

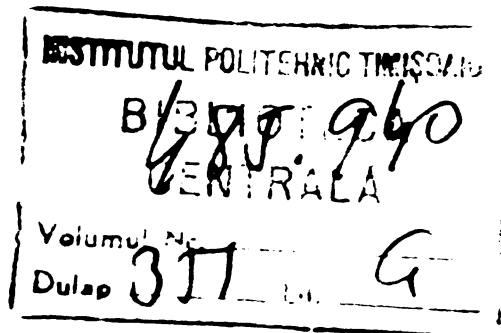
**MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE CONSTRUCTII**

Ing. Andrei Pogány

**CONTRIBUTIE LA IMBOGATIREA TEHNICA A
STRATURILOR ACVIFERE PRIN CONSTRUCTII
LINIARE DE INFILTRARE**

T E Z A D E D O C T O R A T

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA



**Conducător științific
Prof. Dr. Ing. Cornel Jura**

**TIMIȘOARA
- 1 9 8 4 -**

Intervenția masivă a omului în natură reclamă ordine și menținerea deliberată a echilibrului altădată organic. În douăzeci de ani nevoile de apă ale omenirii se vor dubla. Fără anticiparea acestei situații îndepărtate, omenirea se va izbi de o criză a apei.

Mircea Malița
Cronica anului 2000
Ed. politică București-1969

C U P R I N S

Cap. I. STADIUL ACTUAL AL ÎMBOGĂȚIRII TEHNICE A STRATURILOR ACVIFERE

	Pag
1.1 Generalități.....	1
1.1.1 Problema mondială a apei potabile.....	1
1.1.2 Orientări în dezvoltarea alimentărilor cu apă în România.....	3
1.2 Necesitatea studierii problemei.....	6
1.2.1 Aspectul general al problemei.....	6
1.2.2 Conceptul de îmbogățire tehnică a straturilor acvifere.....	7
1.3 Scurtă privire istorică asupra îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere.....	12
1.3.1 Situația pe plan mondial.....	12
1.3.2 Situația în țara noastră.....	16
1.4 Problema îmbogățirii tehnice a straturilor acvife- re, obiectul congreselor de specialitate și a manifestărilor internaționale.....	24
1.5 Avantajele îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere.....	26
1.6 Dezavantajele îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere.....	27
1.7 Perspectiva îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere.....	27
 Cap. II. ANALIZA PROBLEMELOR TEHNICE ALE ÎMBOGĂȚIRII STRA- TURILOR ACVIFERE	
2.1 Definiția îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere.....	29
2.2 Zone recomandabile pentru folosirea îmbogățirii artificiale.....	31
2.3 Metodele și mijloacele îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere.....	31
2.3.1 Metoda directă.....	31
a. Sistemul superficial.....	31
b. Sistemul subteran.....	37
c. Sistemul complex.....	39

2.3.2	Concluzii privind metoda directă.....	39
2.3.3	Metoda indirectă.....	40
2.4	Stadiul actual al cecetării și particularitățile in- filtrației prin construcții liniare.....	42
2.4.1	Generalități.....	42
2.4.2	Infiltrația liberă.....	44
2.4.3	Infiltrația înecată.....	46
2.4.4	Prezentarea unor soluții teoretice.....	49
2.5	Obiectul studiului și a cercetărilor din prezenta lucrare.....	58
2.6	Elaborarea programului de cercetare.....	59
2.6.1	Tendințe actuale.....	59
2.7	Concluzii parțiale.....	67
Cap. III. ANALIZA CONDIȚIILOR FIZICE ȘI MATEMATICE ALE MISCA-		
RII APEI ÎN MEDII POROASE ÎN CAZUL INFILTRĂRII PRIN		
CONSTRUCȚII LINIARE		
3.1	Legea lui Darcy și domeniul de valabilitate a ei....	68
3.1.1	Generalități.....	68
3.1.2	Clasificarea mișcărilor din diverse medii por. 70	
3.1.3	Caracterizare limitelor de valabilitate a dome- niilor mișcărilor prin medii poroase.....	72
3.2	Ecuatiile fundamentale ale mișcării apei în med. por. 74	
3.2.1	Formularea matematică.....	74
3.2.2	Ecuatiile mișcării apei prin medii poroase....	76
3.2.3	Bazele teoriei hidrodinamice ale mișcării apei prin medii poroase.....	80
3.3	Condițiile de margine.....	82
3.4	Metode de rezolvare a ecuațiilor mișcării.....	84
3.4.1	Metode care se bazează pe determinarea spectrului hidrodinamic.....	84
3.4.2	Metode simplificate.....	87
3.4.3	Metode combinate.....	87
3.5	Concluzii parțiale.....	88
Cap. IV. METODA ELEMENTELOR FINITE FOLOSITA LA REZOLVAREA		
PROBLEMEI MIȘCĂRII APEI ÎN MEDII POROASE		
4.1	Mișcarea apei în medii poroase neomogene și anizo- trops.....	91

4.2	Soluția mișcării apei în medii poroase bidi- mensionale anizotrope.....	93
4.3	Particularitățile matricei de influență.....	103
4.4	Procedee de rezolvare a sist.de ecuații liniare..	106
4.4.1	Metoda Cholesky.....	108
4.4.2	Considerarea condițiilor de margine.....	110
4.5	Determinarea liniilor echipotențiale.....	114
4.6	Determinarea liniilor de curent.....	116
4.7	Prezentarea programului de calcul MELFIN-1.....	118
4.8	Căi de utilizare eficientă a calculatorului.....	122
4.9	Propuneri pentru perfecționarea tehn. de calcul..	126
4.10	Concluzii parțiale.....	128
Cap.V.CONTRIBUTII CU PRIVIRE LA STUDIUL EXFILTRATIEI DIN CANALE		
5.1	Unele aspecte privind fenomenul exfiltrației ne- uniforme din canale în zona subterană.....	129
5.2	Exemplificare numerică.....	141
5.3	Aproximarea analitică a funcției	144
5.4	Modelul mișcării potențiale.....	147
5.5	Concluzii parțiale.....	150
Cap.VI.CONTRIBUTII LA STUDIUL ANALOGIC AL INFILTRATIEI DIN CANALE IN STRATURI ACVIFERE ALIMENTATE TEHNIC		
6.1	Generalități.....	151
6.2	Modele similare.....	152
6.3	Modele analogice.....	153
6.4	Modelarea plăcilor plane subțiri.....	154
6.5	Tipurile de analogii posibile.....	156
6.6	Condițiile de margine și corespondența lor cu modelul analog.....	157
6.7	Considerații de analiză dimensională și de analogie.....	160
6.8	Realizarea modelului sa structură.....	165
6.9	Cercetări experimentale prin analogie elastico- hidraulică.....	170
6.10	Concluzii parțiale.....	173
Cap.VII.CONCLUZII.....		
	Materialul fotografic.....	177/1
	Bibliografie.....	178

Cap.VIII.SUBLINIAREA UNOR ASPECTE SPECIFICE PRIVIND	
CALCULUL HIDROGEOLOGIC UTILIZIND METODA	
ELEMENTELOR DE FRONTIERA.....	177/3
Bibliografie.....	178
Bibliografie suplimentară.....	192

C A P I T O L U L I

STADIUL ACTUAL AL ÎMBOGĂȚIRII TEHNICE A STRATURILOR ACVIFERE

1.1. Generalități

1.1.1. Problema mondială a apei potabile

Creșterea rapidă în ritmul actual a populației globului, caracteristică epocii noastre, va ridica numărul locuitorilor pământului la 6 miliarde în anul 2000. [71]. Această creștere a populației cît și dezvoltarea vertiginosă tehnico-culturală, pe tărîm mondial precum și în țara noastră va reclama un consum mereu crescînd de apă. Rezervele surselor de apă folosibile fără eforturi mari financiare devin însă din ce în ce mai scăzute. Pentru satisfacerea cerințelor de apă, în ultimii ani se constată semnelări repetate ale specialiștilor, că problema epuizării resurselor de apă ale globului devine din ce în ce mai stringentă. Neliniștea lor este justificată avînd în vedere limitele cantitative ale surselor de apă și repartiția lor în timp și în spațiu cu totul în neconcordanță cu cerințele crescînde ale societății omenеști.

Este interesant de menționat semnelul de alarmă dat de profesorul de la Facultatea de științe din Paris, Raymond Furon, care arată că : „ Unii poate gîndesc că acestor 6 miliarde de oameni le va fi greu să-și procure hrana, dar nimeni nu bănuiește încă de viitoarea lipsă de apă” [71]. [209] . În lucrarea [71] se semnalează că 200 milioane de oameni din 75 țări în curs de dezvoltare sînt lipsiți de surse corespunzătoare de apă potabilă. La acestea mai trebuie să adăugăm și cazurile fortuite cînd colectivități întregi rămîn fără apă ca de ex. în timpul secetelor, inundațiilor, cutremurelor etc. Ca relevant se va menționa aici exemplul orașului Madras cu o populație de 3 milioane din sudul Indiei în care a bătuit o secetă catastrofală în luna iunie 1975 din cauza absenței unui muson. Nici o zecime din consumul de apă potabilă nu putea fi asigurat, autoritățile au introdus restricții alimen-

tind oraşul cu ape la trei zile doar pentru câteva ore şi plănind evacuarea unei mari părţi a populaţiei oraşului.

În monografia : „ Bilanţul mondial de apă şi resursele de apă ale globului” specialiştii sovietici prezintă că circa 97,5% din cantitatea totală de apă pe pământ revine mării şi oceanelor şi care se poate folosi în cazuri extreme pentru satisfacerea nevoilor omenirii.

Rezervele de apă potabilă reprezintă doar 0,5%. Resursele de apă s-au format în epoci milenare, dacă ele se folosesc nerăţional se deranjează echilibrul stabilit în natură. Refinoarea resurselor de apă potabilă - după monografia citată - se apreciază că se întâmplă anual pe o suprafaţă de 45.000 km², şi care este doar 0,05% din rezervele de apă.

Necesarul prezent de apă se evaluează după lucrarea menţionată la 2600 km³ pe an şi se prognozează pentru anul 2000 la 5000 km³.

Concluzia monografiei este că există suficiente rezerve de apă pe glob şi nici în viitorul depărtat omenirea nu va duce lipsă de apă însă cu o condiţie: intervenţia omului în circuitul natural al apei să fie rezolvată spre o gospodărire raţională a resurselor şi protecţie adecvată a lor.

