \lambda t \right)} \quad (140)$$

unde mărimile fizice conținute, au fost deja prezentate anterior.

Concentrația maximă, în acest caz este dată de aceeași relație (134):

$$C_{\max} = \frac{M_0}{mnR}$$

Reprezentarea grafică, a acestei soluții analitice, este prezentată în figura următoare :

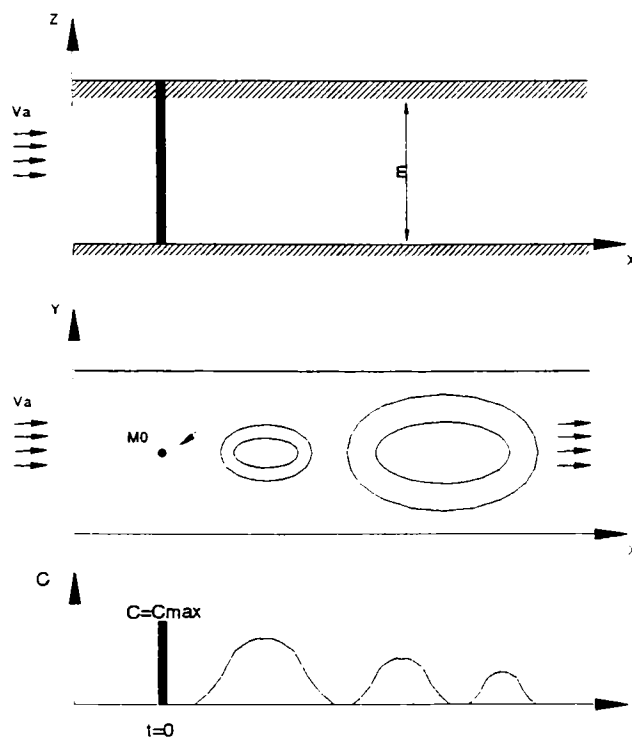


Figura 19. Reprezentarea grafica in soluția 2

Soluția 3

Caracteristici/parametri:

- acvifer 1D, semiinfiniț :

$$C = C(x, t); x \in [0, +\infty) \quad (141)$$

- transport convectiv, dispersiv / difuziv 1D, degradare, absorbție;
- injecție continuă, sursa liniară de masă M_0 [ML^{-1}];
- câmp de viteze unidimensional, V_a .

Ecuatia de bază:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_a}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \lambda C = 0 \quad (142)$$

Condiții initiale :

$$C(x, t = 0) = 0 \quad (143)$$

Condiții la limită :

$$C(x = 0, t) = C_0 \quad (144)$$

$$C(+\infty, t) = 0, t > 0$$

Soluția analitică, în acest caz, este dată de relația:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[e^{\frac{x-\alpha}{2a_L}} \operatorname{erfc}1(x) + e^{\frac{x+\alpha}{2a_L}} \operatorname{erfc}2(x) \right] \quad (145)$$

unde:

$$\operatorname{erfc}1(x) = \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \frac{\alpha V_a t}{R}}{\sqrt{\frac{4a_L V_a t}{R}}} \right) \quad (146)$$

$$\operatorname{erfc}2(x) = \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \frac{\alpha V_a t}{R}}{\sqrt{\frac{4a_L V_a t}{R}}} \right) \quad (147)$$

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{4\lambda R a_L}{V_a}} \quad (148)$$

$$C_{\max} = \frac{M_0}{mn\alpha V_a} \quad (149)$$

iar $\operatorname{erfc}(x)$ reprezintă funcția complementară a erorii, definită prin :

$$\operatorname{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi \quad (150)$$

Soluția 4

Caracteristici/parametri :

- acvifer 2D, semiinfinit

$$C = C(x, y, t); x, y \in [0, +\infty) \quad (151)$$

- transport convectiv, dispersiv/difuziv 2D, degradare, absorbție;
- injecție continuă, sursa punctiformă de masă M_0 [M];
- câmp de viteze unidimensional, V_a

Ecuatia de bază :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_a}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{R} \left(D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - \lambda C = 0 \quad (152)$$

Condiții inițiale :

$$C(r, t = 0) = 0; r > 0 \quad (153)$$

Condiții la limită :

$$C(x = 0, y = 0, t) = C_0$$

$$C(r \rightarrow +\infty, t) = 0, t > 0$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$C_0 = \frac{M_0}{mnV_a} \quad (154)$$

Soluția analitică, în acest caz, este dată de relația :

$$C(x, y, t) = \frac{M_0}{4mnV_a \sqrt{\pi a_T} r^*} e^{-\frac{x-\gamma r^*}{2a_L}} \operatorname{erfc} \frac{r^* - \gamma \frac{V_a t}{R}}{2\sqrt{a_L \frac{V_a t}{R}}} \quad (155)$$

$$r^* = \sqrt{x^2 + \frac{a_L}{a_T} y^2} \quad (156)$$

$$\gamma = \sqrt{1 + 4a_L \lambda \frac{R}{V_a}} \quad (157)$$

Reprezentarea grafică, a acestei soluții analitice este prezentată în figura următoare :

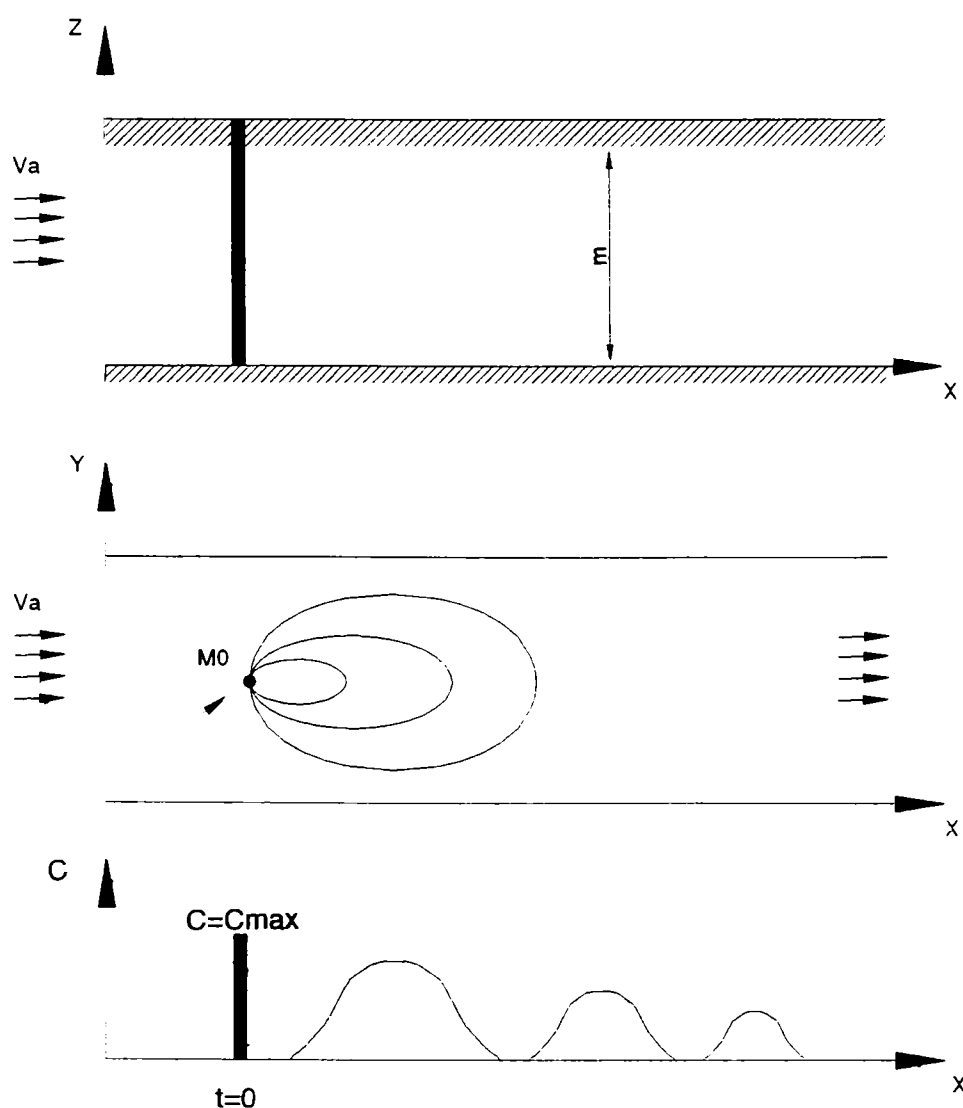


Figura 20. Reprezentarea grafică în soluția 4

4.3.2. Metode numerice de rezolvare a ecuației de transport

Metodele numerice de rezolvare a ecuației de transport a poluanților în acvifere reprezintă o alternativă de calcul a *metodelor analitice* și chiar una reușită.

Dezvoltarea impetuoasă a sistemelor de calcul (*software hardware*) din ultimii ani a făcut ca și acest domeniu fizico-matematic, eventual de ingineria mediului, altfel spus, să se racordeze la acest progres.

Avantajele metodelor numerice rezultă din următoarele elemente remarcabile:

- preprocesare interactivă și ușoară pentru datele de intrare;
- aplicabilitate la domenii spațiale și temporale dintre cele mai diverse ca și formă și dimensiuni inaccesibile metodelor analitice;
- aplicabilitate la medii neomogene, prin prisma parametrilor de mișcare și transport;
- simulări/resimulări cuplate temporar deosebit de utile în luarea unor decizii la nivel micro sau macro regional care incumbă domenii de definiții complementare.

Limitările/ dificultățile, deși nu majore ale metodelor numerice pot fi rezumate la :

- posibilitatea apariției erorilor în rezultatele finale ca urmare a necorelării datelor de intrare cu finețea rezultatelor cerute, ceea ce reprezintă o „catastrofă” numerică;
- necesitatea unei anumite abilități a utilizatorului de soft/metodă, în preprocesarea și postprocesarea datelor;
- necesitatea lucrului în echipă (*informaticieni, hidraulicieni, chimiști, etc.*) pentru o postprocesare și simulare adecvată, aceasta din dorința de evitare a unei specializări înguste, exclusiviste, și nu în ultimul rând;
- prețul ridicat de achiziționare / reactualizare pentru utilizatori a unui soft în acest domeniu.

În esență, **metodele numerice**, se deosebesc între ele prin tipul de formulare a problemei la limită, în cazul de față ecuația **transportului poluanților** în apele de suprafață și anume: formularea diferențială, variațională, respectiv, integrală. În funcție de aceste trei formulări se deosebesc metodele numerice: metoda diferențelor finite

MEDIF (prin extindere metoda volumelor finite: **MEVFIN**), metoda elementelor finite **MEFIN** și respectiv metoda elementelor de frontieră **MEFRO**.

Important este faptul că prin folosirea oricărei metode numerice amintite anterior, rezultatul obținut trebuie să coincidă, ceea ce este asigurat de condiția ca formulările să fie echivalente, din punct de vedere matematic.

Reprezentarea grafică a modului de formulare a problemelor la limită și a metodelor numerice aferente este prezentată în figura 17.

În ultima perioadă literatura de specialitate abundă în prezentarea de combinații între diverse metode analitice, statistice și cele numerice, în vederea cuplării lor pentru o mai bună reprezentare/încadrare a diverselor procese de transport.

În cazul de față, pentru cazul problemei la limită, dată de ecuația de transport a poluanților în apele subterane, se va prezenta **metoda diferențelor finite**, o metodă numerică de bază, sigură și în același timp perfectibilă.

În vederea prezentării metodei se vor urma **etapele de mai jos**:

- ❖ Ecuatia de bază din formularea diferențială și condițiile la limită pentru un caz particular de mișcare și transport definit prin:
 - transport convectiv, dispersiv/difuziv 1D, degradare, adsorbție;
 - injecție continuă, sursa liniară de masă M_0 [ML^{-1}];
 - câmp de viteze unidimensional, V_a

Ecuatia de bază :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_a}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \lambda C = 0 \quad (158)$$

$$C = C(x, t): [D_L] \times [D_T] \rightarrow \mathfrak{R} \quad (159)$$

$$\left. \begin{array}{l} D_L = [0, L] \quad (\text{domeniu spațial}) \\ D_T = [0, T] \quad (\text{domeniu temporal}) \end{array} \right\}$$

Condiții inițiale :

$$C(x, t = 0) = 0 \quad (160)$$

Condiții la limită :

$$\left. \begin{aligned} C(x=0, t) &= C_0 \\ C(L, t) &= 0, t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (161)$$

❖ Conceptul metodei

În **metoda diferenței finite**, conceptul de bază, este prezentat de schema următoare:

$$\text{Diferential} = \text{Diferente finite} + \text{Rest}$$

cu respectarea condiției:

$$\lim_{\text{Rest} \rightarrow 0} \text{Diferential} = \text{Diferente finite}$$

❖ Discretizarea domeniului de definiție al funcției căutate $C(x;t)$

$$\left. \begin{aligned} C &= C(x, t): [D_L] \times [D_T] \rightarrow \mathfrak{R} \\ D_L &= [0, L] \quad D_T = [0, T] \end{aligned} \right\} \quad (162)$$

folosind sistemul de noduri spațiale format din $i-1, i, i+1$, noduri, egal depărtate prin pasul de discretizare spațial δx , respectiv sistemul de noduri temporale $k-1, k, k+1$, egal depărtate prin pasul de discretizare temporal δt ; discretizare prezentată în figura 21:

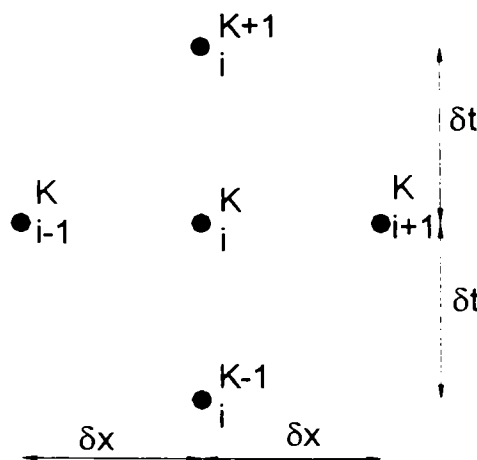


Figura 21. Schema nodurilor de discretizare 1D

- ❖ Obținerea derivatelor parțiale de ordinul I : spațiale și temporale, precum și derivata parțială de ordinul II, spațială. Derivatele parțiale se obțin din **dezvoltarea în serie Taylor a funcției concentrație**, în vecinătățile punctului de acumulare $C(x;t)$, reprezentat schematic în figura 20 prin nodul având indicii i, k .