Aici se menţionează deasemenea că la sfârşitul anului 1980 la o adunare specială de la ONU din New-York s-a anunţat oficial începutul Deceniului internaţional pentru dezvoltarea alimentării cu apă potabilă şi îmbunătăţirii condiţiilor sanitare. Deceniul are lozincă : „ Apă curată şi condiţii sanitare pentru toţi până la 1990 ”.

Ideea pentru un astfel de deceniu a apărut la mijlocul anilor 1970. În 1977 s-au detaliat şi s-au dezbătut măsurile la Conferinţa Naţiunilor Unite pentru resursele mondiale de apă de la Mar del Plata din Argentine.

Prin Deceniul susmenţionat s-a propus un plan pentru o serie de activităţi privind asigurarea aprovizionării populaţiei cu apă. Se amintesc mai jos câteva din cele mai semnificative:

- Populaţia lumii până la 1990 să fie aprovizionată cu apă potabilă de calitate bună

- Fiecare ţară va elabora un plan propriu de dezvoltare a alimentărilor cu apă potabilă, incluzând în planul economic

național de dezvoltare și etapele respective pentru alimentările de apă potabilă.

- Realizarea unor proiecte care să folosească tehnologiile cele mai adecvate și să se bazeze pe exploatarea condițiilor naturale a țării respective.

1.1.2. Orientări în dezvoltarea alimentărilor cu apă în România.

Înainte de al doilea război mondial, din cele 250 localități de tip orășenesc existente în țara noastră, numai 88 dispuneau de alimentări cu apă centralizate și numai 60 erau canalizate. În anul 1950, față de circa 12.000 km de străzi din aceste localități existau 3700 km rețea de distribuție a apei și 1960 km rețea de canalizare respectiv 23 și 16,5% [22] .

Dezvoltarea alimentărilor cu apă și canalizărilor face parte din procesul de industrializare a țării și de ridicare a nivelului de trai.

Un deosebit îmbold pentru realizarea acestor lucrări o dau preocupările conducerii de Partid și de Stat care prin rezoluții, directive și hotărâri au îndrumat și continuă să indice direcțiile principale spre care trebuie îndreptate eforturile specialiștilor în acest important domeniu de activitate.

Încă în 1970 în cuvântarea de la Plenara CC al PCR din 17-18 martie Secretarul General tov.Nicolae Ceaușescu arăta: Se știe că asigurarea apei, îndeosebi a celei potabile, devine o problemă de prim ordin pentru existența societății moderne. În acest sens avem o înaltă răspundere față de viitorul națiunii noastre ; tocmai această datorie impune să luăm din timp măsurile necesare bunei conservări și gospodăririi a apelor".

Grija conducerii partidului și statului, personal a tov.Secretar General Nicolae Ceaușescu în problema gospodăririi apelor se poate puncta în :

- 1 Directivele Congresului al XII-lea al Partidului Comunist Român cu privire la dezvoltarea economico-socială

e României în cincinalul 1981-1985 și orientările de perspectivă până în 1990 treceră un program clar de acțiune în vederea făuririi societății socialiste multilaterale dezvoltate în țara noastră [62]. Directivele congresului treceră sarcina și a unui vast program de procedură rațională a apelor țării noastre, pentru a asigura aprovizionarea cu apă a populației, industriei și agriculturii, de asemenea prevăd extinderea utilizării resurselor de apă subterană.

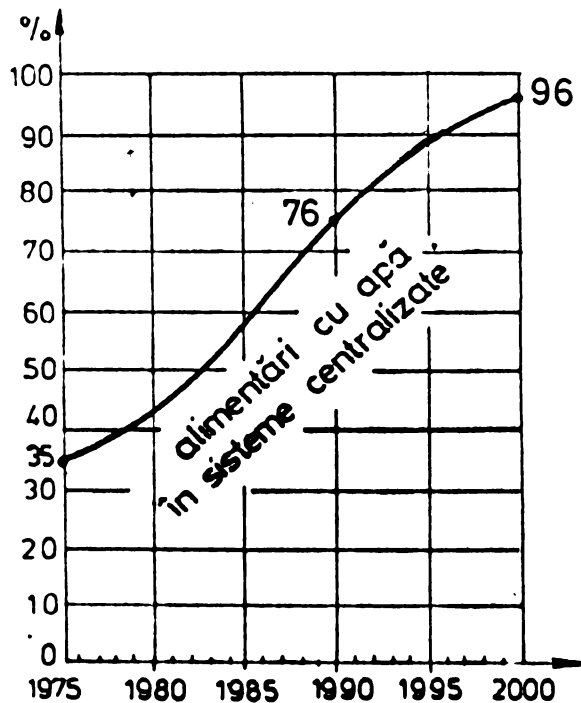
- 2 Programul PCR de făurire a societății socialiste multilaterale dezvoltate și înaintare a României spre comunism [160], în care se prevede asigurarea cantităților de apă necesară în deceniile care urmeză și vizează atât scoperirea deficitului de apă în sistemele actuale de apă cit și satisfacerea necesarului pentru cele 300-400 noi centre orașenești și a colectivităților rurale care vor gravita în jurul acestora.

- 3 Plenara Comandă a CC al PCR și a Consiliului Suprem al dezvoltării economice și sociale a României din 21-22 iulie 1975 [154] din care a reieșit necesitatea elaborării a unui program complex de perspectivă privind sistematizarea pe baze moderne, într-o concepție unitară, a întregii rețele hidrologice. regularizarea tuturor cursurilor de ape, amenajarea corespunzătoare a fiecărui bazin hidrografic care să permită să se facă față oricăror situații și să asigure necesarul de apă pentru nevoile populației, ale agriculturii și industriei.

- 4 Primul Congres al Consiliilor populare județene și al președințiilor Consiliilor populare municipale, orașenești și comunele din 4-6 febr 1976 care a aprobat „Programul național de perspectivă pentru amenajarea bazinelor hidrografice” [63] [17].

Realizarea completă a „Programului național de perspectivă pentru amenajarea a bazinelor hidrografice” este prevăzută pe o durată de 25-30 ani. În prima etapă, până în 1990 se prevede și asigurarea necesarului de apă potabilă și industrială. Astfel până în 1990 vor beneficia de alimentări cu apă în sisteme centralizate 76 la sută din populația țării, față de 35 la sută din prezent, dublându-se totodată consumul de apă pe locuitor. Se apreciază că prin studiile recente de prognoză economică de termenă, efectuată în țara noastră, că dinamica satisfa-

cerii cu instalații centrale de alimentare cu apă potabilă a populației României pentru perioada 1975 - 2000 este cea reprezentată în Fig.1.1 [200] [63] .



Proгноза satisfacerii cu instalații centrale de alimentare cu apă potabilă a populației României, pentru perioada 1975 - 2000

Fig.1.1

-5. Legea pentru adoptarea planului național unic de dezvoltare economico-socială a RSR pe perioada 1976-1980 votată de Marea Adunare Națională din 2 iulie 1976 [113] . În această lege la art.15 se precizează că se vor lua măsuri pentru gospodărirea judicioasă a resurselor de apă. De subliniat este alin. 5 al acestui articol în care se spune că se vor intensifica cer-

cetările pentru valorificarea resurselor de apă subterană.

Resursele subterane din țara noastră au fost evaluate la actualul grad de cunoaștere, la 8,3 miliarde m^3 /an. Din acesta, s-au captat și dat în folosință, până în anul 1979, oca 5,5 miliarde m^3 /an, adică aproximativ 2/2 din totalul resurselor subterane [171] , [51] .

6. În cadrul numeroaselor propuneri de cercetare din alte domenii în „ Programul Directivă de cercetare științifică și dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnic în perioada 1981 - 1990 și direcțiile principale până în anul 2000” este marcată și necesitatea înmagazinării apei în

subteran [161], [51] .

Din valoarea totală de cea 1000 miliarde lei a tuturor lucrărilor prevăzute în Programul național de perspectivă pentru amenajarea bazinelor hidrografice, cele pentru asigurarea apei - acumulări complexe, derivații și aducțiuni, alimentări cu apă - reprezintă jumătate. Este de aceea deosebit de important ca în activitatea instituțiilor de studii și proiectare, execuție și exploatare precum și a organelor de decizie în acest sector să se concentreze spre o folosire rațională a apei și economisirea ei.

În acest scop vor trebui rezolvate probleme de cercetare fundamentală pentru realizarea unor lucrări de amploare și de o tehnică nouă. Introducerea tehnicii noi va duce la promovarea la nivel superior a unor importante compartimente ale sistemelor de alimentări cu apă, obținându-se prin aceasta o sporire sensibilă a debitelor și o îmbunătățire a calității apei.

Dintre aceste probleme cele mai importante se referă la [50] , [51] :

- stabilirea condițiilor de îmbogățire artificială a straturilor acvifere cu apă de suprafață în zona captărilor vechi sau noi

- înmagazinarea sau stocajul unor volume mari de apă în bazine subterane naturale - când condițiile hidrogeologice locale permit acest lucru - în paralel cu înmagazinarea în lacuri de acumulare (naturale sau artificiale).

În țara noastră s-a aplicat îmbogățirea, exemplificările se prezintă la pct. 1.3.2.

În ceea ce privește stocajul în subteran, până în prezent în țara noastră nu s-au făcut studii în acest sens.

1.2. Necesitatea studierii problemei

1.2.1. Aspectul general al problemei

Îmbogățirea artificială a straturilor acvifere fiind un instrument complex care servește la mărirea capacității de exploatare a resurselor de apă, este considerat ca o ramură nouă a hidrotehnicii și a alimentării de apă. Scopul ei este mărirea

rațională a rezervelor straturilor subterane de apă. Dar îmbogățirea se poate folosi cel mai economic într-o concordanță și cu celelalte procedee de alimentare cu apă.

Din experiența acumulată pînă în prezent, importanța îmbogățirii straturilor scvifere este cea mai mare pentru alimentările cu apă a localităților, deoarece prin acest procedeu se poate obține din apele superficiale o cantitate mare de apă potabilă de calitate bună și ieftină. În general, siguranța și mărirea rezervelor de apă subterană după acest procedeu este mult mai mare, decît obținerea apei potabile după metodele clasice din apele superficiale. Această siguranță are deja un rol din ce în ce mai hotărîtor deoarece datorită creșterii rapide a gradului de poluare a apelor superficiale, tratarea lor devine din ce în ce mai costisitoare și neeficientă.

Teoria procesului de filtrare și de purificarea apei în teren încă nu este complet elucidată. Îmbogățirea cu apă a straturilor scvifere este un proces complex și în faza de proiectare cere analizarea cu mult discernămint a unor aspecte care se influențează reciproc [60] .