În funcție de poziția vecinătății considerate, există schema “înainte”, „înapoi” sau “centrală”, după nodurile considerate în dezvoltare.

Astfel, pentru derivata parțială spațială de ordinul I, se prezintă schema „înainte” :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_{i+1}^k - C_i^k}{\delta x} \quad (163)$$

iar pentru derivata parțială temporală de ordin I se prezintă schemele “înainte” și „înapoi”, date de ecuațiile :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{k+1} - C_i^k}{\delta t} \quad (164)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^k - C_i^{k-1}}{\delta t} \quad (165)$$

Pentru derivata parțială de ordinul II, se prezintă schema “centrală”

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{C_{i-1}^k - 2C_i^k + C_{i+1}^k}{\delta x^2} \quad (166)$$

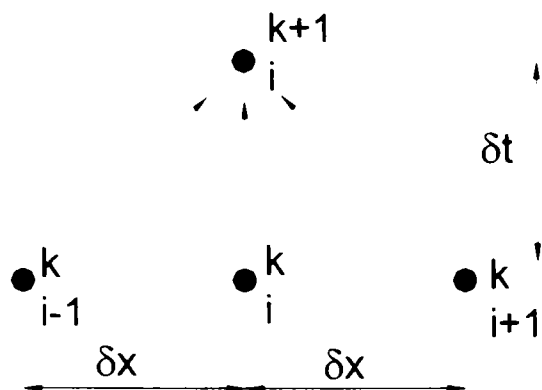
❖ Înlocuirea expresiilor derivatelor parțiale în ecuația de bază și obținerea ecuațiilor în diferențe finite.

Și în acest caz, există mai multe variante de folosire a expresiilor derivatelor parțiale. Astfel, prin folosirea expresiilor date de relațiile (163), (165), (166) se obține așa numita “schemă explicită”, cu diferențe finite, în cazul unidimensional, prezentată în figura 22 și dată de expresia (167), folosind complexe adimensionale prezentate anterior:

$$C_i^{k+1} = C_i^k + \frac{D_L \delta t}{R \delta x^2} \{ C_{i-1}^k - (2 - Pe + Ze) C_i^k + (1 - Pe) C_{i+1}^k \} \quad (167)$$

$$Pe = \frac{V_a \delta x}{D_L} \quad (168)$$

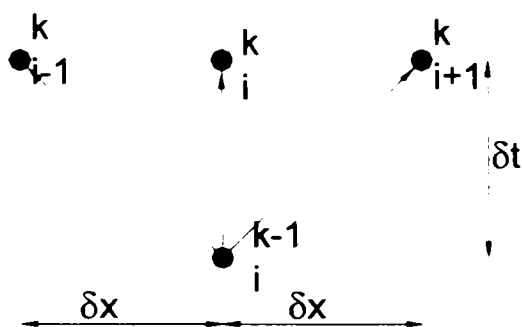
$$Ze = \frac{\lambda \delta x^2}{D_L} \quad (169)$$


Figura 22. Schema explicită cu diferențe finite

Relația schemei explicite arată că, concentrația la un moment dat, într-un nod central se obține din valorile concentrației la un moment anterior, din trei noduri adiacente.

De asemenea prin folosirea expresiilor date de relațiile 164, 165 și 166 se obține așa numita schemă “implicită” cu diferențe finite, în cazul unidimensional prezentată în figura 23 și dată de expresia (170), date mai jos:

$$C_i^k = C_i^{k-1} + \frac{D_L \delta t}{R \delta x^2} \{ C_{i-1}^k - (2 - Pe + Ze) C_i^k + (1 - Pe) C_{i+1}^k \} \quad (170)$$


Figura 23. Schema implicită cu diferențe finite

4.4. Softuri specializate în modelarea curgerii și transportului poluanților în acvifere

În ultimii ani, sistemele de calcul atât în materie de echipament (hardware) cât și ca programe (software) au cunoscut o dezvoltare deosebită, fiind unul din motoarele progresului societății umane. Produsele de la nivelul anului 2005 nici nu puteau fi bănuite la nivelul anilor 1970. Această dezvoltare deosebită a făcut *ca tehnica de calcul să pătrundă în toate domeniile vieții sociale*, inclusiv în **modelarea curgerii și transportului poluanților în acvifere** și nu numai.

Având la bază metodele numerice, limbajele de programare și progresul înregistrat de interfețele grafice au fost create programe performante care modelează numeric curgerea și transportul poluanților în acvifere, iar aceste programe se perfecționează continuu. Echipele mixte de cercetare din centre de cercetare, universități, companii mai mari sau mai mici sunt echipe complexe alcătuite din ingineri hidraulicieni, hidrogeologi, chimiști, biologi, matematicieni, informaticieni. Rezultatul finit al muncii acestor echipe sunt programe complexe, adevărate “uzine de calcul”, conținând module de preprocesare ușoară, rulare, calibrări și postprocesare.

În vederea folosirii lor cu succes aceste programe trebuie stăpânite, cunoscute în vederea utilizării lor corecte și interpretării corespunzătoare a rezultatelor obținute.

În tabelul nr 3 (**vezi anexa**) se prezintă o sinteză a softurilor specializate în modelarea, calibrarea, interpretarea rezultatelor în domeniul curgerii și transportului poluanților în apele subterane cu informații elementare asupra obiectului lor de activitate, a performanțelor, respectiv autori.

Unul din aceste programe, ASMWIN va fi prezentat în continuare precizând :

- 1) modelele componente;
- 2) modul de creare a modelelor,
- 3) datele de intrare și interpretarea rezultatelor.

S-a ales acest soft specializat și performant, deoarece a fost folosit în **modelarea numerică** aferentă studiului de caz care face obiectul conținutului capitolului 6.

4.4.1. Prezentarea programului ASMWIN (Aquifer Simulation Model for Windows)

4.4.1.1. Generalități, module componente

ASMWIN (Aquifer Simulation Model for Windows) [84] este un model complet bidimensional pentru curgerea și transportul poluanților în apele subterane. Prima versiune a programului a apărut în 1989, rulând sub sistemul de operare MS-DOS. Față de versiunea ASM 5.0 (1995 , sub MS DOS) ASM Windows vine cu îmbunătățiri semnificative, constând într-o :

- 1) interfață grafică profesională;
- 2) model de curgere în diferite finite;
- 3) calibrare automată;
- 4) model de transport, folosind atât metoda drumului aleator cât;
- 5) metoda diferențelor finite și nu în ultimul rând facilități de pre- și postprocesare.

Reteaua de discretizare spațială este mărită la un număr de 150x150 celule iar pentru regimul nepermanent de curgere se admit până la 1000 de intervale de timp. Postprocesarea asigură salvarea rezultatelor rulărilor în formate grafice variate cum ar fi : SUFER , DXF , HPGL sau BMP .

Modulele componente ale programului :

ASM WIN este organizat pe module funcționale. Ele sunt apelate automat de programul principal în funcție de faza de modelare. Acestea sunt următoarele :

- **modulul ASMSIM 1** rezolvă sistemul de ecuații liniare aferente curgerii folosind metoda gradientilor conjugati sau metoda iterativă Cholesky ;
- **modulul ASM OPTI** realizează o procedură de calibrare a modelului în regimul permanent și uniform;
- **modulul ASMPATH** oferă mai multe metode de interpolare urmate de integrarea Euler, pentru calculul direcțiilor de curgere și a timpilor de transport. În modulul

de curgere regim permanent și nepermanent sunt folosite deopotrivă variantele „înainte” și „înapoi” ale căror rezultate sunt preluate de modulul ASMPATH pentru vizualizarea direcțiilor de curgere, liniilor de curent, linii de același potențial hidraulic și vectori viteză.

- **modulele ASMT2SIM și ASMWALK** au ca obiect **simularea transportului poluanților**. Primul ASMT2SIM folosește metoda diferențelor finite iar al doilea ASMWALK folosește metoda drumului aleator.

În cadrul facilităților de postprocesare se disting următoarele module :

- modulul de extragere a rezultatelor (Result Extractor) preia rezultatele în urma rulării *modulelor de curgere și transport pentru vizualizare*, salvare în format ASCII/SURFER ori export într-un program tip tabelă economică (Spreadsheet) Rezultatele constau în înălțimi piezometrice, denivelări, viteze, schimb de volume de apă între zone de interes, și concentrații.
- modulul de calcul al bilanțului de apă (Water Budget Calculator) oferă rezultate ale bilanțului de apă între zone specificate de utilizator și ale modificării parametrilor hidraulici în cadrul schimbului,
- modulul de generare a rețelei (Field Generator) este un instrument puternic de preprocesare grafică a datelor de intrare, fiind util în modelări pe domenii neomogene;
- modulul de vizualizare grafică a rezultatelor (Graph Viewer) este un instrument de postprocesare a rezultatelor privind înălțimile piezometrice , de nivelări sau concentrații.

4.4.1.2. Realizarea modelelor, date de intrare, rezultate

ASMWIN este un soft pentru modelarea numerică a curgerii și transportului poluanților în apele subterane. În esență programul crează două modele :

- un model de curgere;
- un model de transport.

Modelul de curgere, pe baza datelor de intrare de domeniu și a condițiilor la limită obține ca și rezultate înălțimile piezometrice și implicit câmpul de viteze. Acest

câmp de viteze este folosit de modelul de transport alături desigur de parametrii de timp și transport. Legătura schematică între cele două modele este prezentată schematic în figura următoare :

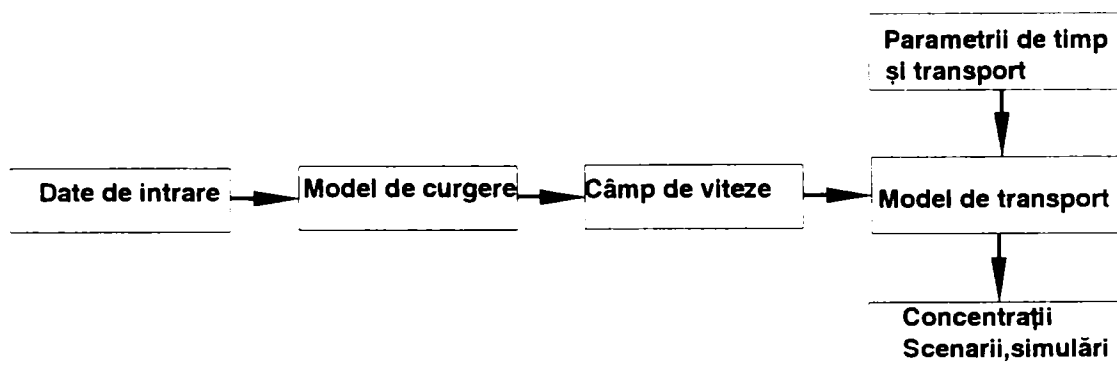


Figura 24 Legătura model de curgere-model de transport

Modelul de curgere

Pentru crearea unui model de curgere, folosind ASMWIN este necesară introducerea datelor de intrare după o tehnică secvențială. Pașii secvențiali vor fi prezentați în continuare, precizând și elementele de meniu ale programului, acestea fiind prezente în program în limba engleză.

- ❖ crearea fișierului de bază (extensie **.asm**) cu nume precizat de utilizator, într-un director creat în prealabil. În acest director vor fi stocate toate fișierele aferente modelului propus spre realizare Acest lucru se face cu meniul File→New Model→Folders→Drivers→ File name→Save file as type;
- ❖ încadrarea domeniului de curgere într-un domeniu spațial (de fapt plan) dreptunghiular cu lungimea L (după orizontală) și lățimea l (după verticală). Numărul de celule după direcțiile verticală și orizontală rezultă prin dividerea lungimii și lățimii în dimensiunile elementare ale unei celule a și b, folosind Grid→Mesh Size;
- ❖ precizarea tipului de acvifer (sub presiune /cu nivel liber) folosind meniul Grid→Aquifer Type→Confined/Unconfined precum și factorului de anizotropie;
- ❖ precizarea condițiilor la limita domeniului prin specificarea unui cod aferent nivelelor constante (-1), nivelelor necunoscute ce urmează a fi determinate (1) sau a celulelor

care nu fac parte din domeniu, fără curgere. Acest lucru se face cu opțiunile Grid→Flow Model → Boundary Conditions→ Cell values. Programul permite editarea facilă a datelor prin multiplicarea codurilor în celule alăturate prin opțiunea Duplication on/off;

- ❖ precizarea grosimii acviferului prin indicarea unei cote superioare a acviferului și a unei cote inferioare, urmând ca prin diferența acestora să rezulte grosimea (Grid →Aquifer Top→Aquifer Bottom);
- ❖ precizarea condițiilor de margine, respectiv în celulele marginale unde codul a fost stabilit ca fiind -1 se introduc valorile nivelelor constante în cote absolute De precizat faptul că pentru acviferele cu nivel liber aceste niveluri trebuie să se încadreze între cele două cote, superioară și inferioară;
- ❖ precizarea caracteristicilor fizice ale acviferului, așa-numitele *date de domeniu* constând în conductivitate/transmisivitate hidraulică și porozitate efectivă. Acestea se stabilesc folosind mediul Parameters→Hydraulic conductivity/Transmissivity→ respectiv Parameters→Effective Porosity;
- ❖ precizarea valorii debitelor pompate/injectate din și în domeniul modelat. Puțurile respective sunt considerate a fi centrate în celule iar valoarea aferentă debitului este însoțită de semnul plus pentru injecție respectiv semnul minus pentru pompare. Aceste precizări se fac cu ajutorul meniului Package→Wells.

Cu precizările de mai sus modelul este pregătit pentru rularea modulului de curgere. Aceasta se face, apelând comanda “Run “ după ce, în prealabil a fost aleasă :

- metoda de rezolvare a sistemului de ecuații rezultat ;
- numărul de iterații ;
- eroarea maximă admisă între două iterații.

Rezultatele rulărilor sunt exploatate (*vizualizare, salvate, interpretate*) cu ajutorul facilităților oferite de modulul auxiliar Result extractor. Pentru vizualizarea liniilor reprezentând nivelele piezometrice se va opta pentru varianta de meniu Result extractor →Results Type→Hydraulic Heads→ Stress Period→Tools→Recycle→ Environment→ Save plot. Forma grafică astfel rezultată reprezentând izofreate sau hidroizohipse poate fi salvată în fișiere având extensia DXF, PGL sau BMP, care permit prelucrări grafice suplimentare.

O altă posibilitate de reprezentare grafică a rezultatelor privind înălțimile piezometrice este dată de umplerea intervalelor între două curbe prin opțiunea Tools→ Recycle→ Value→ Search and Modify→ Color spectrum→ Level→ Search Level.

Dacă modelul conține puțuri de exploatare (pompare) se poate determina zona de alimentare a acestuia și reprezentarea sa grafică. Acest lucru se face prin opțiunile Run→ Pathlines→ Set Particles. De menționat faptul că acest lucru este realizat de modulul ASMPATH apelat automat de ASMWIN asupra aceluiași model de curgere, creat inițial. Același modul poate crea pentru puțul sau puțurile considerate zona de protecție sanitară pentru un număr de zile precizat de utilizator. De menționat faptul că în România aceste zone de protecție sanitară sunt reglementate de fără a exista la ora actuală o metodologie specifică de calcul. Este un motiv în plus care face utilă folosirea modelelor numerice pentru asemenea determinări.

Pentru obținerea bilanțului volumelor de apă, între suprafața modelului și exterior, sau între diverse zone ale modelului marcate în prealabil (spre exemplu o zona contaminată determinată și restul modelului), se folosește opțiunea Tools→ Water Budget→ Zones (0-50) →Go.

Modelul de transport

Modelul de transport are la bază modelul de curgere creat și rulat anterior. Modelul, în varianta metodei diferențelor finite este realizat de modulul ASMT2SIM care necesită precizarea parametrilor de timp și transport după care se face rularea propriu-zisă și exploatarea rezultatelor.

Introducerea parametrilor de timp și transport se face prin următoarele secvențe :

- ❖ precizarea condițiilor la limită pentru concentrație. ca și în cazul anterior, se folosesc aceleași coduri ca și a modelului de curgere (1,-1, 0) diferența constând în faptul că ele se referă la concentrație și nu la înălțimi piezometrice. Acest lucru se face urmând meniul Grid →Transport Model→ Boundary Conditions→ Code values (1,-1, 0);

- ❖ precizarea condițiilor inițiale pentru concentrație, folosind opțiunea Parameters → Initial Concentrations → FD Transport;
- ❖ precizarea în cadrul domeniului de curgere a poziției sursei de poluare și a tipului de injecție a acestuia în acvifer (instantanee/continuă) folosind meniul Parameters → Input rate of contaminants → FD Transport. Se menționează că rata de injecție cu valoarea precizată de utilizator (g/s.m^2) se consideră distribuită pe întreaga suprafață a celulei de diferență finită axb (m^2) rezultând o poluare inițială în (g/s);
- ❖ precizarea parametrilor de transport (dispersivitate longitudinală și transversală, coeficientul de difuzie moleculară, factor de întârziere, factorul coeficientul de degradare) și a parametrilor de timp (timpul total de simulare și pașii de timp în care acesta din urmă este divizat). Aceste precizări se fac din meniul Run → Transport → Finite Difference.

Cu precizările de mai sus și parametri menționați anterior, **modelul de transport** se poate rula, urmând a exploata rezultatele obținute.

Exploatarea rezultatelor rulării modelului de transport se poate face prin:

- reprezentarea grafică a izocronelor la terminarea perioadei de simulare folosind meniul Tools → Recycle → Value → Result Extractor → Concentration → Environment → Environment Options;
- reprezentarea grafică a concentrației în timp, înregistrată în puncte caracteristice alese de utilizator numite puțuri de observație (Observation Wells) prin Tools → Concentration → Time (FD) → Graphs.

Observație :

ASMWIN permite rularea modelului de transport și prin metoda drumului aleator (*Random Walk Method*) prin apelarea modulului ASMWALK. Acest modul citește fișierul de bază și necesită la rândul lui parametri de timp și transport. Diferența, la precizarea concentrației inițiale, constă în faptul că masa de injecție de poluant este distribuită pe numărul total de particule folosite în simulare. Se poate opta pentru injecție continuă sau instantanee. După simularea numerică a migrării particulelor în domeniu, se reasociază numărului de particule regăsite în domeniu concentrația corespunzătoare numărului acestora. Și în acest caz, rezultatele obținute în urma simulării pot fi exploatate grafic ca și curbe de egală concentrație sau variația concentrației în timp, în puncte caracteristice, alese de utilizator.

5. Identificarea unor posibile surse de poluare din spațiul județului Bihor cu impact semnificativ asupra apelor subterane

Prezentul capitol prezintă o zonă de interes din spațiul județului Bihor, caracterizarea acesteia din punct de vedere hidrogeologic și hidraulic respectiv identificarea unor posibile surse de poluare în această zonă cu impact asupra apelor subterane. Datele vor servi ca și date de intrare pentru modelarea numerică a curgerii apelor subterane și a transportului poluanților prezentate în capitolul 6.

5.1 Prezentarea hidrogeologică a zonei de interes (conul aluvionar al Crișului Repede)

Zona de interes a prezentului studiu este reprezentată de conul aluvionar al râului Crișul Repede care este cea mai importantă hidrostructură din spațiul județului Bihor. Conul este situat la vest de municipiul Oradea de o parte și de alta a râului Crișul Repede cu extindere în Ungaria. Conul aluvionar este încadrat de alte structuri morfologice care sunt prezentate în continuare (Fig. 25).

Unitățile morfologice prezente în zona vest Oradea pot fi enumerate astfel:

- a) Câmpia înaltă Diosig-Tășnad cu o altitudine de cca 180-200 m lipsită însă de strat freatic. Nu prezintă interes în studiul de față.
- b) Piemontul colinar al Oradiei, puternic fragmentat. Complexul acvifer este situat la adâncimi medii de 70 m, motiv pentru care această structură nu va fi inclusă în zona de interes.
- c) Lunca Barcăului delimitată la nord de valea Ierului iar la sud de Câmpia înaltă Diosig-Tășnad și piemontul colinar al Oradiei. Freaticul este de tip liber în apropierea Barcăului și chiar ascensional în extremități. Amplasată în extremitatea nordică a județului menționarea acestei unități prezintă interes din punctul de vedere al legăturii hidraulice dintre lunca Barcăului și conul aluvionar al Crișului Repede.

- d) Conul aluvionar al Crișului Repede situat aval de Oradea pe ambele maluri ale râului Crișul Repede cu extindere spre vest în Ungaria.
- e) Câmpia joasă de subsidență mărginită la nord de conul aluvionar al Crișului Repede iar la sud de Crișul Alb cu extindere și în acest caz spre vest în Ungaria.

Dintre unitățile morfologice prezentate mai sus interesul a fost captat de conul aluvionar al Crișului Repede. Motivația alegerii acestei hidrostructuri constă în existența datelor hidrogeologice concrete în această zonă și pe această cale în posibilitatea realizării unei modelări numerice veridice. Pe de altă parte în această zonă sunt concentrate posibile surse de poluare a apelor subterane datorită prezenței zonei industriale a Oradiei (Fig. 26).

❖ Prezentarea hidrogeologică a conului aluvionar al râului Crișul Repede

Conul aluvionar al râului Crișul Repede reprezintă din punct de vedere hidrogeologic cea mai importantă hidrostructură din nord-vestul țării. Conul este bine dezvoltat în aval de municipiul Oradea pe ambele maluri ale Crișului Repede cu extindere mare în Ungaria. În direcția vestică, aval Oradea conul poate fi limitat de vestul localității Santăul Mic iar în sud până în dreptul localității Roit.

Forajele executate în această zonă (Fig. 27) arată un con constituit din nisipuri, pietrișuri și bolovănișuri cu intercalații de argilă. Formațiunile pot fi identificate ca și cuaternare în general, alături de formațiuni din pleistocen-holocen de tip terasă și luncă.

Dezvoltarea maximă în adâncime a conului se înregistrează în zona de graniță cu Ungaria, Borș (19-20 m) iar extremitățile nordice și sudice au o grosime redusă cu mult, chiar până la 5 m.

Acviferul prezent în zonă este unul continuu, unitar, exceptând o lentilă de argilă de mică întindere de cca 3.5 m localizată în zona forajului P8.

Patul stratului acvifer este constituit la modul general din argile diversificate :argile marnoase/prăfoase, argile nisipoase gălbui, feruginoase,, cenușii și gălbui.

Tipul acviferului este cu nivel liber alimentat în principal din precipitații, scurgere de pe versanții piemontului Oradiei (în est).

Principalul curs de apă ce traversează acviferul este râul Crișul Repede, respectiv canale de alimentare cu apă pentru piscicultură în zonă, având de importanță hidrogeologică scăzută.

În funcție de nivelele înregistrate în Crișul Repede are loc o alimentare a freaticului la ape mari și medii respectiv o drenare ușoară la nivele scăzute.

Nivelele hidrostatice se situează la adâncimi mici de la (0.85 m F1 Santăul Mic) respectiv 5,52 (P7 PECO).

Fluxul subteran are o direcție generală de curgere de la est spre vest. Gradientii hidraulici se situează între valorile 1.4-3.5 ‰.

Porozitatea efectivă variază între limitele 0,16 – 0,26, o valoare medie pe ansamblul conului aluvionar putând fi considerată 0,22.

Coeficienții de filtrație au fost calculați pe baza datelor obținute de la pompările experimentale efectuate în urma execuției forajelor. Aceștia variază între limite foarte largi (2,5–25 mm/zi).

Climatul zonei de interes poate fi încadrat într-un climat moderat-semiumed caracterizat prin izoterma de 10⁰ C și izohieta de 600 mm cu variații între 55-700 mm. Izohieta de 600 mm prezintă importanță deosebită în cazul de față datorită tipului acviferului (freatic) și alimentarea din precipitații a acestuia cu un procent ce fi stabilit prin procesul de calare al modelului numeric din capitolul 6

Apele de suprafață reprezentative pentru zona de interes cu influență activă semnificativă asupra apelor subterane sunt reprezentate de Crișul Repede. Râul Crișul Repede drenează în mod obișnuit conul aluvionar la nivele mici, însă la nivele medii, eventual mari, Crișul Repede alimentează din punct de vedere hidrogeologic conul aluvionar. De menționat că în zona de interes râul Crișul Repede prezintă două praguri importante : unul aval de Oradea la podul CFR

Oradea Arad și al doilea la Tărian. Aceste praguri influențează alura hidroizohipselor dacă albia este puțin adâncă în zona în cauză.

Alături de Crișul Repede mai poate fi menționat pârâul Peța respectiv canalul de alimentare a zonei piscicole Cefa.

Lucrările hidroameliorative în zona de interes sunt reprezentate de îndiguiri ale cursurilor de apă naturale respectiv canale și de lucrări de desecare drenaj. La nivelul spațiului Bihor din punct de vedere al lucrărilor de desecare drenaj problema este rezolvată doar într-un procent de 50 de procente restul suprafețelor agricole rămânând în continuare sub influența excesului de umiditate. Lucrările de desecare–drenaj sunt localizate în sistemul canal colector mal stâng (45000 ha), mal drept (42000 ha) respectiv în partea de nord a zonei de interes, valea Ierului (27600 ha).

Forajele de urmărire cantitativă și calitativă a regimului apelor freatice sunt bine reprezentat în zonă prin două traverse perpendiculare, diferite din punctul de vedere al adâncimii explorate și al scopului pentru care au fost realizate (Fig. 27, 28).

Prima traversă, reprezentând un grup de foraje de mică adâncime, străbate conul aluvionar al Crișului Repede de la sud la nord și constă din șapte foraje notate convențional F1-F7. Traversa trece la vest de Oradea prin dreptul localității Sîntandrei având o lungime de aproximativ 9.5 km..

În sud, primul foraj F1 este amplasat la nord de localitatea Livada de Bihor iar ultimul în nord F7 este amplasat la nord vest de localitatea Biharea între calea ferată și șoseaua Episcopia Bihor-Santău Mic. Tot în categoria forajelor de adâncime se încadrează alte două foraje amplasate înafara traversei amintite, respectiv F1 Borș și F1 Santău Mic.

A doua traversă de foraje care explorează doar freaticul este amplasată pe o direcție perpendiculară cu prima, respectiv de la est la vest între Oradea și punctul de frontieră Borș constând din 10 foraje notate convențional P1 (Borș) respectiv P10 (pe vatra municipiului Oradea, Stadion FC Bihor).

Din punctul de vedere al regimului cantitativ al apelor freatică și includerea forajelor în rețeaua hidrogeologică națională gruparea acestora a fost făcută în felul următor:

-stația hidrogeologică de ordinul I Oradea, reprezentativă pentru conul aluvionar cuprinzând forajele F4, F5, F6, F7;

-stația hidrogeologică de ordinul II Borș cu forajul F1 Borș;

-stația hidrogeologică de ordinul II Santău Miccu forajul F1 din apropierea localității cu același nume.

Din punctul de vedere al regimului calitativ al apelor freatică din zona de interes reprezentative sunt forajele din freatic cuprinse în așa numită stație de control a poluării, aval de Oradea, pe malul drept al râului Crișul Repede conținând forajele P1, P3, P5, P6, P7, P8, P9. De remarcat faptul că o parte din forajele de mică adâncime sunt asimilate ca și foraje de control a poluării (F4=P11, F5=P12, F6=P13, F7=P14, F1 Santău Mic=P15).

Prezentarea succintă și centralizată a forajelor prezentate mai sus, este dată de tabelul 4.

Aceleași foraje, în sensul precizării caracteristicilor tehnice și hidraulice este prezentată în tabelul 5.

În concluzie, prezentarea hidrogeologică a zonei de interes, respectiv conul aluvionar al Crișului Repede permite obținerea elementelor necesare realizării modelului numeric ce face obiectul capitolului 6 și anume :

- delimitarea zonei modelate ;
- stabilirea condițiilor hidraulice la limita domeniului luat în studiu;
- stabilirea parametrilor fizici de domeniu (grosime acvifer, porozitate, coeficienți de permeabilitate).

5.2 Identificarea surselor de poluare din zona de interes

Prezentul paragraf își propune să inventarieze posibilele surse de poluare în zona conului aluvionar al crișului Repede. Desigur că în spațiul județului Bihor

există și alte locații cu unități economice ce se pot constitui ca surse de poluare a apelor freatice însă în spiritul prezentului studiu acestea sunt ne semnificative.

De precizat faptul că o parte din unitățile economice ce se pot considera surse virtuale de poluare și-au redus activitatea sau chiar sunt în lichidare sau conservare.

Date fiind particularitățile curgerii apelor subterane (viteze mici de curgere, gradienti hidraulici reduși) aceste posibile surse de poluare trebuie luate în considerare.

Pentru studiul regimului calitativ al apelor subterane din zona conului aluvionar al râului Crișul Repede reprezentative în primul rând P1-P10 sunt forajele din freatic.