1.2.2. Conceptul de îmbogățire tehnică a straturilor scvifere.

În primul rînd trebuie subliniat că pînă în prezent standardele noastre nu semnalează termenul de „îmbogățire artificială”, terminologia nu era pusă la punct, deși începe să apară în literatura noastră de specialitate. Totuși se poate aminti STAS-ul nr.4621-79 unde apare termenul de „alimentare artificială [35]”, fiind definit ca introducerea voluntară de apă într-un scvifer pentru mărirea afluxului sau pentru ridicarea nivelului apelor subterane. Consultînd publicațiile apărute pînă în prezent, se constată un număr de 21 termeni utilizați de diverși autori, menționate în tabelul nr.1.1

Si în literatura străină există o diversificare a terminologiei mai ales în limba germană și franceză.

Astfel există:

- în limba rusă

- 1 Обогащения водносной слои [23]
- 2 Искусственного обогащения ресурсов подземных вод [96]
- 3 Магазинирование подземных вод [193]

- în limba germană

- 1 Künstliche Infiltration [116]
- 2 Grundwasseranreicherung [21], [24], [37], [76], [117], [118], [119], [120]
- 3 Künstliche Grundwasseranreicherung [19], [103], [175]
- 4 Künstlich angereicherte Grundwasser [164]
- 5 Infiltrat aus den Oberflächengewässern [123]

- în limba engleză

- 1 Grund water recharge [30]
- 2 Recharge of water course aquifer [184]
- 3 Artificial replenishment [84]

- în limba franceză

- 1 Alimentation artificielle des nappes souterraines [9]
- 2 Eaux souterraines artificielles [10]
- 3 Realimentation artificielle [84]

- în limba maghiară

- 1 Telajvízdúsítás [14], [60], [60], [83], [141], [143], [144], [188]

Termeni utilizați de diverși autori în publicațiile apărute în R.S.R

Nr. art.	Termenul folosit	Aperiție în bibliografia art.	Nr. art.	Termenul folosit	Aperiție în bibliografie
1	Imbogățirea și regenerarea strazelor acvifere freatice	[67]	12	Sporirea potențialului hidro a unor strazte de apă subterane	[200]
2	Imbogățirea și reconducerea strazelor acvifere subterane-freatice	[67]	13	Sporirea potențialului surselor subterane	[50]
3	Imbogățirea strazelor acvifere	[50], [52], [92]	14	Reprovizionarea artificială a apelor subterane	[203]
4	Imbogățirea artificială a strazelor	[50], [95], [152], [157]	15	Improspătarea artificială a surselor subterane	[168]
5	Imbogățirea artificială a apei freatice	[107]	16	Reimprospătarea resurselor de apă subterană	[111]
6	Imbogățirea artificială a pânzelor de apă subterană	[25], [153]	17	Realimentarea artificială a pânzelor de apă	[87], [206]
7	Imbogățirea artificială a strazelor de apă subterană	[126]	18	Alimentarea artificială a strazelor acvifere	[32], [50], [180]
8	Imbogățirea potențialului strazelor acvifere	[50]	19	Alimentarea artificială a surselor subterane	[50]
9	Imbogățirea acviferelor	[52]	20	Alimentarea artificială a acviferelor subterane	[25]
10	Infiltrarea artificială a apei în strazele acvifere	[181], [201]	21	Reînnoirea substanțiale a pânzelor subterane	[25]
11	Stratură îmbogățite	[133]			

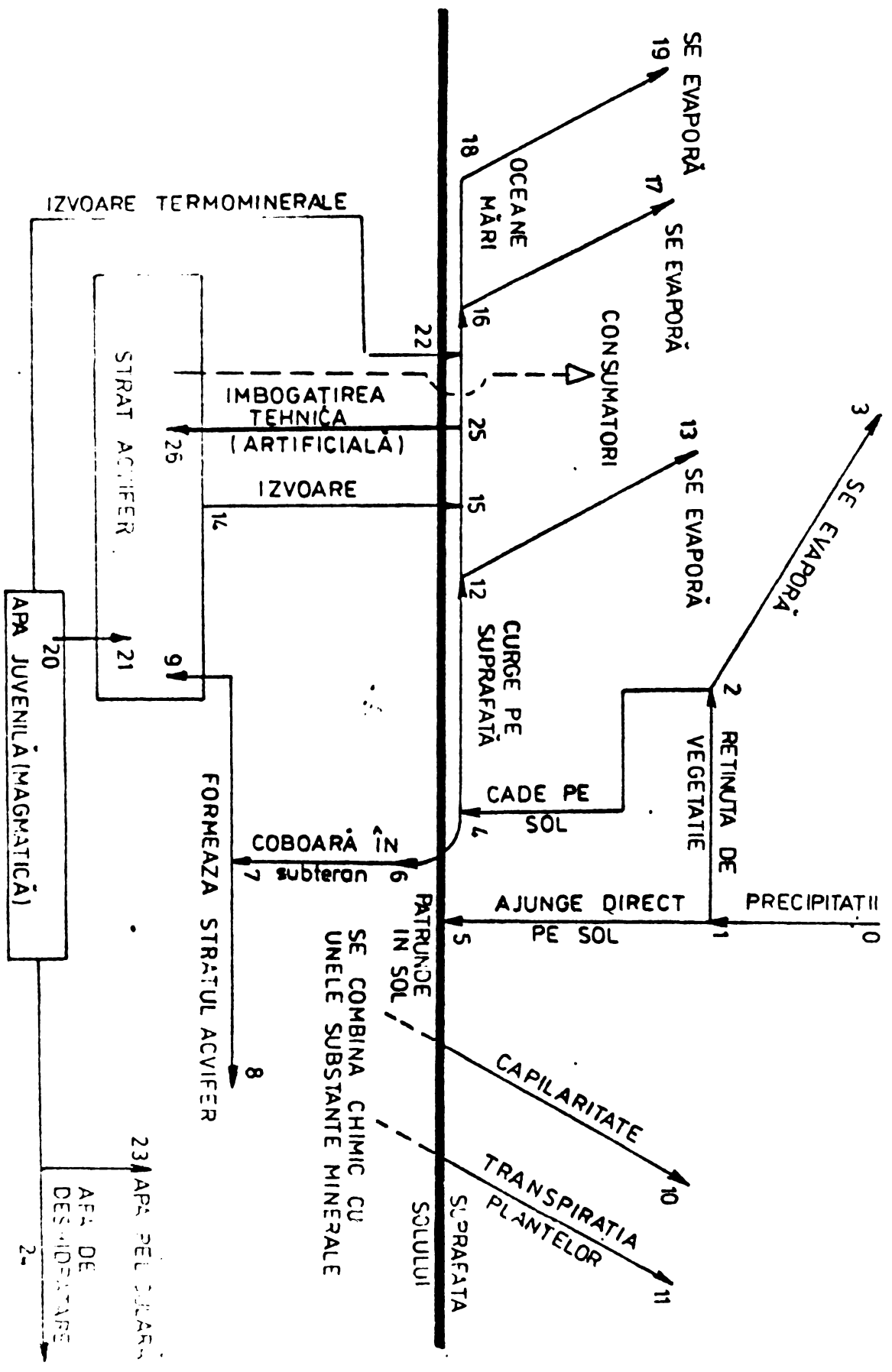


Fig.1.2 LOCUL IMBOGATIRII TEHNICE (ARTIFICIALE) IN CIRCUITUL APEI DIN NATURA

Explicația acestei mari diversificări se poate datoră că acest termen s-a introdus relativ recent și rapid în vocabularul tehnic și fiecare autor l-a formulat după propria sa denumire. Apariția relativ recentă a termenului în cauză subliniază încăodată nputatea noțiunii, așa cum a fost semnalată în 1.2.1, că este o ramură nouă a hidrotehnicii.

În privința noțiunii de "înbogățire artificială sau tehnică" se poate conchide că aceasta este un procedeu de intervenție a omului în circuitul apei din natură.

Funcție de condițiile date în natură, apa se află într-un echilibru cantitativ și calitativ labil. Din numeroasele cercetări realizate pînă în prezent se poate afirma că una din schemele cele mai complete care explică circulația apei este cea prezentată pentru prima oară de acad.Ciocîrdel R., [46] așa după cum se vede în fig.1.2 și care a fost completată de autorul acestei lucrări.

În fig.1.2 fiecare traseu de circuit natural al apei este numerotat stît începutul cît și sfîrșitul lui. Dacă din condițiile naturale date rezultă că stratul scvifer nu mai satisface cerințele cantitative-calitative ale consumatorilor, atunci se intervine forțat în circuit prin trasee artificiale scurtcircuitînd o parte a circulației apei.

Deci traseele 7-9 și 20-21 sînt insuficiente cantitativ și calitativ. Pentru echilibrarea situației se alimen-tează stratul scvifer prin traseul 25-26 din ape superficiale. Totalitatea demersurilor în acest scop, mijloacele tehnice și metodele folosite constituie înbogățirea artificială a stratelor scvifere.

De fapt înbogățirea artificială a stratelor scvifere este un proces de filtrare naturală și lentă, dirijată, fără a tulbura echilibrul din natură.

Se propune folosirea termenului de "înbogățirea artificială sau tehnică a stratelor scvifere" avînd definiția următoare: Procedeu prin care cu mijloace adecvate se realizează infiltrarea apei din surse de suprafață în straturile scvifere în scopul măririi artificiale a debitului sau a acumulării apei acestora.

Prinul termen care apare la noi în țară este de "înbogățirea straturilor acvifere" (nr.3 din tabela 1.1) în 1956 fiind introdus de Jura.C. și Giurconiu, [92] .

Ulterior Jura.C., reconsideră acest termen și adoptă pe cel de "înbogățirea artificială sau tehnică a straturilor acvifere" (nr.4 din tabela 1.1).

Apariția în literatura noastră de specialitate a 21 termenii pentru o singură noțiune impune precizarea termenului printr-un viitor standard.

Noua definiție și oficializarea denumirii noțiunii va permite o mai bună conlucrare între specialiști care participă la cercetarea, proiectarea, execuția și exploatarea lucrărilor de alimentare cu apă.