În această idee s-a instituit o așa numită stație de control a poluării apelor subterane alcătuită din 13 foraje. Variația concentrației în câteva foraje este dată de graficele din figurile 29 și 30

Justificarea instituirii acestei stații de control a poluării este dată de reprezentativitatea acviferului în zonă și de prezența în acest perimetru a zonei industriale de vest a Oradei cu obiective ce constituie posibile surse de poluare.

Gruparea acestor obiective economice cu activitate curentă sau în conservare ce se constituie posibile surse de poluare a făcut ca zona monitorizată de Stația de control a poluării să fie împărțită în trei sectoare în vederea unei corelări eficiente foraje-surse de poluare.

Aceste trei sectoare sunt : Sector mal stâng-Crișul Repede, aval Oradea, Sector mal drept-Crișul Repede, aval Oradea și Sectorul Santăul Mic. Prezentarea sintetică a acestor trei sectoare cu precizarea zonei cuprinse, forajele prezente, posibili agenți poluatori și depășiri ale indicatorilor de calitate este dată de tabelul nr

Amplasarea posibilelor surse de poluare în zona de interes este dată de figura 29. În baza tabelului 6 și a figurii 31 se vor construi variantele de simulare a transportului poluanților în această zonă în vederea evaluării impactului acestora asupra regimului calitativ al apelor subterane.

Legenda

— Lim. Bazin Hidrografi

— Rauri

● Ac. permanente

--- Municip. Orase

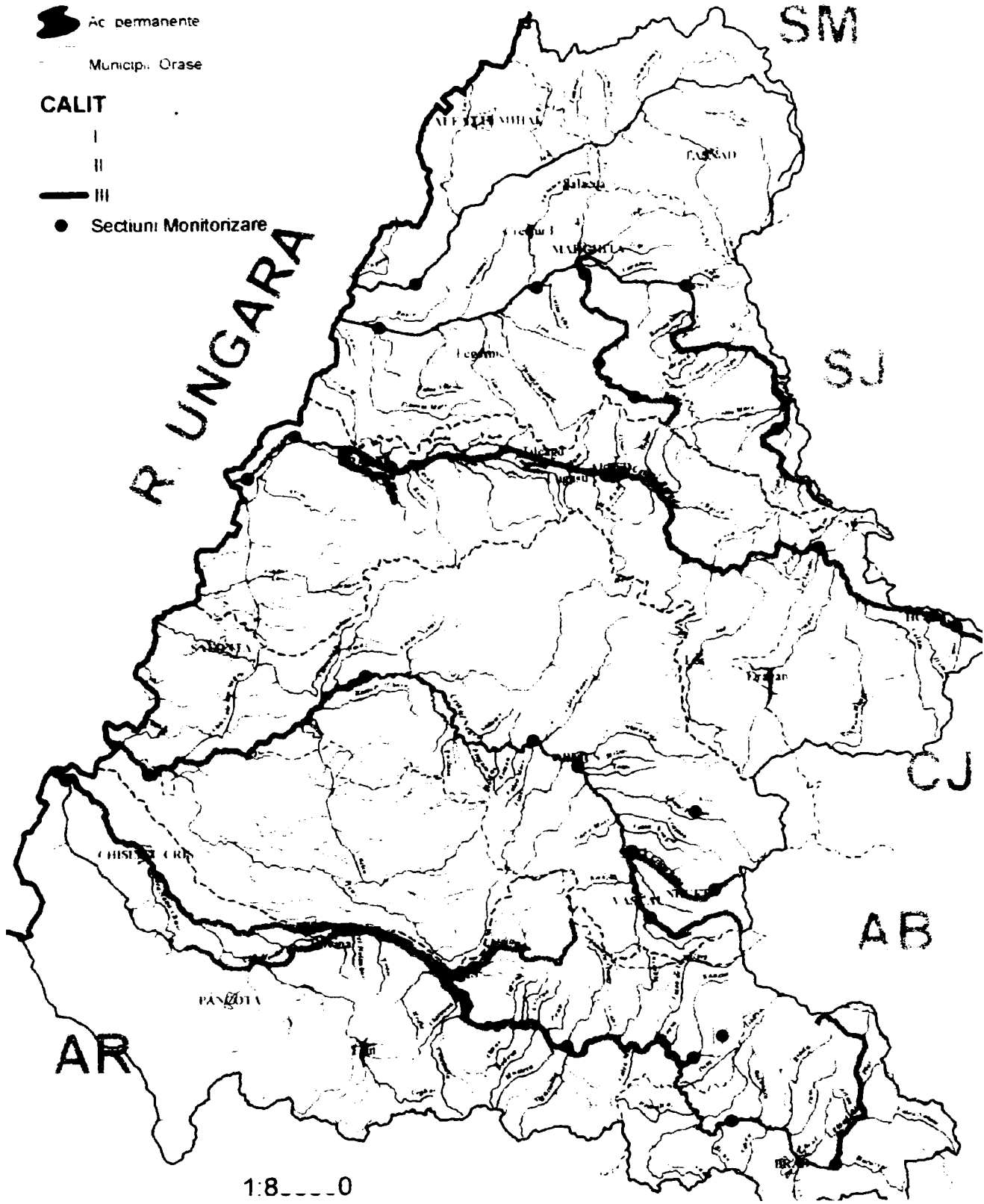
CALIT

I

II

III

● Sectiuni Monitorizare



1:80.000
Figura 25. Amplasamentul zonei de interes

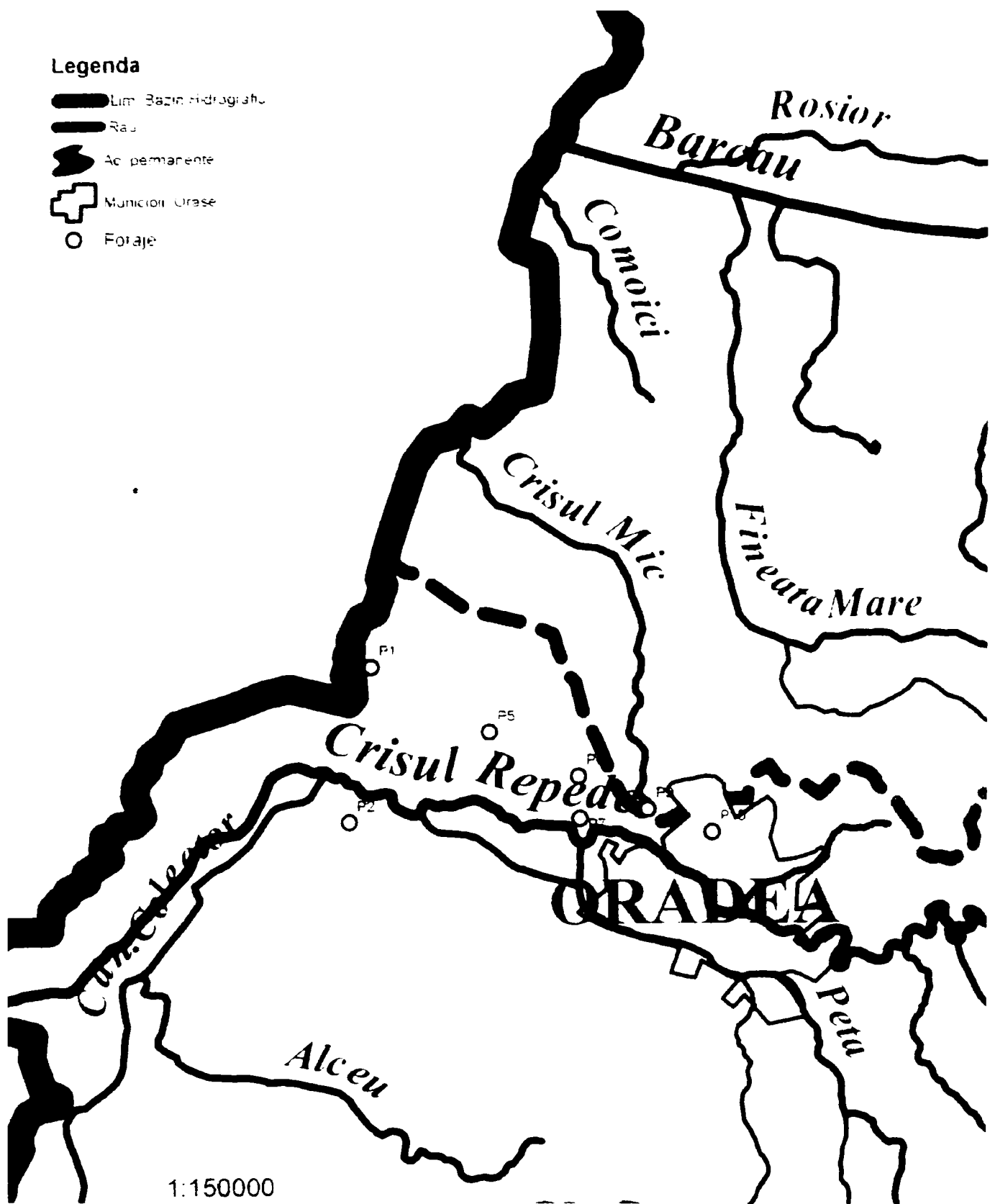


Figura 26 Zona de interes (detaliu)

Foraje de urmarire a calitatii apei subterane in B.H Crisuri

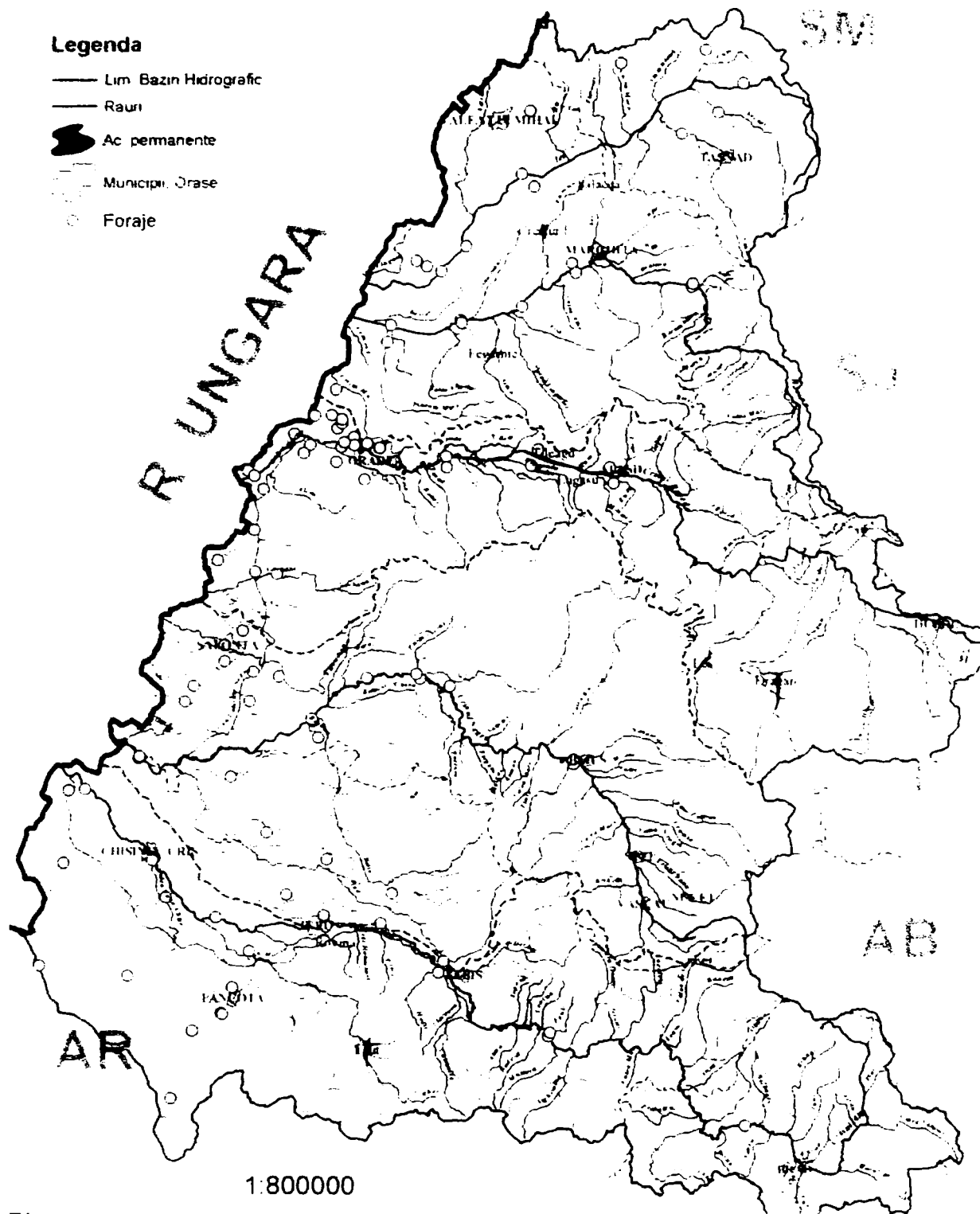
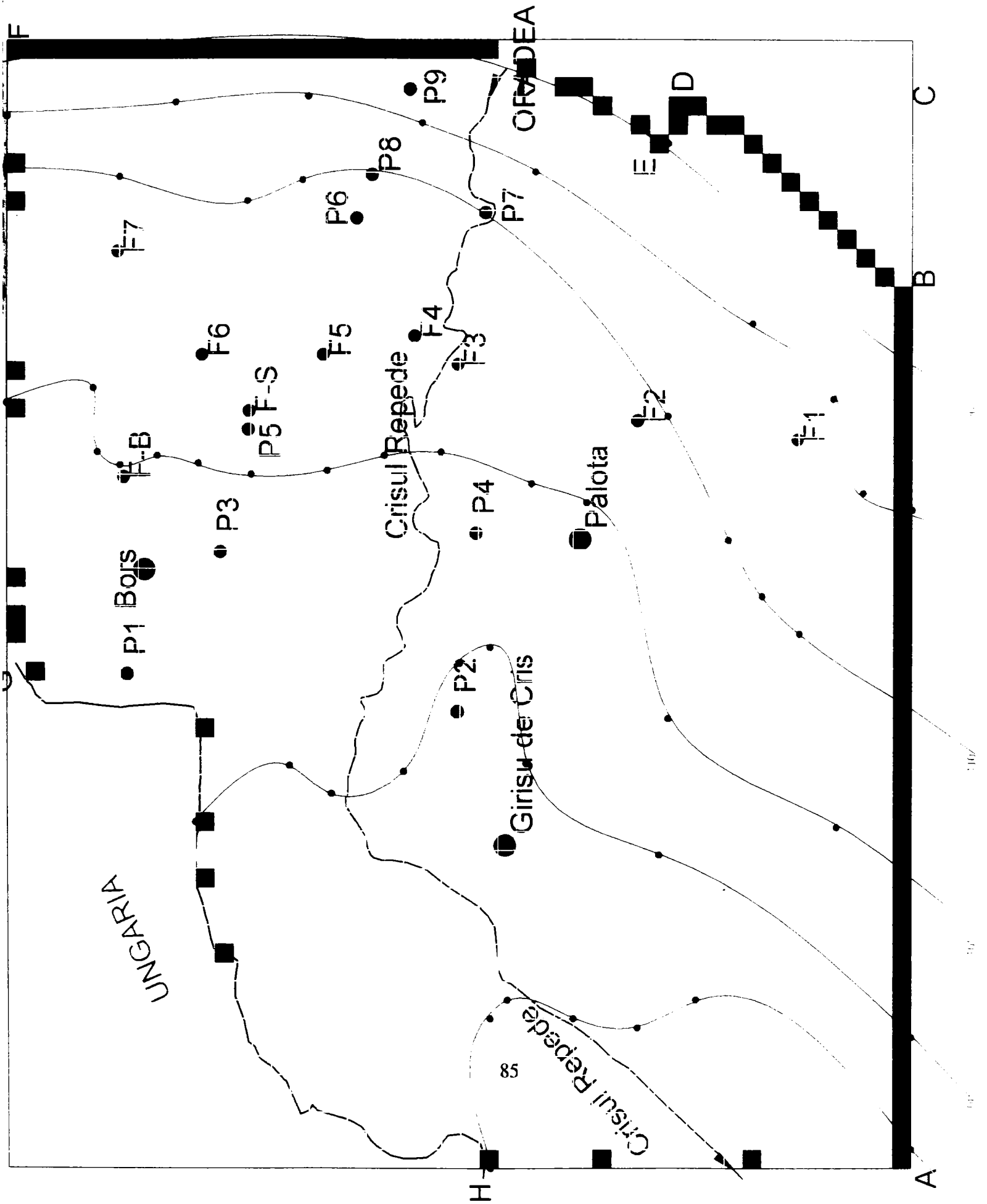


Figura 27. Foraje de monitorizare a apelor subterane in spatiul jud. Bihor

Figura 38 Foraje hidrogeologice si hidroizohipse in zona de interes



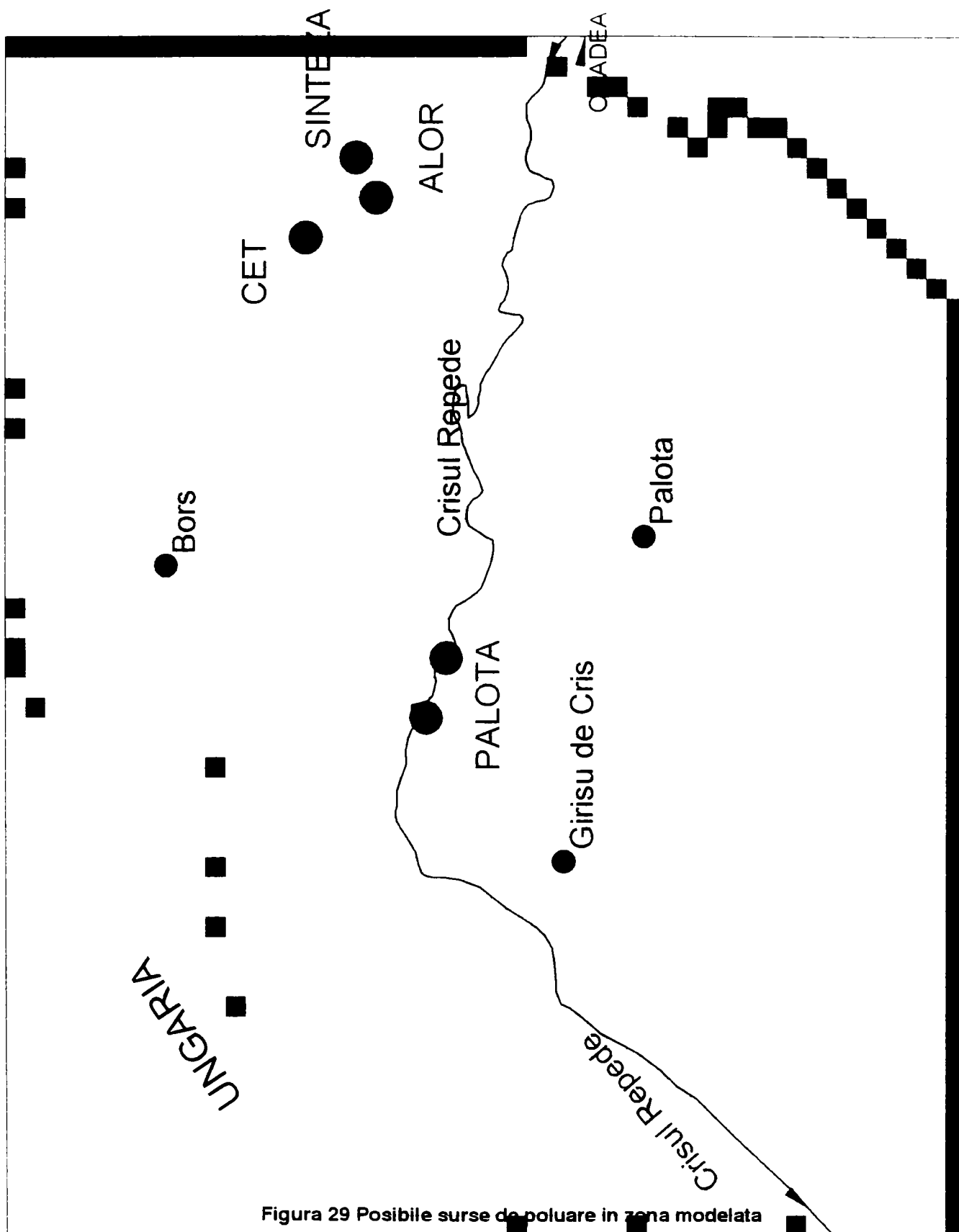


Figura 29 Posibile surse de poluare in zona modelata

Tabelul 4. Localizarea forajelor

Nr. ct.	Stație hidrogeo	Indicativ foraj	Cotă teren (m)	Cotă capac (m)	Cod cotă	NH (m)	Localizare
1	Oradea	F4	111.9 1	112.48	*	103.73	Fosta fermă DOSU-500 m Crișul Repede
2	Oradea	F5	110.0 9	110.81	*	107.16	I.Sere Oradea, stânga DN Oradea-Borș
3	Oradea	F6	110.9 5	111.51	*	107.16	I.Sere Oradea, dreapta DN Oradea-Borș
4	Oradea	F7	112.2 2	111.72	*	107.07	Arabil, stânga drum Episcopia Bihor-Santău Mic
5	Stație Control Poluare	P1	106.3 3	106.86	**	-	Ieșire Borș, 200m stânga DN Oradea-Borș
6	Stație Control Poluare	P3	105.9 8	106.59	**	-	Pășune Sântion, 500 m stânga DN Oradea-Borș
7	Stație Control Poluare	P5	108.0 8	108.79	**	-	Stânga DN Oradea-Borș, incintă stadion Sântion
8	Stație Control Poluare	P6	116.7 0	117.19	**	-	Dreapta DN Oradea-Borș, incintă I.Sinteza SA
9	Stație Control Poluare	P7	120.1 9	120.62	**	-	Stânga DN Oradea-Borș, PECO
10	Stație Control Poluare	P8	117.4 1	118.08	**	-	Dreapta DN Oradea-Borș, incintă SC.Alumina
11	Stație Control Poluare	P9	119.1 7	119.68	**	-	Dreapta DN Oradea-Borș, incintă S.C.Zahărul
12	Santău Mic	F1	103.4 6	104.09	**	-	Dreapta drum Santău Mic- Santău Mare, ieșire Santău Mic
13	Borș	F1	106.1 5	106.75	*	104.35	Drum Borș-Episcopia Bihor, barieră SNCFR

* Sistem referință Marea Baltică

** Sistem referință Marea Neagră

Tabelul nr.5 Obținerea coeficientilor de filtrație la forajele de adancime

Foraj	Adancime strat acvifer (m)	Denivelare in foraj (m)	Raza influenta (m)	Coeficient filtrație	
				K (m/zi)	Medie(m/zi)
F1	7.90	1.55	49	4.7	5.2
		2.47	76	5.1	
		4.15	120	5.8	
F2	5.90	2.10	59	29.4	23.3
		2.65	71	31.4	
		4.20	96	39.0	
F3	11.20	0.23	10	154.2	136.2
		0.47	20	125.5	
		0.70	30	128.9	
F4	11.40	1.05	44	28.7	25.1
		2.10	84	23.7	
		3.14	120	22.9	
F5	18.60	1.60	67	18.6	19.5
		3.20	127	19.5	
		4.80	177	20.3	
F6	11.61	0.14	6	200.0	204.0
		0.25	11	208.0	
		0.46	20	206.6	
F7	6.15	0.13	6	288.0	274.3
		0.25	12	277.0	
		0.42	19	258.0	

Tabelul nr.6 Sectoare, foraje si posibili poluatori în Stația de control a poluării (* Valori la nivelul anului 2003)

Nr. ct.	Sector	Foraje		Posibile unități economice poluatoare	Indicatori de calitate	
					Tip indicator	Valoare (mg/l)
1	Mal stâng-Crișul Repede Aval Oradea	P2	S.C. SUNPROD S.A. Palota (iazuri biologice)	Amoniu	2.90	
		P4		Azotți Azotați Reziduu fix Calciu Magneziu Fenoli	0.129 310 1017 178 52 0.013	
2	Mal stâng-Crișul Repede Aval Oradea	P1 P3 P5 P6 P7 P9	Stație epurare Oradea S.C. ALOR S.A S.C. Sinteza S.A.	Cloruri	280	
		P10 P11(F4) P12(F5) P13(F6) P14(F7)		Sulfati Magneziu Reziduu fix Fier Fenoli	612 - 1585 0.18 0.013	
3	Santăul Mic	P15 (F)	CONEL-S.C. TERMOELECTRICA (CETI Oradea) (Halda zgura cenușă)	Amoniu Azotți Sulfati Fenoli	0.106 0.106 298 0.006	

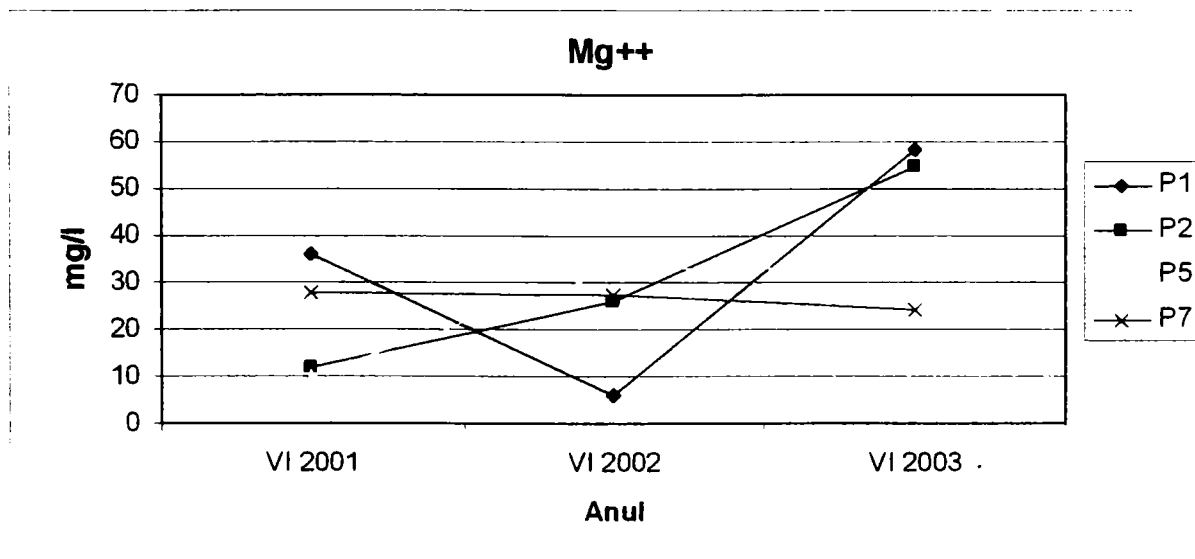
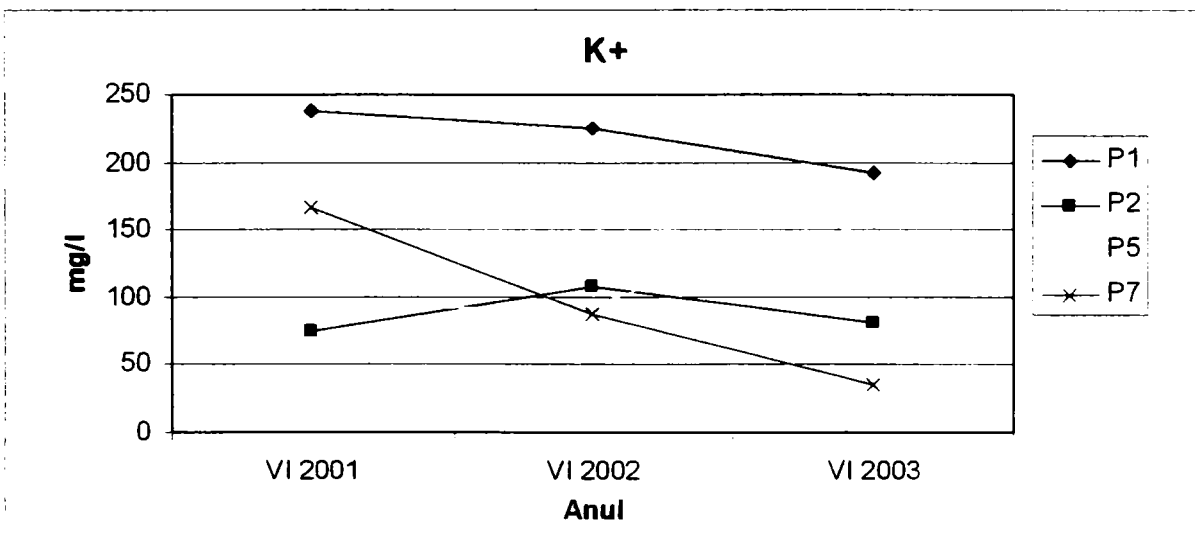
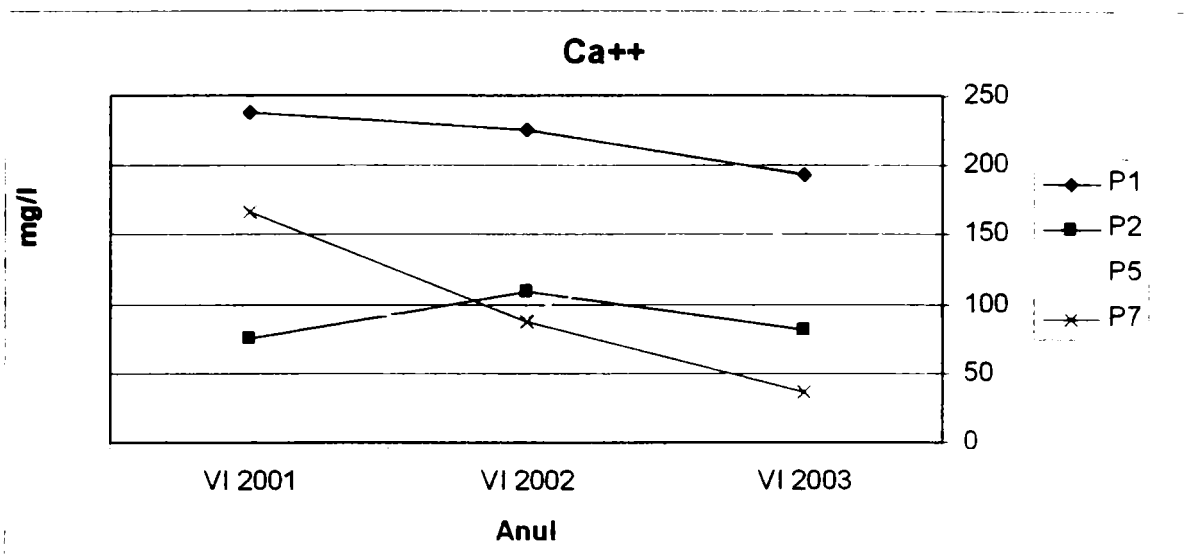