1.3. Scurtă privire istorică asupra înbogățirii tehnice a straturilor acvifere.

1.3.1. Situația pe plan mondial.

Prima înbogățire artificială a fost amenajată în Egipt dealungul Nilului [13] . Necesitatea luării măsurilor pentru preîntâmpinarea anilor de secetă nu este nouă în valea Nilului, ceea ce se întâmplă astăzi a avut loc și în secolele trecute. În epocile secetoase se infiltrează apa în subteran prin aceasta mărindu-se rezerva freatică. Această tehnică servea scopurilor agricole. În Tunisia, pe baza fotografiilor aeriene, luate din avion, se poate observa și astăzi urmele unei înbogățiri datată probabil din timpul imperiului roman [60].

În S.U.A. (Arizona) și în partea de nord a Mexicului înbogățirea s-a aplicat de peste 100 ani. În aceste cazuri s-a construit praguri în albia râurilor și prin care s-a acumulat apa în zone subterană constituită din nisipuri - pietrișuri. În perioade secetoase din aceste acumulări apoi s-au extras cantitățile de apă necesare mai ales pentru nevoile potabile.

În vestul Europei la sfârșitul sec XIX s-au făcut cercetări teoretice și s-au obținut o serie de rezultate în legătură cu înbogățirea artificială.

La începutul sec XX s-a început construirea unor

instalații de îmbogățire artificială a strzelor frestice dealungul anului, unde această metodă practică dealungul a peste 70 ani a devenit cea mai importantă și predominantă în alimentările cu apă potabilă.

Prima publicație în legătură cu îmbogățirea artificială a strzelor frestice apare în 1810 despre descrierea unei galerii pentru infiltrare amenajată pe o insulă de pe lângă orașul Glasgow Prin infiltrarea apei superficiale s-a mărit debitul galeriei. În 1821 se amenajează bazine de infiltrare la Toulouse pe malul râului Garonne. În 1888 în orașul Stralsund se practică îmbogățirea printr-o infiltrare cu ajutorul a două puțuri, lucrare citată și de către Thien. În 1896 se amenajează în orașul Göteborg bazinele de infiltrare pentru îmbogățire care și în prezent sînt încă în stare de funcționare [60],[180] .

Alimentările cu apă din sursele superficiale devine din ce în ce mai problematică din cauza poluărilor cu apele reziduale, fenomen ce apare în zona Ruhr-ului. Pentru satisfacerea cerințelor ce au crescut brusc, în această zonă o rezolvare optimă a constituit introducerea îmbogățirii artificiale practicate de la începutul sec XX [60] .

În [10] se menționează titlul a două publicații apărute în această perioadă: Thien, A., 1897 : Die künstliche Erzeugung von Grund-Wasser.

Richert, J.G., 1900 : Les Eaux Souterraines Artificielles, Stockholm.

În Cehoslovacia prima îmbogățire artificială a strzelor frestice s-a făcut pe un teren experimental în 1929 - 1930. Debitul infiltrat a fost de 8 l/sec. Apoi în 1937 s-a executat lângă Presov o altă instalație. Debitul nominal de 42 l/sec. după cinci ani de funcționare a scăzut la jumătate. Apoi în 1953 s-a pus în funcțiune instalația de la Sojvice de 2,1 mc/sec. Capacitate care apoi ajunge la 0,3-1,0 mc/sec.

În ultima vreme, în unele țări îmbogățirea artificială a apei a devenit o metodă importantă pentru obținerea apei posibile. De exemplu, în SUA, în statul California, în anul 1954 au funcționat 87 de instalații, în Suedia, în anul 1951, zece

instalații, iar în anul 1954, 20 instalații (în Suedia apă potabilă obținută prin îmbogățirea artificială a apei constituie 14 % din producția de apă) [83] .

De asemenea există realizări importante în îmbogățirea artificială a apei subterane în Olanda, Franța, Germania, Spania, Polonia, Finlanda, Ungaria [143] [141] [116] [76] [67]

Este interesant de menționat lucrarea [9] care de fapt este un inventar al instalațiilor de îmbogățire artificială a straturilor acvifere, întocmită de Asociația Internațională de Hidrologie Științifică în 1970.

Lucrarea cuprinde date privind 109 de astfel de instalații din 16 țări. Cele mai multe după această publicație 30 sînt cele din Anglia.

Pentru fiecare instalație se prezintă:

A) Generalități, localizarea și planul de situație al instalațiilor.

B) Scopul urmărit care cuprinde:

1. prelevarea unui debit superior capacității normale a stratului subteran

2. acumularea apei, ca ulterior să se poată permite prelevarea a unor cantități incomparabile cu cele naturale

3. refacerea straturilor supraexploatate

4. epurarea naturală a apelor de rîu

5. constituirea unei bazine de apă dulce împotriva avansării apelor sărate sau impurificate

6. stenuarea vînturilor

7. alte scopuri

Se poate constata de exemplu că în RFG scopul urmărit se referă la punctele 1,2 și 4, adică pentru alimentări cu apă potabilă și mai puțin pentru apă industrială. Se întîlnesc mai rar probleme de tipul 3. Aproximativ de tip asemănător sînt scopurile urmărite în alte țări, ca Africa de Sud, Maroc, Cehoslovacia, Ungaria și chiar Suedia.

O situație diferită este în Anglia unde scopul principal al acestor instalații este cel de răcire a apelor. În Olanda, alături de scopurile indicate de numerele 1,2 și 4, se întîlnesc numeroase instalații pentru protecție contra invaziei apelor

oceanice sărate. Același scop se regăsește și la instalațiile din Israel, cu mențiunea că aici se adaugă și scopul prinderii în subteran a unei bune părți din undele de viitură, lucru explicabil în condițiile de ariditate din zona respectivă.

În SUA scopurile urmărite sînt multiple și scoperă aproape întreaga gamă indicată anterior.

În Jamaica și Mexic se întîlnesc instalații pentru îmbogățirea unor strate carstice sau pentru scopuri multiple. De asemenea, instalațiile din Franța se disting printr-o mare varietate a scopurilor urmărite, în special cele de la punctele 1,2 și 4 iar altele pentru scopuri particulare, ca de exemplu îmbogățirea unei pînze freatice drenate de un canal de fugă, sau injectarea de apă caldă pentru a nu se supraîncălzească emisarii.

C) Aspectele economice sînt foarte dificile datorită influenței circumstanțelor locale.

D) Motivul alegerii soluției - în lucrarea citată se prezintă diverse comparații cu alte procedee clasice.

E) Condițiile hidrogeologice. Se poate arăta că de exemplu în Germania cea mai mare parte a instalațiilor de îmbogățire a straturilor svifere folosesc pietrișuri diluviale, cele de pe Rin și afluenții săi. Altele sînt în nisipuri cuaternare (Berlin, Frankfurt). În Australia se utilizează structuri recente, iar în Anglia cea mai mare parte a îmbogățirilor se fac în cretacic, în terenuri secundare, în gresii din carbonifer sau pietrișuri recente.

În Franța varietatea structurilor geologice este foarte mare, ca de ex: terenuri recente, cretacic, silurian. În Ungaria instalațiile sînt în cuaternar. În Israel se folosesc faciesuri cretacice și plioleistocenice. În Olanda se folosesc evident terenuri sedimentare recente, iar în Africa nisipuri. În Suedia cele mai răspîndite sînt pietrișurile diluviale. În SUA se întîlnesc structuri recente: pliocen, pleistocen, depozite glaciare. Cîteva îmbogățiri se fac în bazalte și în cretacic.

F) Originea și natura apei folosite diferă de la o instalație la alta în funcție de scop și condițiile locale.

G) Tehnica utilizării este partea cea mai importantă și se referă la lucrările executate cât și la încercările preliminare.

H) Tratatul prealabil al apei și problemele de colmatare - probleme mult discutate - și sînt examinate pentru fiecare caz prezentat din lucrarea citată în funcție de condițiile specifice particulare întîlnite.

Privind elaborarea planurilor de amenajare din Anglia, în [165] se menționează că pe lîngă problemele administrative și economice care trebuiesc analizate, mai apar următoarele aspecte tehnice:

- Acumularea subterană în straturi acvifere - potențial și utilizare optimă

- Metode adecvate pentru îmbogățirea artificială a straturilor acvifere și prognozele acestei încărcări.

Surse bibliografică citată [168] precizează de asemenea că în Anglia se fac studii pentru a analiza condițiile în care se poate utiliza pe scară largă îmbogățirea artificială a surselor subterane pentru a face apel în măsură mai mare la acumularea subterană.

1.3.2. Situația în țara noastră

În condițiile creșterii rapide a populației și a industriei din RSR se impune asigurarea surselor de alimentare cu apă, metode îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere reprezentînd o soluționare economică a acestei probleme.

Încă în 1956 Jura, C., și Giurconiu, M., de la Institutul Politehnic Timișoara studiază unele aspecte teoretice ale condițiilor de mișcare a apei în cazul folosirii procedurii de îmbogățire artificială a straturilor acvifere [92]. Autorii, pe lîngă prezentarea aspectelor teoretice, semnalează deja în 1956 că acest procedeu își găsește încă o restrînsă aplicare în tehnică și încurajează extinderea folosirii acestei metode prețioase de procurare a apei pentru alimentări.

În 1964 fostul ISCH în referatul [32] prezintă metodele îmbogățirii prin :

- infiltrație în strat cu ajutorul bazinelor, șanțuri canale atunci când stratul acvifer este la suprafață sau aproape de suprafață

- injecție prin foraje verticale când stratul acvifer este acoperit de un strat impermeabil.

Referatul semnelet analizează fiecare din aceste metode, exemplificându-se aplicarea lor în diverse cazuri.

Tot în [32] se prezintă rezultatele încercărilor experimentale efectuate de ISCM în anul 1961 pe o zonă situată la sud de orașul Agnita pe partea dreaptă a râului Hirtibaciu în aval de confluența cu pârul Coveș, în vederea îmbogățirii stratului acvifer, prin devierea albiei actuale a pârului Coveș.

Debitul necesar alimentării cu apă potabilă și industrială a orașului Agnita, cerut prin temă, a fost de 35 l/sec.

Pompările experimentale au semnelet un debit numai de 25 l/sec, pe o lungime de captare de 900 m.

A apărut necesitatea măririi debitului prin infiltrarea apei în subteran din pârul Coveș. Pe teren s-au făcut verificări printr-o tranșee în lungime de 12,00 m cu secțiune trapezoidală de 4,50 m la suprafață și 0,50 m la fund, adâncimea, 300 m.