Figura 29. Variația concentrație in puturile (P1,P2,P5,P7)

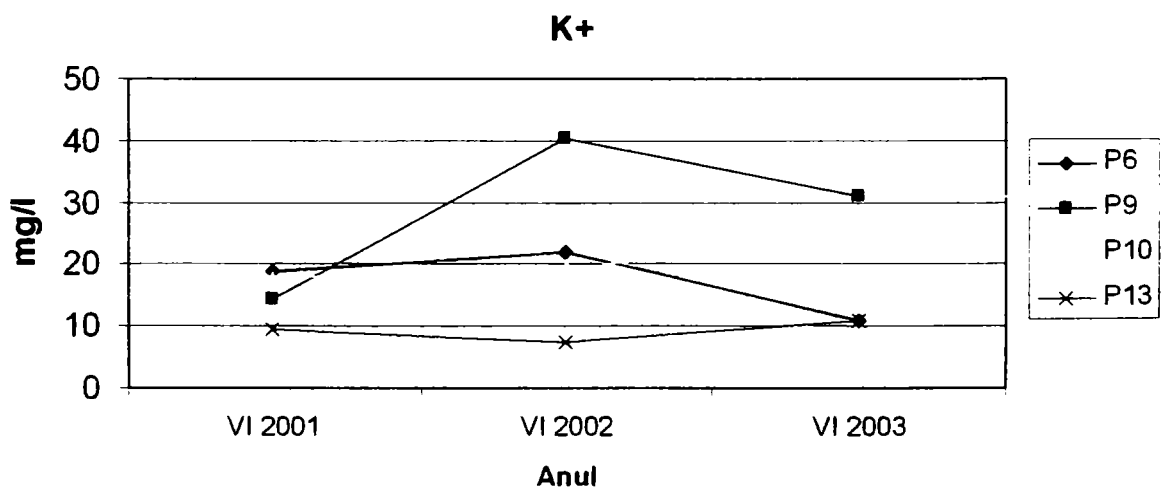
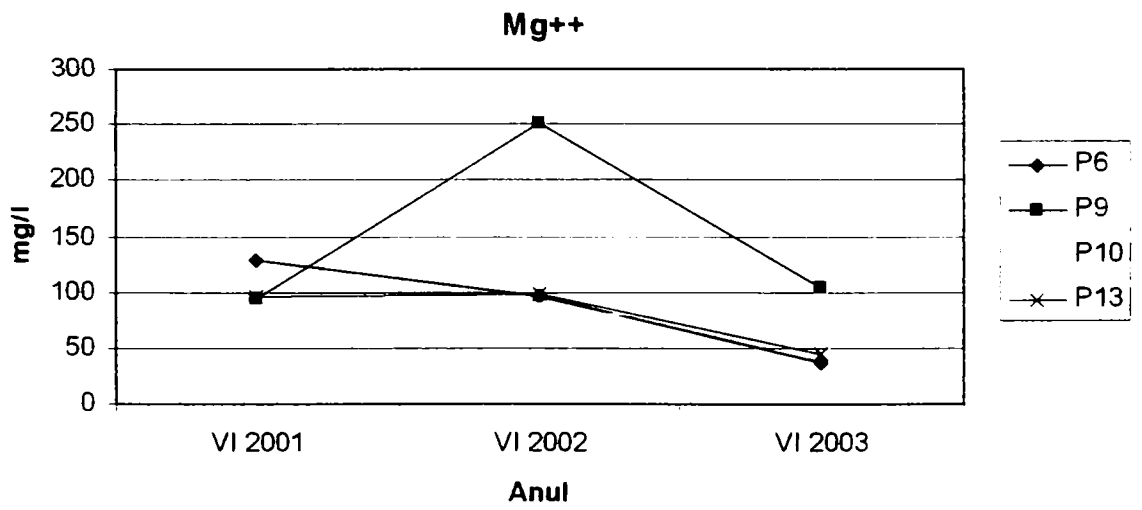
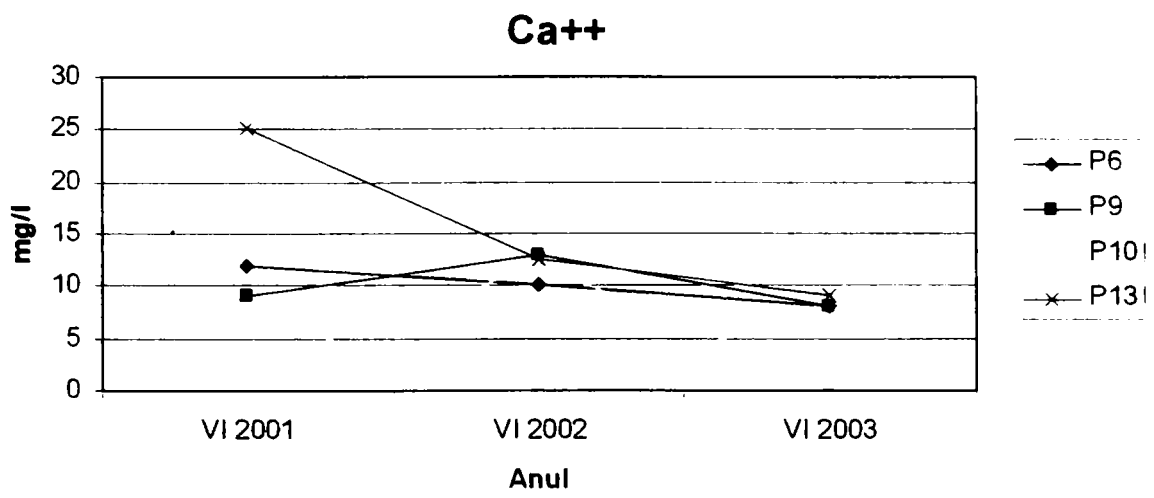


Figura 29. Variația concentrație in puturile (P6,P9,P10,P13)

Cap. 6 Construirea modelului numeric al zonei de interes

Prezentul capitol își propune ca pe baza caracterizării hidrogeologice a zonei de interes și a identificării surselor de poluare din cadrul acesteia să simuleze curgerea apelor subterane și transportul poluanților folosind un model numeric.

În acest scop se va realiza modelul numeric de curgere, respectiv o “calare” a acestuia, în sensul că acesta să reproducă cât mai fidel curgerea apelor subterane în materie de nivele piezometrice, direcții de curgere și gradienti hidraulici din zona de interes, elemente conținute de studiile hidrogeologice existente.

Pe baza datelor prezentate în subcapitolul 5.2 respectiv identificarea posibilelor surse de poluare se vor realiza simulări ale transportului poluanților în această zonă. Aceste simulări vor fi organizate pe variante care se diferențiază între ele prin poziția surselor de poluare, parametrii de transport considerați, respectiv efectul cumulat al mai multor surse de poluare cu locații diferite.

6.1 Schematizarea și stabilirea parametrilor de modelare a zonei de interes

Modelul numeric de curgere și transport aferent zonei de interes s-a realizat cu ajutorul programului ASMWIN. În vederea realizării modelelor numerice este necesar a face o schematizare a zonei de interes și a stabili parametrii de modelare pentru modelele de curgere și transport.

Schematizarea zonei de interes

Zona de interes, respectiv conul aluvionar al Crișului Repede, are o formă neregulată din punct de vedere geometric. În vederea construirii modelului numeric folosind programul ASMWIN, care folosește metoda diferențelor finite în varianta

celulară centrală, folosind celule rectangulare, zona de interes a fost schematizată în vederea obținerii unei forme rectangulare.

Astfel limita inferioară, sudică, a modelului este dată de o linie de potențial orizontală ce trece la 1.5 km sud de Aeroportul Oradea. Limita superioară, nordică a modelului este o linie de curent, paralelă cu cea sudică, trecând la 12 km sud de extremitatea localității Biharia.

În partea estică, limita modelului este constituită de o linie echipotențială verticală ce trece la 0.5 km vest de podul CFR Oradea-Arad peste râul Crișul Repede.

În fine, limita vestică a modelului este constituită de o verticală ce trece la 1 km de extremitatea estică a localității Cheresig.

Prin această schematizare s-a obținut un model rectangular cu lungimea de 15 km pe direcția E-V și lățimea de 12 km pe direcția N-S care include conul aluvionar al Crișului Repede cu observația că în partea nord-vestică forma regulată este deformată/secționată de frontiera română-maghiară care are o formă neregulată, sinuoasă.

Pe lângă faptul că această schematizare cuprinde zona de interes ea îndeplinește și condiția esențială de modelare numerică și anume delimitarea modelului numeric prin linii de potențial, respectiv linii de curent, care din punct de vedere matematic corespund prin condiții la limită de tip Dirichlet respectiv Neuman.

Conform schematizării din figura 28 care conține punctele caracteristice ale zonei modelate notate convențional de la A la H se disting următoarele limite ale modelului, respectiv linii caracteristice (de potențial sau de curent) :

-linia orizontală A-B din colțul stânga jos al modelului până la hidroizohipsa de 122 m este o linie de potențial variabil între limitele 97-122 m ;

-linia B-D este o linie echipotențială având valoarea de 122 m aproape paralelă cu calea ferată Oradea-Arad vest 600 m. Punctul B este dat de intersecția hidroizohipsei de 122 m cu pârâul Peța ;

-linia D-E o porțiune scurtă de linie de potențial făcând trecerea de la hidroizohipsa de 122 m la cea de 120 m de la est la vest urmând cursul pârâului Peța :

-linia E-F urmează îndeaproape hidroizohipsa de 120 m până în colțul nord-estic al modelului notat cu F ;

-linia F-G reprezintă o linie de curenți având în vedere configurația hidroizohipselor în această zonă și limita nordică a modelului ;

-linia G-H reprezintă traseul graniței de stat dintre România și Ungaria având o formă sinuoasă. În baza datelor hidrogeologice furnizate de Autoritatea locală a companiei Apele Române această linie este marcată de un potențial variabil ;

-linia H-A reprezentând limita vestică a modelului poate fi considerată o linie de potențial cu valori variabile având în vedere reducerea grosimii acviferului înspre extremitatea sudică și legătura hidrologică cu hidrostructura Câmpia de joasă de subsidență .

Stabilirea parametrilor de modelare

Parametrii de modelare ceruți de programul ASMWIN sunt următorii:

- coeficientul de anizotropie
- tipul acviferului
- cota superioară a acviferului
- cota inferioară a acviferului
- tipul condițiilor de margine și valoarea acestora
- pașii spațiali de discretizare, numărul acestora și întinderea modelului.

Pe baza acestor parametri de modelare se va realiza modelul numeric de curgere și calarea acestuia în sensul că modul de răspuns al modelului prin rulare, materializat prin hidroizohipse, direcții de curgere, gradienti hidrologici să se suprapună peste situația reală, materializată prin harta hidrogeologică de bază.

În baza celor precizate mai sus s-au stabilit următorii parametrii de modelare :

-tipul acviferului : freatic

-coeficientul de anizotropie :1 (poate fi considerată această valoare pe baza comparației valorilor coeficienților de filtrație în forajele din traversa N-S cu cele din traversa E-V

-limita superioară a acviferului este dată de cota terenului cu respectarea pantei ușoare de 0.8-1.4 ‰ pe direcția V-E :

-limita inferioară a acviferului s-a stabilit pe baza informațiilor privind grosimea acviferului și anume 19-20 m în centrul zonei modelate cu reducerea acesteia până la valori de 5 m în extremitățile nordice și sudice ale zonei schematizate.

Prin scăderea acestor valori de grosime ale acviferului din cotele superioare se obțin cotele inferioare ale acviferului.

Condițiile de margine au fost exprimate din considerentele privind schematizarea zonei de interes.

Liniile de potențial constant sau variabil, respectiv liniile de curent corespund din punct de vedere matematic cu condiții la limită de tip mixt (Dirichlet, von Neuman).

Tehnica de modelare numerică privind stabilirea pașilor spațiali de discretizare ține cont de scara problemei exprimată prin lungimea/ lățimea modelului desimea curbelor hidroizohipse din planșa martor nr.28 și de capacitatea maximă a programului folosit, respectiv programul ASMWIN. În baza acestor considerente s-a ales un pas de discretizare egal după cele două direcții $\Delta x = \Delta y = 250$ m, rezultând astfel un număr de 60 celule pe direcția orizontală respectiv 48 de celule după direcția verticală

În modelarea matematică a proceselor de curgere și transport a poluanților în apele subterane prin procesul de calare se înțelege în general, adaptarea, eventual ajustarea datelor de intrare ale modelului astfel încât rezultatele obținute

prin simularea numerică să corespundă cu situația din teren. Această situație din teren este dată de figura 28.