Stratificația în tranșee a fost:

0,20 - 0,80 - sol vegetal - praf nisipos cafeniu

0,80 - 1,80 - nisip mediu fin, slab prăfos

1,80 - 3,00 - nisipuri

După executarea tranșeei s-a turnat apă cu un debit constant de 3,0 până la 2,80 l/sec obținându-se un nivel constant în tranșee și alimentând astfel stratul acvifer. Îmbogățirea stratului acvifer prin crearea unui canal care a deviat pârul Coveș apare astfel realizabilă. Distanța față de linia de captare la care s-a creat această nouă albie a pârului Coveș a fost fixat la cel puțin 100 m, pentru ca infiltrarea apei de suprafață în subteran să nu denatureze calitatea biologică a apei.

485940
357 G

Din punct de vedere chimic și bacterologic în urma analizei probelor, apa se încadrează în limitele excepționale de potabilitate după literatură, lipsind complet colii și nu s-a semnalat prezența de Fe și Mn.

În concluzie, necesarul de apă potabilă și industrială de 35 l/sec se preconizează a fi satisfăcut de debitul de 25 l/sec, obținut din linia de captare formată din nouă puțuri paralele cu râul Hirtibaciu, diferența de 10 l/sec urmând deci a fi realizată în urma îmbogățirii stratului prin devierea pârului Coveș.

În [32] , [126] , [180] se prezintă alimentarea cu apă potabilă a fabricii de zahăr și a localității Luduș. La instalația construită în 1959 s-a preconizat un dren ce trebuia să asigure 32 l/sec, concepută inițial pentru captarea apelor subterane fără o îmbogățire artificială a acestora. Urmărind evoluția cantității de apă obținute, s-a observat în decursul anilor o continuă scădere a acestora, motiv pentru care s-a adoptat soluția de îmbogățire a stratului scvifer prin bazine de infiltrație.

Apa este captată din râul Mureș și ajunge după o tratare cu cōgulanți și decantare la bazinele de infiltrație. Aceste bazine în număr de 5, sînt calculate ca filtre lente, cu o formă trapezoidală, lungime 70 m, lățimea 7,00 m la bază, talazuri 1/1. Fundul bazinului este acoperit cu nisip filtrant de 40 cm grosime avînd următoarele caracteristici granulometrice: $d_{10} = 0,25$ mm, $d_{60} = 1$ mm, $d_{85} = 5$ mm, iar taluzurile sînt acoperite cu dale de beton.

Periodic stratul filtrant este curățat astfel încît se asigură stît o bună circulație a apei prin el cît și evitarea unei eventuale colmatări a stratului scvifer.

Stratul scvifer din lunca Mureșului este format din pietrișuri cu nisip și nisipuri grosiere cu d_{50} variînd între 1 mm și 5 mm.

Bazinele sînt amplasate la o distanță de aproximativ 200 m de râul Mureș și la circa 40 m paralel cu drenul de captare ce are lungimea de 700 m.

Eficiența îmbogățirii artificiale din zone de captare Luduș a fost verificată experimental prin modelare cu ajutorul

metodei EGDA de către ISCH București în 1965. [181].

Cercetările întreprinse privind calitatea apei captate [187] seanalesază apariția indicatorilor de impurificare în apa potabilă și ca acestea se datorește pe de o parte distanței insuficiente dintre bazinele de infiltrație și drenul colectiv și pe de altă parte faptului că instalația este amplasată pe un teren inundabil al Mureșului.

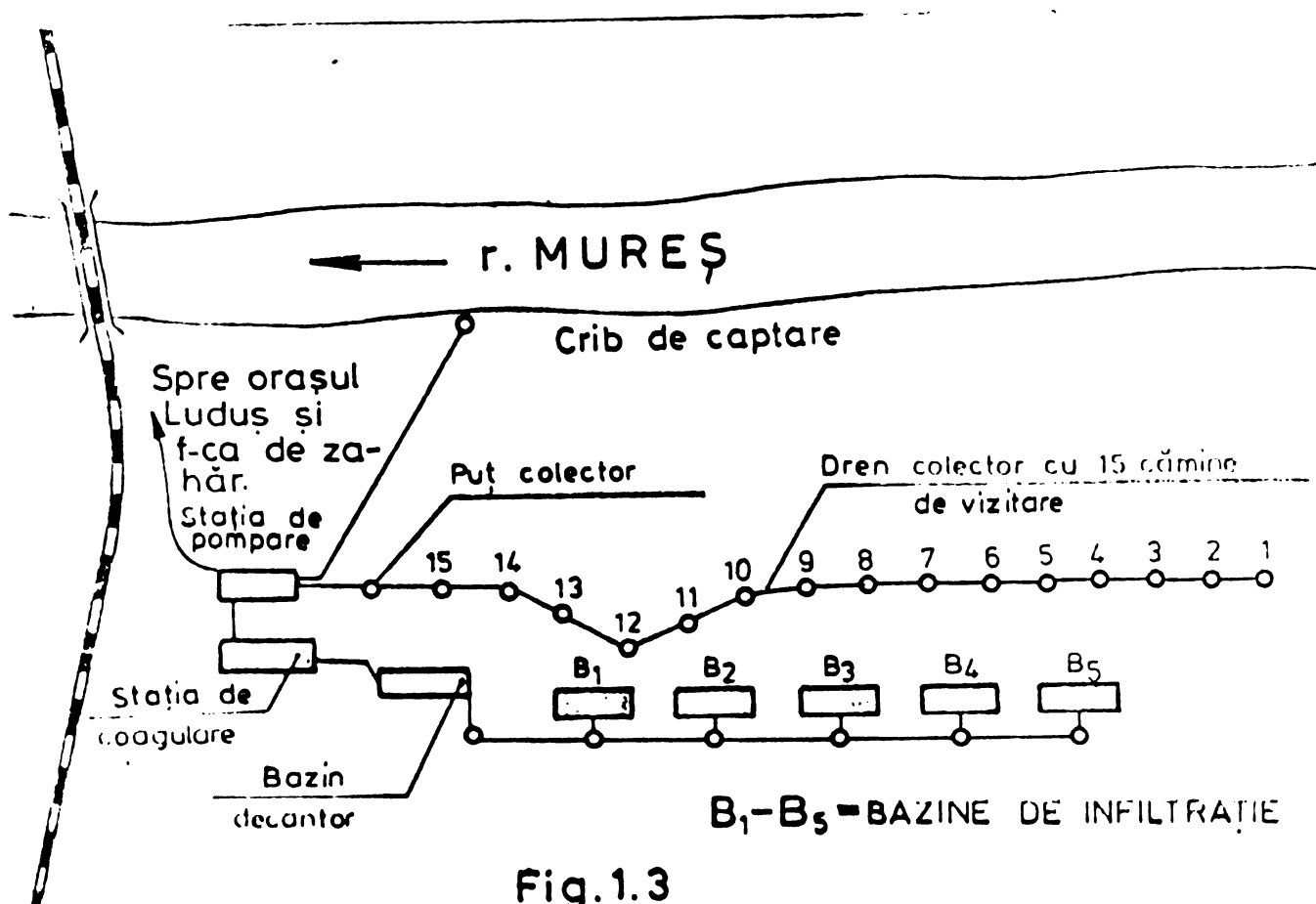
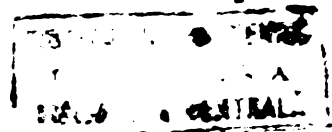


Fig.1.3

ALIM. CU APA LUDUȘ. INSTALAȚIA DE CAPTARE

Captarea Mihoveni-Suceava la puțurile forate ale captării din zona comunei Mihoveni de pe malul stîng al râului Suceava [67],[126],[180] s-a constatat reducerea debitului de la 80 l/sec inițial la 45 l/sec, datorită colmatării malului. Orașul Suceava avînd astfel un debit nesatisfăcător a necesitat unele amenajări de sporire a debitului captat. Pentru remediere s-a recurs la soluția de sporire artificială a debitului. Deoarece pătul aluvian era de grosime apreciabilă s-a preconizat



executarea de bazine de infiltrare. Apa captată din râu este pompată în trei bazine amplasate la circa 100 m, în spatele frontului șizului de 32 puțuri de captare și este infiltrată în sol cu viteză de circa 0,50 m/zi; bazinele au 3 m adâncime cu un pat drenant de 30 cm grosime. Debitul captării a sporit la cea 100 l/ sec însă din cauză că decantarea apei nu se făcea în bune condiții, bazinele se colmatau destul de repede iar curățirea lor a dat complicații în exploatare.

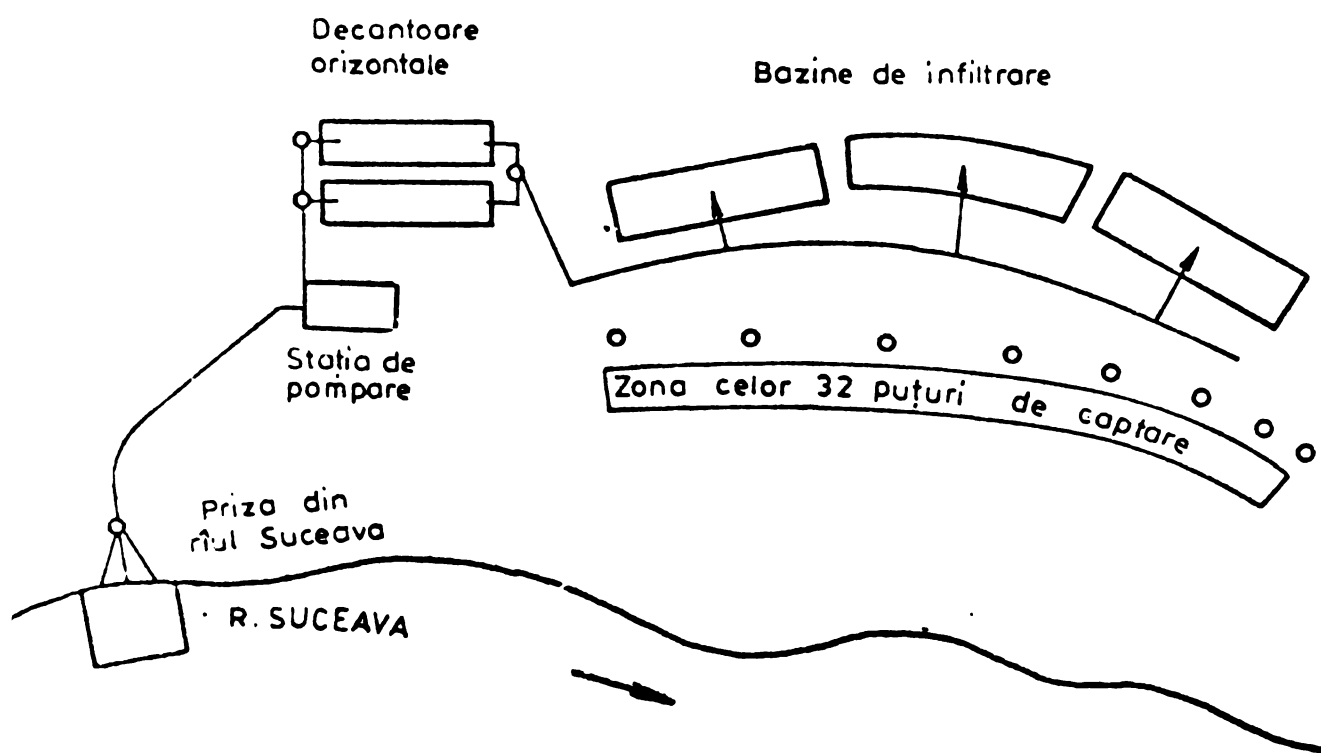


Fig.1.4

PLAN DE SITUAȚIE AL ZONEI DE CAPTARE MIHOVENI-SUCEAVA

Captarea din șesul aluvionar al Crișului Repede pentru alimentarea cu apă a orașului Oradea.

În cadrul alimentării cu apă a acestui centru urban au existat următoarele instalații pentru captarea apei subterane [67], [87] :

1) O captare prin drenuri de adâncime și puțuri, o stație de pompare construită în anul 1896, amplasată într-o buclă a râului Crișul Repede. Această captare, în lungime totală de circa 300 m parțial colmatată, furnizează un debit de 6 l/sec.

2) O captare prin drenuri și o stație de pompare executată în anul 1910 amplasată într-o meandură mai pronunțată în amonte de prima captare, care furnizează un debit de cca. 250 l/sec.

3) O nouă captare prin drenuri cu diametrul $D_n = 500-1200$ mm în lungime de cca. 2,50 km, amplasată pe malul drept al râului Crișul Repede și realizată în perioada 1961-1963. Această captare a furnizat în perioadele cu debite reduse în râu, un debit mai mic decât cel prevăzut prin proiectele de lucrări.

Reducerea debitului în decursul exploatării captării noi s-a datorat în principal următorilor factori:

- a. colmatarea malului râului pe suprafață de infiltrație
- b. exploatarea permanentă a captării la capacitatea disponibilă
- c. reducerea coeficientului de permeabilitate în perioadele reci datorită creșterii vâscozității apei
- d. execuția drenului la o adâncime mai mică decât cea prevăzută în proiect
- e. modificarea traseului albiei râului în unele zone datorită neexecutării lucrărilor de regularizare prevăzute inițial în proiecte.

Intrucât debitul furnizat de captările menționate nu satisfaceau nevoile de apă ale orașului, s-au propus mărirea capacității actualelor captări de pe malul drept al râului prin executarea unui număr de 9 bazine de infiltrație având dimensiuni de cca 200×25 m². Adâncimea medie a bazinelor este de 2,20 m și sînt așezate la circa 100-150 m de drenul existent. Pe fundul bazinelor de infiltrație s-a prevăzut un strat de nisip de 25 m grosime. Pentru o mai bună funcționare a bazinelor de infiltrație s-a prevăzut o decantare a apei brute și tratarea ei printr-o stație de coagulant.

Prin executarea acestor bazine de infiltrație se preconizează suplimentarea debitului furnizat de captările existente cu circa 600 l/sec.

Alimentarea cu apă a oraşului Cluj [67] [180]

Zona pentru alimentarea cu apă a oraşului Cluj este cuprinsă între comune Floreşti şi Cluj şi cuprinde şesul aluvionar al râului Someş. Şesul aluvionar este meandrat, râul avînd un curs sinuos. Apa freatică este cantonată în stratul de pietrişuri şi bolovănişuri în masă de nisipuri grosiere şi medii. Captarea apei se face prin 57 de puţuri situate perpendicular pe direcţia râului într-o zonă meandrată. Pentru ridicarea nivelului hidrostatic şi o dată cu acesta mărirea debitului, s-a executat pe râul Someş praguri de fund care au dus la o îmbogăţire a stratului acvifer şi la o mărire a capacităţii de debitare.

Aducîndu-se o ridicare a nivelului apei implicit s-a procedat şi la îmbogăţirea artificială a stratului acvifer.

Un alt mod de îmbogăţire de la această captare este folosirea unor bazine de infiltraţie.

Bazinul de infiltraţie care alimentează captarea este amplasat pe malul drept al Someşului la o distanţă de 50,00 de ml.

Bazinele de infiltraţie care alimentează captarea II-a este situat pe malul stîng al Someşului la o distanţă de cca. 100,0 m de rîu.

Bazinele de infiltraţie au fost realizate prin simpla îndepărtare a solului vegetal şi executarea unor diguri pentru menţinerea apei în incintă.

S-au realizat astfel : un bazin cu suprafaţă de 18.000 m² de formă trapezoidală la captarea I şi două bazine de suprafaţă de 10.500 m² de formă dreptunghiulară la captarea II-a.

În imediata apropiere a Someşului (la cca. 5m) pe malul drept, s-a executat un bazin decantar cu suprafaţa de 1000 m² în care apa ajunge printr-o conductă de preaplin de la instalaţia de pompare situată pe malul Someşului. Din decantar, de asemenea preaplin, apa este dusă la bazinele de la captarea I şi pe sub rîu la captarea II-a.

Infiltraţia se produce direct prin stratul de nisip prăfos ce constituie fundul bazinelor.

După realizarea instalaţiilor de îmbogăţire artificială descrise mai sus intrarea lor în funcţionare, în anul 1965

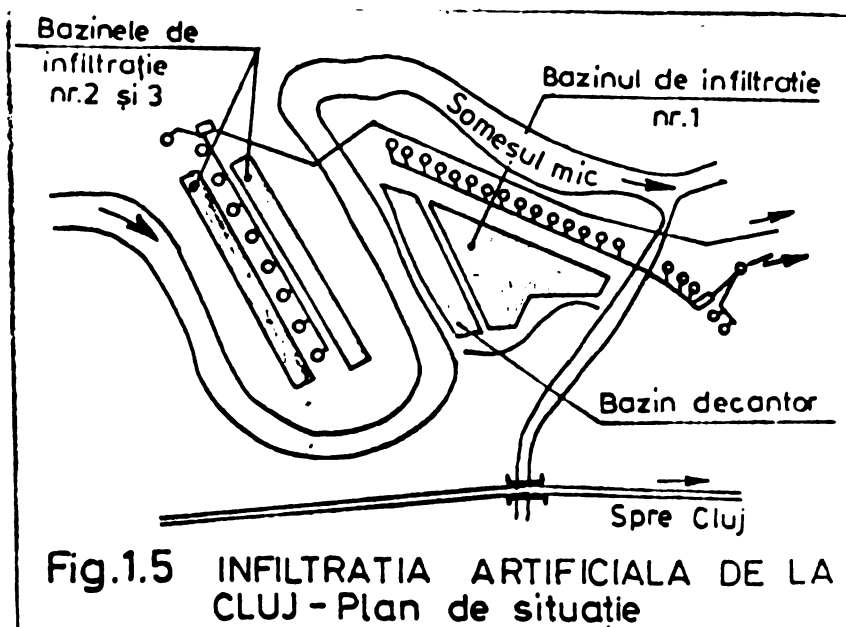


Fig.1.5 INFILTRATIA ARTIFICIALA DE LA CLUJ - Plan de situație

Institutul de Studii și cercetări hidrotehnice din București a urmărit lămurirea unor probleme legate de eficiența instalațiilor de alimentare artificială a stratului acvifer freatic de la Cluj, Luduș și Suceava. Perioada de studiu s-a extins din septembrie pînă în noiembrie, iar

amenajările existente la aceste captări nu au permis cunoașterea debitelor infiltrate și captate, deci problema randamentului a fost rezolvată numai indicativ.

Rezultatele cercetărilor sînt prezentate în [180]

Dintre acestea relevăm :

Instalația			
Indicatori	Cluj	Luduș	Suceava
Coeficienți de filtrare în m/zi	80-160	50-120	50 - 700
Randamentul instalației	41% în lunile oct-nov. 38,8% în lunile iulie.oct.	73%	48%
Indicatori bacteriologici coli/l	100-10000	4000-550.000	10.000
ape de suprafață			
ape captată	0-16	0-40	sub 10

1.4. Probleme îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere, obiectul congreselor de specialitate și a manifestărilor internaționale.

Se pot enumera succint următoarele:

1. Asociația Internațională de Distribuirea Apei (International Water Supply Association prescurtat IWSA) a organizat în 1964 la Stockholm Congresul internațional de alimentări cu apă. Una din temele speciale a acestui Congres a fost și problema îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere [83],[201] În baza unui referat documentat [84], a rezultat că în etapa actuală, când metodele de tratare a apei de suprafață sînt foarte bine puse la punct, scopul principal al îmbogățirii artificiale a apei în straturile acvifere, trebuie să fie crearea de rezerve de apă în subteran, care evită pierderile prin evaporare. Raportul general [83] [84] subliniază ca metoda îmbogățirii artificiale sînt totdeauna atunci cînd nivelul apelor subterane scade dăunător alimentării cu apă a unei colectivități. Prin metoda amintită se urmărește mărirea cantității de apă captate.

2. Congresul al II-lea privind calitatea și tehnologia apei, Budapesta 1970, s-a ocupat și de aspectele îmbunătățirii calității apei în procesul de îmbogățire, pe lîngă prezentarea unor aspecte rezultate din exploatarea unor instalații de îmbogățire [144].

3. Probleme îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere a fost pusă din nou pe ordinea de zi a Congresului al IX-lea al Asociației Internaționale de Distribuire a Apei de la New-York din 1972 [206].

4. Conferința internațională „Progresele tehnicii de alimentare cu apă din 1973 de la Varna a dezbătut 5 teme complexe. Una din acestea a fost și folosirea îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere [24]. Din referatul general a reieșit că:

- îmbogățirea artificială este un procedeu tehnologic de tratare a apei cu aspecte multiple și foarte complexe.

- îmbogățirea artificială vine în concurență cu alimentarea regională și este mai economică și mai sigură decît aceasta

- în problema regenerării stratului filtrant colmatat

se subliniază folosirea utilajelor. Se prezintă un estfel de utilaj conceput în R.D.G.