6.2 Simularea și evaluarea impactului surselor posibile de poluare reprezentative în zona de interes. Variante, scenarii

Simularea și evaluarea impactului surselor de poluare asupra regimului apelor subterane din zona conului aluvionar al Crișului Repede s-a realizat cu ajutorul programului ASMWIN.

Zona de interes a fost schematizată iar pe baza datelor de teren a fost realizat modelul de curgere. Modelul a fost calat corezpunzător astfel încât hidroizohipsele rezultate prin rularea modelului de curgere sa corespundă ca și valori și formă grafică cu cele existente în planșa hidrogeologică martor.

Au fost identificate posibilele surse de poluare din zona, respectiv zona industrială a municipiului Oradea. In baza datelor de teren aceste surse de poluare sunt reprezentate de unitățile industriale Alor, Sinteza, halda de sterial CET Oradea I respectiv iazurile biologice de la Palota.

Variantele de simulare constau în considerarea unor surse de poluare cu injecție instantanee în locațiile amintite mai sus și considerarea unor parametrii de transport (dispersivitate longitudinală, transversală, considerarea difuziei sau nu) și a unor parametrii de timp (timp total de simulare, pași de timp) diferiți.

Deoarece in modelul numeric având extindere relativ redusă (15 km după direcția orizontală, 12 km după cea verticală) cele două surse de poluare reprezentate de Alor și Sinteza sunt amplasate apropiat una de alta, una dintre ele, Alor nu a fost inclusă în simulare, diferențele între rezultatele obținute din surse diferite fiind nesemnificativă.

Variantele realizate sunt următoarele:

Varianta 1

Injecție instantanee din sursa de poluare Sinteza

Tip model de curgere: freatic

Porozitatea efectivă: 0.2

Dispersivitate longitudinală considerată: 120, 150 m

Dispersivitate transversală considerată: 10, 15 m

Coeficient de întârziere: 1

Coeficient de difuzie moleculara :0

Timp total de simulare : 5, 10 ani

Pasi de timp în simulare: 10, 20 zile

Varianta 2

Injecție instantanee din sursa de poluare Palota

Tip model de curgere: freatic

Porozitatea efectivă: 0.2

Dispersivitate longitudinală considerată: 100, 120, 150 m

Dispersivitate transversală considerată: 10, 15 m

Coeficient de întârziere: 1

Coeficient de difuzie moleculara :0

Timp total de simulare : 5, 10, 15 ani

Pasi de timp în simulare: 20, 30 zile

Varianta 3

Injecție continuă din sursa de poluare halda de steril CET I

Tip model de curgere: freatic

Porozitatea efectivă: 0.2

Dispersivitate longitudinală considerată: 100, 120 m

Dispersivitate transversală considerată: 10, 15 m

Coeficient de întârziere: 1

Coeficient de difuzie moleculara :0

Timp total de simulare : 5, 10, 15 ani

Pasi de timp în simulare: 10, 20 zile

6.3 Interpretarea rezultatelor simulărilor

În baza variatelor de simulare prezentate în paragraful 6.2 constând în injecții instantanee de poluant din trei locații diferite, și tip de poluare diferit (poluare chimică de la Sinteza, poluare biologică din iazurile de decantare de la Palota, poluare chimică din halda de steril de la CET I) se pot face următoarele interpretări.

Modelul de curgere este unul de tip freatic. Principalul proces de transport, convecția, își aduce un aport mic în cadrul simulărilor datorită valorilor mici a gradientilor de curgere a apei subterane.

Direcția principală de curgere a curentului subteran este de la est spre vest, respectiv spre Ungaria. Această remarcă face ca studiul transportului poluanților în

această zonă, respectiv conul aluvionar al Crișului Repede să constituie o preocupare de actualitate.

Subvariantele de simulare constând în considerarea unor valori diferite ale dispersivităților 100-150m (aproximativ 1 % din scara spațială a modelului pentru dispersivitatea longitudinală, respectiv reducerea acesteia de 10 ori pentru dispersivitatea transversală) nu se deosebesc semnificativ una de alta.

Considerarea unei valori uzuale pentru coeficientul de difuzie, respectiv omiterea acestui proces de transport în cadrul simulărilor nu conduce, de asemenea la modificări esențiale ale concentrațiilor.

Tipul de injecție instantanee de poluant considerată în cadrul simulărilor presupune o poluare de tip accidental, posibilă, care poate apărea la Sinteza.

Pentru sursa de poluare halda CET I se poate avea în vedere o poluare de tip continuu, respectiv o injecție de poluant continuă, pe baza existenței acestei halde.

Pentru sursa de poluare Palota, pentru un timp de poluare de 15 ani, un procent de 10 % din concentrație ajunge în zona Crișului Repede ceea ce conduce la ideea că simularea transportului poluanților în această zonă ar trebui cuplată cu o simulare a transportului poluanților în apele de suprafață, ce ar putea constitui obiectul unui studiu în viitor.

Natura poluanților din această locație, preponderenți biologici, capacitatea de autoepurare din subteran și considerarea unor coeficienți de degradare biologică în cadrul simulărilor reduc semnificativ efectul poluării din această sursă. De fapt, dacă acest fenomen s-ar fi produs până în prezent, ar fi fost semnalat cu promptitudine datorită faptului că Crișul Repede este monitorizat în această zonă din punctul de vedere al calității apei.

Cumularea efectelor poluării din cele trei surse de poluare nu poate fi considerată decât prin considerarea aceluiași tip de poluant. Prin considerarea de tipuri diferite de poluanți, prin natura lor chimică, apar alte reacții chimice care în prezenta lucrare nu au fost luate în considerare.

Nu în ultimul rând, prezentul studiu ar putea fi completat cu considerarea conului aluvionar al Crișului Repede dincolo de granița cu Ungaria, așa după cum el există în realitate. Aceasta ar presupune o colaborare între autoritățile din domeniu, a cercetătorilor din cele două țări vecine, România și Ungaria. Și acest aspect ar putea constitui un studiu pe viitor.

7. Concluzii

Prezenta lucrare are la bază o documentare serioasă în domeniul modelării matematice a curgerii apelor subterane și transportului poluanților în acestea. Sunt prezentate bazele modelării matematice a curgerii apelor subterane, considerentele matematice necesare obținerii ecuațiilor de curgere și soluțiile analitice și numerice folosite azi în literatura de specialitate însoțită de o grafică adecvată și sugestivă.

În continuare sunt prezentate bazele matematice ale modelării matematice ale transportului poluanților în apele subterane. Și în acest caz aparatul matematic folosit este unul complex care implică ecuații cu derivate parțiale a căror formă explicită depinde de numărul de dimensiuni considerate și tipul injecției de poluant considerată. Soluțiile analitice și numerice prezentate sunt de asemenea prezentate într-o formă grafică adecvată.

În cadrul metodelor numerice s-a insistat pe metoda diferențelor finite, care sta la baza simulărilor transportului poluanților realizată ulterior.

Modelarea curgerii și transportului poluanților prin metode numerice folosind softuri specializate este cea mai modernă metodă folosită astăzi pe plan mondial datorită avantajelor pe care le prezintă: rapiditate, preț de cost scăzut, posibilitatea considerării a mai multor variate de simulare și scenarii diferite.

Aceasta presupune stăpânirea aparatului matematic necesar, a tehnicii de modelare numerică folosind softuri specializate, în cazul de față, programul ASMWIN.

În cadrul lucrării se prezintă un studiu de caz constând în simularea curgerii și transportului poluanților într-o zonă de interes respectiv conul aluvionar al Crișului Repede.

A fost aleasă această zonă datorită existenței datelor hidrogeologice necesare modelării cât și prezenței în zonă a unor posibile surse de poluare.

Pe baza studiilor hidrogeologice avute la dispoziție, zona de interes a fost schematizată conform tehnicilor de modelare (linii de curent, linii de potențial) în vederea obținerii datelor de intrare pentru modelul de curgere.

Modelul de curgere a fost calat corespunzător astfel încât hidroizohipsela ca și valoare absolută și formă geometrică să corespundă cu situația din teren, existentă în studiile hidrogeologice. Au fost ajustați parametrii de domeniu, permeabilitatea acviferului respectiv a condițiilor la limită reprezentate prin nivele piezometrice.

Prin rularea modelului de curgere a fost obținut câmpul de viteze în zona schematizată necesar modelărilor pentru procesul de transport a poluanților.

În aceeași zonă de interes au fost identificate posibilele surse de poluare cu impact semnificativ asupra regimului calitativ al apelor subterane. Aceste surse posibile de poluare sunt reprezentate de unitățile economice din zona industrială a municipiului Oradea : Alor, Sinteza, halda de steril CET I, respectiv iazurile biologice de la Palota.

Din aceste locații ale surselor de poluare au fost realizate trei variante de simulare a transportului poluanților în acviferul freatic considerat.

Variantele se deosebesc între ele prin poziția surselor de poluare, tipul injecției de poluat și parametrii de transport (dispersivități) respectiv parametrii de timp.

Simulările realizate indică o poluare a apelor subterane din zona de interes pe direcția est-vest, spre Ungaria.

Pentru varianta de simulare ce consideră sursă de poluare Palota se remarcă o poluare a Crișului Repede. Fenomenul este atenuat însă prin natura sursei de poluare, biologică.

Studiul ar putea fi completat printr-o simulare cuplată a transportului poluanților în apele subterane cu transportul poluanților în apele de suprafață.

De asemenea printr-o colaborare cu autoritățile din țara vecină, Ungaria, studiul ar putea fi completat cu considerarea extinderii conului aluvionar dincolo de graniță, prin obținerea datelor hidrogeologice de teren necesare.

Simulările realizate prin variantele prezentate sunt utile în a aprecia nivelul de poluare și timpul avansării penelor de poluant din aceste surse de poluare

considerate, în cazul unor poluări accidentale, și pe această cale luarea măsurilor tehnice ce se impun.

BIBLIOGRAFIE

1. Bartha, I.; Javgureanu, V. *Hidraulica*, Vol I, Editura Tehnică, Chișinău, 1998
2. Bear, J. *Hydraulics of Groundwater*, Mc-Graw – Hill, New York, 1979
3. Bica, I. *Poluarea acviiferelor. Tehnici de remediere*, HGA, București, 1998
4. Bica, I. *Protecția mediului, Politici și instrumente*, HGA, București, 2002
5. Bradeanu, P.; Bratianu, C. *Mecanica fluidelor*, Editura Tehnică, București, 1998
Metode cu elemente finite in dinamica fluidelor, Editura Academiei RSR, 1983
6. Bredehoef, J.D. *Mass Transport in Flowing Groundwater, Water Resources Research, Vol 9, No. 1/1973*
7. Caius, I. *Lecții de matematici superioare*, Editura Tehnică, București, 1969
8. Caius, I. ; și *Matematici clasice și moderne, Vol III*, Editura Tehnică, București 1981
9. Carabeț, A. *Protecția resurselor de apă subterană*, Editura Mirton, 1999
10. Carafoli, E.; Constantinescu, V.N. *Dinamica fluidelor incompresibile*, Editura Academică, București 1981
11. Ciplea, L.I.; Ciplea, Al. *Poluarea mediului ambiant*, Editura Tehnică, București, 1980
12. Clepan, D. *Poluarea mediului*, Altip, Alba Iulia, 1999
13. Craiu, M. ; Roșculeț, M. *Ecuații diferențiale aplicative*, Litografia I.P. București, 1971
14. Craiu, M.; Tănasă, V. *Analiză matematică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1963
15. Creangă, I. ; Luchian, T. *Introducere in calculul tensorial*, Editura Didactică și Pedagogică, București 1963
16. Crețu, I. *Hidraulică generală și subterană*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971
17. Cristea, Gh.; Ardelean, I. *Elemente fundamentale de fizică*, vol I, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1980
18. Cussler, E.L. *Diffusion – Mass Transfer in fluid systems*, Mc-Graw-Hill Companz, 1984
19. David, I. *Hidraulica*, Vol I, II, Universitatea Tehnică, Timisoara, 1990
20. David, I. *Grundwasserhzdraulik, Stromungs-und Transportvorgänge*, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg, 1998
21. David, I.; Șumălan, I. *Metode numerice cu aplicații în Hidrotehnică*, Editura Mirton, Timișoara, 1998
22. David, I. ; Carabeț, A.; Șumălan, I.; Nitușcă, A. *Transportul poluanților prin medii poroase*, Universitatea Politehnică, Timișoara, 1996
23. Domenica, P.A.; Schwartz, F.W. *Physical and Chemical Hydrogeology*, Hemilton Printing Company, New York, 1990
24. Dragoș, L. *Principiile mecanicii mediilor continue*, Editura Uranus, București, 1983
25. Dragotă, I. *Metode de calcul numeric*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1988
26. Filip, S.; Marcu, L. *Mecanică fizică*, Editura Universității din Oradea, 1998
27. Florea, J.; *Mecanica fluidelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979