5. Conferința Națiunilor Unite asupra apei Mar del Plata - Argentina 14-25 martie 1977, a stabilit un plan de acțiune în vederea colaborării internaționale pentru păstrarea rezervelor de apă. Totodată s-a accentuat necesitatea de a pune la dispoziția țărilor în curs de dezvoltare, pentru satisfacerea cerințelor lor de apă potabilă, tehnologii moderne. Din discuțiile purtate a reieșit că din populația lumii cca. două treimi nu dispun de rezerve necesare de apă. Astfel s-a convenit că perioada 1980-1990 să fie declarată ca deceniul internațional al alimentărilor cu apă potabilă.

De asemenea la această conferință în privința eficienței în regularizarea și distribuția resurselor de apă s-a hotărât ca să se exploreze potențialul apelor subterane, modalitățile de utilizare a stratelor acvifere pentru acumularea și distribuția apei și de folosire corelată a resurselor de apă de suprafață și subterană.

În tematica foarte vastă și complexă a Conferinței a fost inclusă și îmbogățirea artificială a stratelor de apă subterană. Au fost dezbătute referatele:

- „Intensificarea utilizării resurselor de apă subterană în zonele aride și semiaride; îmbogățirea artificială a stratelor de apă subterane și exploatarea apelor subterane din rocile dure”, prezentată de Suedia și

- „Refacerea artificială a stratelor de apă subterană din delta Burdekinului” prezentată de Australia.

6. Simpozionul Internațional „Imbogățirea artificială a stratelor frestice”. Dortmund RFG 14-18 mai 1979 care a fost organizată de secția de hidrologie a Societății Geologice din RFG, împreună cu Comitetul de resort al UNESCO. La simpozion au participat 500 de specialiști din 35 de state. S-a remarcat marele interes prezentat pe tărâm internațional a problemelor specifice îmbogățirii artificiale. În concluzie Simpozionul a subliniat creșterea continuă a importanței îmbogățirii artificiale pentru următoarele scopuri:

- îmbunătățirea calității apei la trecerea prin subteran
- retenția subterană și gospodărirea apei subterane precum și protecția apei subterane de avarii
- reîncărcarea și reînnoirea rezervelor statice subterane.

7. Conferința „Încărcarea apelor subterane din iulie 1980 Townsville Australia, concluzionează că această operație artificială depinde de două variabile fundamentale ; de condițiile climatice și de factorii geologici.

1.5. Avantajele îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere

Metoda prezintă în general avantaje putând realiza următoarele: [95],[126],[123].

1. Permite înmagazinarea apei în strat pentru a putea fi folosită în perioadele de secetă sau de consumuri de vârf

2. Mărește capacitatea captărilor existente din subteran

3. La acumulări subterane nu se necesită strămutări de calitate, de căi de comunicație sau defecțiuni de suprafețe din circuitul agricol și forestier cerute la amenajarea lacurilor de acumulare de suprafață.

4. Permite transportul apei fără construcții artificiale între locul de infiltrare și captare (uneori această distanță poate fi apreciabilă).

5. Face posibil ca să se acumuleze ape suplimentară provenită din viitură, în subteran, evitându-se inundarea temporară a unor suprafețe agricole.

6. În comparație cu lacurile de acumulare la suprafață, unde evaporarea poate să atingă pînă la 1000 mm/an la înmagazinările subterane practic nu există pierderi, neexistînd acest fenomen. Acest lucru este important mai ales pentru țările în curs de dezvoltare care suferă din cauza lipsei de apă.

7. Acumulările subterane sînt insensibile la

variații de temperatură ale mediului ambient, pot livra apă la o temperatură constantă în orice anotimp.

8. Îmbunătățește calitatea apei prin acțiunea fizică și biologică a mediului subteran. În anumite situații acest mediu poate juca rolul unei stații de tratare.

9. În fine mai trebuie amintită și latura estetică. La înmagazinări subterane gradul de umplere al lor nu este vizibil pe câtă vreme la lacurile de suprafață, la coborîrea nivelului, fișia malului descoperit este neestetică, fiind acoperită cu nămol, corpuri plutitoare etc.

1.6. Dezavantajele îmbogățirii tehnice a straturilor scvifere [68] [126]

1. Necesită studii și cercetări de teren voluminoase pentru depistarea și îngrădirea spațiilor din subteran adecvate îmbogățirii

2. Dacă zona îmbogățită se află la o mică adâncime, variațiile mari ale nivelului din subteran sînt defavorabile.

3. În anumite situații reclamă o tratare prealabilă a apei înainte de îmbogățire.

4. Greutăți în exploatare prin colmatarea stratului filtrant.

1.7. Perspective îmbogățirii tehnice a straturilor scvifere

Rezolvarea teoretică a problemelor de îmbogățire artificială a straturilor scvifere subterane sînt foarte variate și dificile [155] [60] de asemenea soluționarea oricărui caz concret reclamă studii și cercetări complexe. Aceste cercetări trebuie să lămurească rolul și ponderea a mai multor factori aflate într-o interdependență reciprocă. Sînt necesare studii hidrologice, hidrogeologice, hidrobiologice, hidrochimice, de hidraulică subterană, de tehnologie tratării apei în situații de laborator, semiindustrial sau stații de pilot.

Deoarece îmbogățirea apei este o ramură relativ tânără a hidrotehnicii, elaborarea metodelor de cercetare sînt încă în fază de început, de aceea este important de a studia fenomenele de apă la lucrări deja existente, de a urmări exploatarea lor, precum și a studia datele concrete din literatura de specialitate. Atît pe plan mondial cît și în țara noastră se arată o tendință de dezvoltare a acestei ramuri a hidrotehnicii, ce se poate constata prin publicațiile de specialitate, mai puține în deceniul trecut, dar din ce în ce mai numeroase în perioada actuală. Apoi se poate arăta că pe lîngă dezvoltarea lucrărilor hidroedilitare clasice și aceste noi tipuri de lucrări au cunoscut o amploare crescîndă ajungîndu-se la rezultate apreciabile în această direcție.

Pentru realizarea unor viitoare lucrări eficiente se reclamă continuarea și aprofundare cu multă insistență în munca de studiu și cercetare a multiplelor aspecte ale îmbogățirii artificiale.

Prezenta lucrare își are scopul de a lămurii unele aspecte ale acestor probleme.

O direcție principală de dezvoltare a alimentărilor cu apă va fi și sporirea capacității de debitare al unor strate de apă subterane prin crearea de rezerve subterane folosind metoda îmbogățirii artificiale în special în zonele cu captări existente. Prin aceasta se va impune nu numai o exploatare rațională a surselor de apă, dar și preconizarea unor lucrări pentru îmbogățirea sau refacerea stratelor scvifere subterane.

Privitor la perspectiva în viitor a metodei se amintește că la Conferința Națiunilor Unite asupra apei de la Mar del Plata din Argentina 14-25 Martie 1979 s-a recomandat ca „să se promoveze cu prioritate cercetarea științifică și în domeniul îmbogățirii stratelor subterane”.

Se poate aprecia că în anii următori se vor ivi numeroase probleme pentru executarea de noi captări din surse subterane îmbogățite artificial [155]. Captările de ape subterane sînt preferabile celor de suprafață pentru apele potabile și pentru unele industrii, justificat prin faptul că apele subterane implică prelucrări mai puține, au condiții biologice mai favorabile și

oferă o protecție mai mare. La acestea se mai poate sublinia și faptul că aproape în totalitatea cazurilor, asemenea captări furnizează o apă la un preț de cost mai scăzut decât captările apelor de suprafață.

C A P I T O L U L II

ANALIZA PROBLEMEI TEHNICE ALE ÎMBOGĂȚIRII STRATURILOR ACVIFERE

2.1. Definiția îmbogățirii tehnice a straturilor acvifere

Așa cum s-a prezentat la cap.1 îmbogățirea tehnică a straturilor acvifere este un proces de intervenție a omului în circuitul apei din natură. În sensul strict reprezintă un procedeu prin care cu mijloace adecvate, se realizează infiltrarea apei din surse de suprafață în straturile acvifere, în scopul măririi artificiale a debitului acestora. Definiția de mai sus a fost formulată în redactarea de revizuire a STAS-ului 3378-68.

Afară de această definiție se mai amintesc și alte formulări.

Astfel Öllös în [149] precizează că îmbogățirea artificială a straturilor acvifere legată de alimentarea cu apă potabilă are un dublu scop:

- cantitativ, că prin acest procedeu se poate mări rezerva din subteran, prin acumulările subterane cantitatea de apă exploatabilă devine mai constantă în timp

- calitativ, că prin infiltrarea apei brute și în general printr-o reținere pe un timp mai îndelungat în subteran ea devine mai bună.

În [83] privind problemele dezbătute la Congresul de la Stockholm se arată că îmbogățirea artificială a straturilor acvifere se poate folosi nu numai pentru alimentările cu apă potabilă și și pentru alte scopuri de gospodărire a apelor. Astfel de ex. se poate folosi pentru menținerea la un nivel constant

a apei subterane la lucrările de fundare a construcțiilor, sau pentru ridicarea nivelului apelor subterane pentru scopuri agricole, [193] [180] de asemenea se poate folosi pentru protejerea poluării unei zone din subteran de ape reziduale.

În [21] se citează cazul de folosire bilaterală a canalelor la regularizarea apelor subterane. Principiul este arătat în fig.2.1.

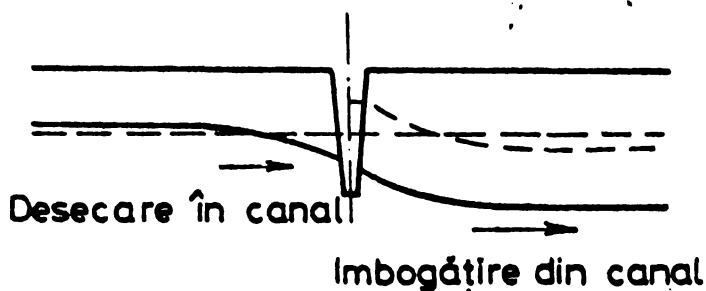


Fig.2.1 ROLUL DUBLU AL UNUI CANAL

Partea stângă din fig.2.1 se referă la perioada de funcționare ca și desecare, când apa în exces se infiltrază, iar apa subterană se scurge înspre canalul de desecare. Diferența de cotă dintre nivelul de desecare și nivelul apei în canal, a fost de

0,2-0,3 m la terenuri nisipoase și 0,3-0,4 m la terenuri coezive.