- Panaiteescu, V.
28. Frugină, E. *Scurgerea subterană freatică în Câmpia de Vest*, Hidrotehnica, 32, 1987
29. Gavriș, G. *Chimia mediilor poluante*, Editura Universității din Oradea, 2003
30. Gheorghiu, St. *Metode matematice în hidrogazodinamica subterană*, Editura Academiei, București, 1966
31. Haimovici, M. *Ecuațiile fizicii matematice și elemente de calcul variațional*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1966
32. Halliday, D.; Resnick, R. *Fizică*, vol. I, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975
33. Huyacon, P.S.; Unga, M.I. *A Three Dimensional Analytical Method for Predicting Leachate Migration, Groundwater*, Vol 25, No 5, 1987
34. Iacob, C.; Homentcowski, D.; Marcov, N.; Nicolau, A. *Matematici clasice și moderne*, vol IV, Editura Tehnică și Pedagogică, București, 1986
35. Ionescu, C.B. și *Matematică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1986
36. Ionescu, D.V., Kalik, C. *Ecuații diferențiale ordinare și cu derivate parțiale*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1965
37. Ișbășoiu, E.C.; Georgescu, S. *Mecanica fluidelor*, Editura Tehnică, București, 1995
38. Konikov, F.L.; Grove, B.D. *Derivation of Equation Describing Solute Transport in Groundwater*, US Geological Survey, Denver, 1984
39. Ladon, F.I. *Bazele calcului vectorial*, Editura de Stat, București, 1949
40. Landan, L.D.; Lifschitz, E.M. *Mecanique des fluides*, Editura Mir, Moscow, 1971
41. Landan, L.D.; Lifschitz, E.M. *Mecanică*, Editura Tehnică, București, 1973
42. Lazăr, D. *Principiile mecanicii mediilor continue*, Editura Tehnică, București, 1983
43. Leij, F.J.; Dane, G.H. *Analytical Solution of one Dimensional Advection and Two or Three Dimensional Dispersion Equation*, Water Resources Research, Vol 26, No 7, 1990
44. Lungu, N.; Dumitraș E.; Ile, V. *Matematici speciale*, Editura Digital Data Cluj, 2004
45. Man, E.; Bodog, M. *Calitatea apelor de scurgere în bazinul Crișurilor*, Analele Universității din Oradea, Fascicula Agricultură și Horticultură, 2001
46. Mănescu, M.; Dimache, Al. *Poluarea apelor subterane – studii de caz*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2002
47. Mihlin, S.G. *Ecuații liniare cu derivate parțiale*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1983
48. Mirel, I. *Hidraulică și construcții edilitare*, Litografia I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1986
49. Negulescu, M.; Antoniu, R.; Rusu, G.; Cusa, E. *Protecția calității apelor*, Editura Tehnică, București, 1982
50. Oroveanu, T. *Scurgerea fluidelor prin emdii poroase neomogene*, Editura Academiei, București, 1963
51. Oroveanu, T. *Mecanica fluidelor vâscoase*, Editura Academiei, București, 1967

52. Pietraru, V. *Calculul infiltrațiilor*, Editura Ceres, București, 1970
53. Popa, O. *Mecanica fluidelor*, Curs litografiat, I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1975
54. Popa, R. *Modelarea calității apelor din râuri*, Editura HGA, București, 1989
55. Rădescu, O.C. *Protecția calității apelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971
56. Răuță, C. ; Cârstea, S. *Prevenirea și combaterea poluării solului*, Editura Ceres, București, 1983
57. Reynolds, A.J. *Curgeri turbulente în tehnică*, Editura Tehnică, București, 1982 (traducere)
58. Roman, P. *Introducere în fizica poluării fluidelor*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1966.
59. Roșculeț, M. *Analiză matematică*, vol I, II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1966
60. Roșculeț, M. Craiu, M. *Ecuații diferențiale aplicative. Probleme la limită pentru ecuații cu derivate parțiale de tip parabolic*, Editura Academiei, București, 1979
61. Rusu, E. *Vectori*, Editura Albatros, București, 1976
62. Sălceanu, C. *Fizică generală – mecanică și acustică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975
63. Scelkacev, V.N.; Lapuc, B.B. *Hidraulică subterană*, (traducere din limba rusă), Editura Tehnică, 1953
64. Sobolev, S.L. *Ecuațiile fizicii matematice*, (traducere din limba rusă), Editura Tehnică, 1956
65. Spânulescu, I.; Olariu, V. *Introducere în fizica matematică*, vol I, Editura "Victor", București, 2001
66. Șabac, Gh. I. *Matematici speciale*, Vol I,II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1965
67. Șchiopu, D. *Ecologie și protecția mediului*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1997.
68. Șumălan, I. *Accuracy Results of Solute Transport in Groundwater Flow*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 43(57)/1998.
69. Șumălan, I. *Considerations about the basic equations of solute transport in porous mediam*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42(56)/1977
70. Teman, R. *Navier-Stokes Equations*, North-Holland, 1977
71. Teodorescu, N.; Olariu, V. *Ecuațiile fizicii matematice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975
72. Teodorescu, N. *Ecuațiile diferențiale și cu derivate parțiale*, Editura Tehnică, 1980
73. Tihonov, A.N.; Smarskii A.A. *Ecuațiile fizicii matematice*, (traducere din limba rusă), Editura Tehnică, Moscova, 1953
74. Trofin, E. *Hidraulică și Hidrologie*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
75. Trofin, E. ; Mănescu, M. *Hidraulică subterană și protecția calității apelor*, Institutul de Construcții București, 1982.
76. Turcan, R. *Bazele mișcării fluidelor prin medii poroase*, (vol II), Editura Digital Data, Cluj-Napoca, 2005
77. Țiteica, R.; Popescu, I. *Fizică generală – vol I*, Editura Tehnică, București, 1989
78. Vaida, L.; Opruța, D. Chervase, M. *Mecanica fluidelor – elemente teoretice* vol I, Editura Universitatii din Oradea, 2000

- Giurgia, C.
79. Varduca, A. *Monitoringul integrat al calității apelor*. HGA, București, 1989
80. Varduca, A. *Hidrochimie și poluarea chimică a apelor*. HGA, București, 1997
81. Vladimirescu, I. *Bazele hidrologiei tehnice*. Editura Tehnică, București, 1997
82. Walton, C.W. *Handbook of Analytical Groundwater Models*. International Groundwater Center, Indiana, 1984
83. Wang, F.H.; Anderson, M.P. *Introduction to Groundwater Modelling. Finite difference and finite element methods*. San Francisco, 1984.
84. Wolfgang, K. *Aquifer Simulation Model – ASM*; Gesanthschochschule Kassel, 1989.
85. Randolph, R.
85. Zamfir, G. *Efectele unor poluanți și prevenirea lor*. Editura Academiei Române, București, 1979.
86. *** *Harta hidrogeologica a zonei Oradea cu obiectivele de controlat* Institutul de Meteorologie si Hidrologie, Sectorul Teritorial Oradea.
87. Beilicci, R. *Modellierung der Wall-Durchdromung durch ein ungesattingen poroses medium*. Buletinul științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Tomul 43(57)/1998
88. Constantinescu, L. *Le stade de pollution des terrains dans le departement de Timiș*. Buletinul științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Tomul 43(57)/1998
89. Carabeț, A. ; David, I. *Modelling of the Groundwater pollution in the areas neighbouring stock pits*. Buletinul științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Tomul 42(56)/1997
90. Man, E. ; Filip, P. *Rezultatele studiilor de drenaj efectuate pentru județele Timiș, Arad, Bihor, Maramureș și Satu-Mare, pentru principalele soluri cu exces de umiditate studiate*, Sesiunea Internațională de comunicări științifice “Resursele de mediu și protecția lor pentru o dezvoltare durabilă”, organizata de Facultatea de Protecția Mediului de la Universitățile din Oradea și Debrecen, 8-9 mai 2003, Oradea.
91. Mirel, I. ; Florescu, C;
92. Stăniloiu, C; Arimia, F.
93. Turcan, R. *Über die wasserversorgungssysteme der Kleinortschaften*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Seria Hidrotehnica, martie 2000.
94. Turcan, R. *Mișcarea fluidelor prin medii poroase omogene*. Colocviul de mecanica fluidelor și aplicațiilor ei tehnice: 14-15 oct 1988, Oradea.
95. Turcan, R. *Calculul infiltrațiilor prin baraje, teorie și realizare practică*. Al VIII lea Colocviu de “Teoria Filtrației”, Ploiesti, 26-27 mai 1989.
96. Turcan, R. *Ecuatiile fizicii matematice cu aplicatii in teoria filtratiei si transportului poluantilor* Sesiunea de comunicari stiintifice – Facultatea de Protectia Mediului a Universitatii din Oradea – mai 2000
97. Turcan, R. *Transportul poluantilor prin acvifere – modelare matematica*, Conferinta Nationala organizata de Universitatea din Oradea – Baile Felix 2001
98. Turcan, R. *Ecuatiile generale privind miscarea fluidelor prin medii poroase* Sesiunea de comunicari stiintifice organizata de Facultatea de Protectia Mediului a Universitatii din Oradea – mai 2002.
98. Turcan, R. *Modelarea curgerii apei si transportului poluantilor in acvifere – metode matematice* Conferinta Nationala – cu participare internationala de „Analiza Matematica si Aplicatii”, organizata de Facultatea de Matematica si Informatica a Universitatii „Babes Bolyai” din Cluj

- Napoca (8-9 nov 2002).
99. Turcan, R. *The movement of fluids through porous environments – The continuity equation – Analele Universitatii din Oradea – vol. 9/2004 – pagina 445-464*
100. Turcan, R. *The water movement equations through porous environments. The Navier – Stokes equation (for viscid fluids) – Analele Universitatii din Oradea – vol 9 2004 (pag 465-472)*
101. Turcan, R. *Darcy's Law – the law that rules the fluid movement in porous environment extensions for Darcy's Law – Sesiunea Internationala de Comunicari Stiintifice, „Resursele de mediu si protectia lor pentru o dezvoltare durabila”, Universitatea din Oradea si Universitatea din Debrecen (Ungaria).*
102. Varga, L. *Evaluarea potentialului de reducere a emisiilor de gaze de sera prin utilizarea combustibililor alternativi. – Sesiunea Internationala de Comunicari Stiintifice, „Resursele de mediu si protectia lor pentru o dezvoltare durabila”, Universitatea din Oradea si Universitatea din Debrecen (Ungaria).*

Anexa Tabelul nr.3 Sinteza principalelor softuri ce modelează numeric curgerea/transportul poluanților în apele subterane

Nr .crt,	Denumire soft	Autor (i), Afiliere	Obiect de studiu, Particularități	Obs.
1	AQUAWIN	Gerrit van Tonder (IGS) Eelko Lukas (IGS) Jeanette Buys	Curgere in apele subterane Transport in apele subterane Analiza de risc, Modelare inversa	MEFIN 2D
2	NETGEN	Gerrit van Tonder (IGS) Eelko Lukas (IGS) Jeanette Buys	Generarea rețelei de discretizare pentru AQUAWIN	2D
3	ASMWIN	Wen-Hsing-Ciang(IGS) Wolfgang Kinzelbach (IHW Zurich) Randolf Rausch (GLA Stuttgart)	Curgere in apele subterane Transport in apele subterane prin diferente finite Transport in apele subterane prin metoda drumului aleator Vizualizare liniilor de curent	MEDIF 2D
4	PMPATH 98	Wen-Hsing-Ciang(IGS) Wolfgang Kinzelbach (IHW Zurich) Randolf Rausch (GLA Stuttgart)	Transport convectiv in apele subterane cu calculul liniilor de curent cuplat cu PMWIN si MODFLOW	3D
5	MODFLOW	Wen-Hsing-Ciang (USGS)	Curgere si transport in apele subterane Postprocesare grafica avansata Larga utilizare mondiala	3D
6	TRIPOL	Gerrit van Tonder (IGS) Jeanette Buys	Curgere si transport in acvifere freatice Interpolari avansate (Kriging, Bayese)	
7	TPA	Ingo Bordenhagen	Curgere in acvifere omogene, fracturate Analiza testelor de popare	
8	WISH Windows System Interpretation for Hydrogeologists	Eelko Lukas (IGS)	Trasare performanta a hidroizohipselor cu acces la baza de date Analiza tetelor de pompare in regim nepermanent Postprocesare grafica avansata	

9	HTS3D	USGS	Transport de masa si termic in apele subterane	MEDIF 3D
10	MOC3D	USGS	Transport in ape subterane Cuplare cu MODFLOW	MEDIF 3D
11	MT3D	University of Alabama	Transport in ape subterane	MEDIF 3D
12	MT3DMS	University of Alabama	Transport in ape subterane Versiune su erioara lui MT3D	MEDIF 3D
13	SMODFLOWW	Gregory J.Ruskauff	Versiune a lui MODFLOW si MODPATH	Monte-Carlo
14	SUTRA	USGS	Curgere si transport de monospecii chimice,densitate variabila in acvifere saturate si nesaturate	MEFIN
15	3DFEMFAT	Scientific Software Group,USA	Curgere si transport Acvifere saturate si nesaturate Densitati variabile	MEFIN 3D
16	AQUA3D	Scientific Software Group,USA	Curgere si transport Medii anizotrope Procese complexe de transport	MEFIN 3D
17	Argus ONE	Scientific Software Group	Preprocesare pentru modele de curgere	MEFIN, MEDIF
18	BIOF&T	Scientific Software Group	Curgere si transport Medii neomogene, fracturate Modelare avansata a proceselor biologice	2D,3D
19	Bioslurp	Scientific Software Group	Curgere si transport multispecii Specii trifazice: apa, petrol,gaze Medii nesaturate	MEFIN 2D
20	FEFLOW	Scientific Software Group	Curgere si transport densitati variabile, termic	MEFIN 2D, 3D
21	GMS - Groundwater Modeling System	Scientific Software Group	Varianta integratfa a softurilor MODFLOW,MODPSTH,	MEFIN ,MEDIF 2D,3D
22	Groundwater Vistas	Scientific Software Group	Proiectare si analiza complexa pentru MODLOW, MOD FLOW-SURFACT, MODPATH, MT3D si PEST	

23	Hydrogeochem	Scientific Software Group	Cuplarea scurgerii de suprafata cu reactiile geochimice Medii saturate si nesaturate	
24	Hydrogeochem2	Scientific Software Group	Varianta superioara lui Hydrogeochem Transport cu multispecii, reactii de echilibru	
25	MARS 2-D/3-D	Scientific Software Group	Curgere multifaza, Specii nemiscibile, cuplare cu BIOF&T	2D,3D
26	MODFLOW SURFACT	Scientific Software Group	Curgere si transport avand la baza MODFLOW	MEDIF 3D
27	MODFLOWT	Scientific Software Group	Varianta avansata a lui MODFLOW Transport convectiv-dispersiv pentru multispecii	MEDIF 3D
28	MOFAT	Scientific Software Group	Curgere si transport multifaza (apa, uleiuri, gaze) si multispecii	MEFIN 2D
29	MOVER	Scientific Software Group	Curgere multifaza (apa, uleiuri, gaze) Recuperare produse petroliere din areale poluate	MEFIN
30	MS-VMS	Scientific Software Group	Versiune avansata pentru MODFLOW SURFACT	
31	MT3D99	Scientific Software Group	Transport cu considerarea tuturor proceselor fizico-chimice Conditii hidro eolo ice com lexe	MEDIF 3D
32	SLAEM / MLAEM	Scientific Software Group	Model analitic de curgere, multistrate Acvifere freatiche, sub presiune, fracturate Cuplare cu ARCVIEW	2D
33	VAM2D	Scientific Software Group	Model de analiza pentru curgere si transport In acvifere cu saturatie variabila Regim permanent si nepermanent	MEFIN 2D
34	Visual MODFLOW Pro	Scientific Software Group	Model standard pentru curgere si transport Cuprinde MODFLOW, MODPATH, MT3DMS, RT3D	MEDIF 3D