Trecerea de la desecare la îmbogățirea stratului de apă în subteran se petrece atunci când pe o perioadă mai mare evapotranspirația este mai ridicată de cât precipitația. Atunci scade alimentarea canalului din subteran. Scade de asemenea și nivelul apei în canal, desecarea încetează. Dacă acum se alimentează canalul cu un debit dintr-o sursă de suprafață, începe fenomenul de îmbogățire prin infiltrarea apei din canal înspre zona subterană (partea dreaptă din fig.2.1). Diferența de nivel dintre nivelul apei din canal și nivelul apei subterane are același ordin de mărime ca și la desecare.

Ca rezumare, autorul prezentei teze subliniază că prin îmbogățire se mărește cantitativ artificial rezerva de apă subterană, totodată se îmbunătățește calitativ apa superficială prin infiltrarea în subteran.

Deci îmbogățirea simultan răspunde scopurilor de ridicare cantitativă și calitativă, de tratarea apei. În alimentările cu apă se folosesc ambele aceste funcțiuni, iar în cazurile date specifice se va adopta cu precădere una din acestea cea care este mai necesară.

2.2. Zone recomandabile pentru folosirea îmbogățirii artificiale.

Condiție primordială a oricărei instalații de alimentare artificială este o bună capacitate de absorbție a straturilor superioare din sol. Din această se citează conurile de dejecție ale râurilor californiene, care cuprind o mare proporție de material grosier, ele pot fi alimentate artificial pe o perioadă îndelungată fără dificultăți. De asemenea, esker-ii suedezi constituiți din depozite morenice, depozitele fluviale din Germania sau nisipurile dune din Olanda, se pretează la această alimentare.

În țara noastră cele mai bune zone pentru îmbogățirea artificială sînt conurile aluvionare ale râurilor care coboară din Carpați.

În [25] se prezintă o hartă cu repartiția acestor zone și se trage concluzia că în general ele coincid cu zonele cu puternice folosințe de apă urbane și industriale. De asemenea autorii lucrării [25] propun studierea posibilităților de utilizare a îmbogățirilor în aceste zone de aglomerație urbană și industrială.

2.3. Metodele și mijloacele îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere.

În prezent sînt cunoscute două metode; [83] , [155] , [60] , [141] .

2.3.1. Metoda directă este cea cînd o apă de suprafață se introduce într-un teren permeabil prin bazine, lacuri, șanțuri, canale, puțuri sau galerii prin infiltrare.

Metoda directă se poate subîmpărți folosind construcții

- de suprafață
- subterane
- complexe

a) Sistemul de îmbogățire prin construcții de suprafață.

La acest sistem un rol hotărâtor îl are stratul filtrant amenajat corespunzător și solul necesar care se află imediat sub acest strat filtrant. Se deosebesc următoarele tipuri:

a.1) prin inundare. În acest caz în general se folosește apa extrasă direct din cursul natural de apă și care primește o purificare minimă. Din experiența exploatarea acestor tipuri de îmbogățiri a reieșit că un strat relativ mic de apă produce o infiltrație optimă și că se solicită o investiție mică pentru amenajarea acestor tipuri de îmbogățiri. Ca dezavantaj al acestor tipuri se amintesc lucrările frecvente de întreținere, cu deosebită grijă, a suprafeței filtrante [60].

a.2) prin ploaie artificială.

Apa stropită la suprafața terenului se infiltrează și după parcurgerea unui anumit drum se poate capta prin puțuri sau galerii.

Metoda prezintă o serie de avantaje, picăturile de apă sînt aerate și prin aceasta se mărește cantitatea de oxigen dizolvat, se ameliorază gustul apei. Pentru micșorarea colmatării și înămolirii terenului filtrant este necesar aplicarea unei preepurări, prin aceasta se înlătură și pericolul împotmolirii rețelei de aspersoare.

Ca dezavantaje ale metodei se poate aminti cerința unei suprafețe mari filtrante și care trebuie să fie scoasă din circuitul agricol precum și greutatea în exploatare pe timp de iarnă din cauza temperaturilor scăzute.

a.3) prin bazine

Bazinele sînt cele mai des folosite în tehnica îmbogățirii.

La exploatarea bazinelor apar aceleași dificultăți ca și la filtrele lente. În timpul iernii stratul de gheață, iar vara înmulțirea algelor pune probleme serioase. De asemenea la exploatarea bazinelor trebuie ținut cont că de fapt se produce un fenomen de filtrație lentă, și în decursul acestui proces pot fi introduse în subteran substanțe ce dăunează gustului și mirosului apei. De aceea se impune ca apa ce se filtrează din bazine să fie în prealabil purificată printr-o pretratare adecvată.

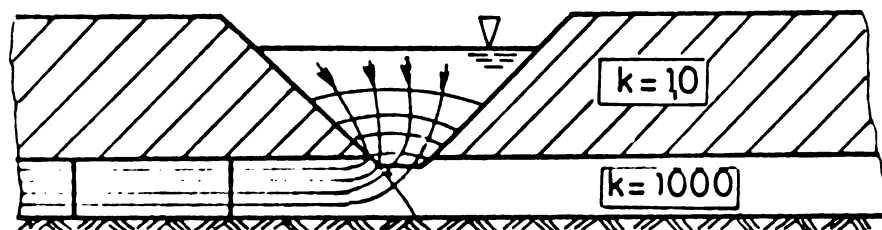
a.4) prin șanțuri și canale

Spre deosebire de bazine care sînt amenajate pe două dimensiuni, acestea se dezvoltă pe o dimensiune pe lungime și care depășește considerabil lățimea lor.

Pentru asigurarea unei filtrări uniforme se necesită o alimentare continuă a canalelor prin pompare sau gravitațional. Este rațional ca fundul canalului să atingă nivelul terenului permeabil. În general canalele de filtrare nu se umplu complet cu nisip filtrant deoarece procesul de filtrare se manifestă atât pe fundul cât și pe taluzurile canalelor [60].

În fig.2.2 se prezintă două cazuri extreme și anume:

a) infiltrare numai prin fundul canalului



b) infiltrare numai prin taluzul canalului

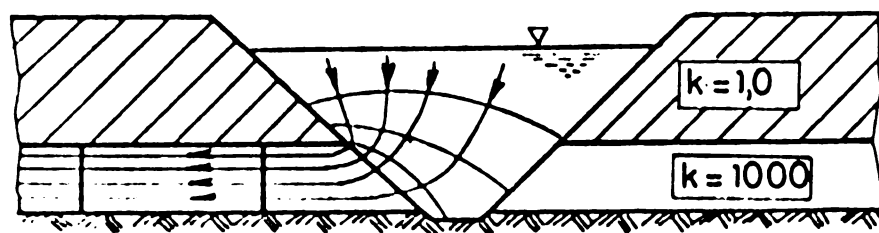


Fig. 2.2 REțelele hidrodinamice la o infiltrare dintr-un canal de îmbogățire artificială a stratului acvifer

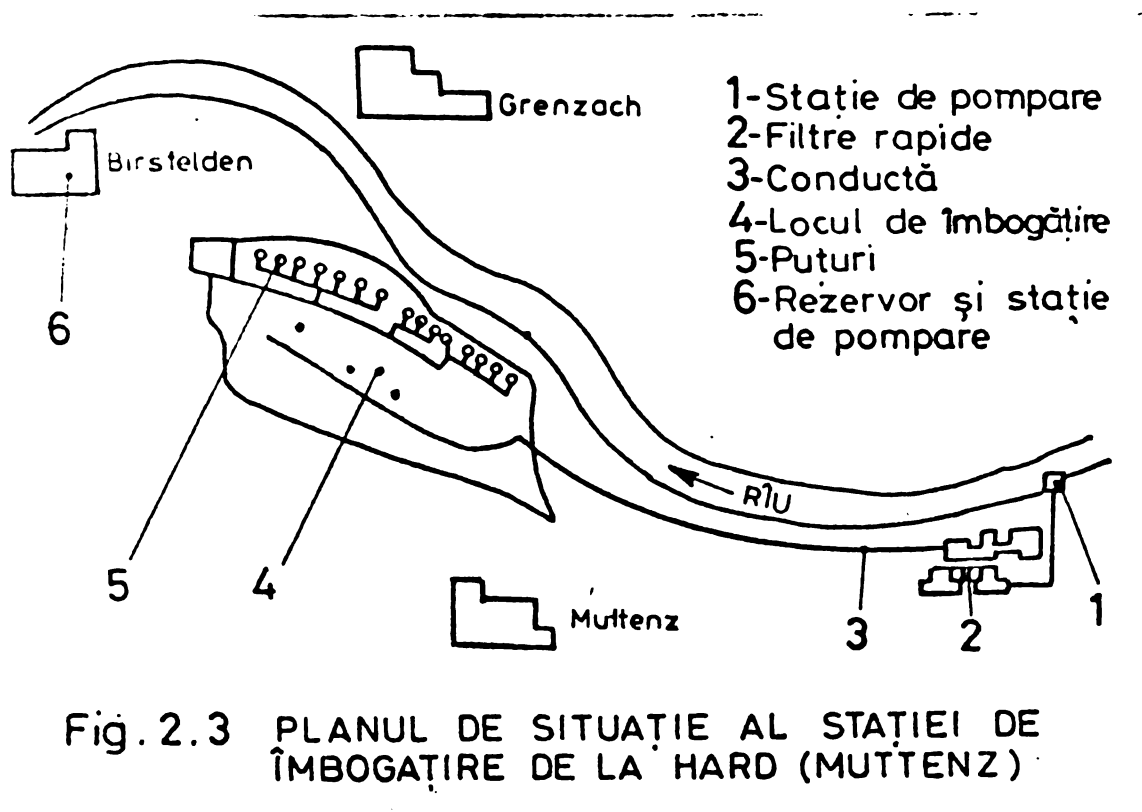
liniile echipotențiale și de curent pentru a) infiltrarea exclusivă numai prin fundul canalului și b) idem numai prin taluzul canalului.

Această metodă de îmbogățire este foarte economică și indicată atunci cînd terenul permeabil se află la o mică adîncime.

In continuare se prezintă câteva exemple de îmbogățiri executate unde se folosesc canale

Instalația de îmbogățire de la Hard (MuttENZ) din cadrul uzinei de apă din Basel [141] .

Din cauze impurificărilor industriale calitatea apei Rinului este improprie pentru o îmbogățire, ca stare apa se tratează în prealabil într-o stație de filtre rapide, cazul de la Hard (MuttENZ) (Fig.2.3).



Apa tratată ajunge la instalația de îmbogățire printr-o conductă de beton $\varnothing 1250$, capacitatea de tratare fiind 173.000 mc/zi. Îmbogățirea se face în șanțuri pe o lungime de 3500 m și din 4 lacuri. Amenajarea șanțurilor respectiv a lacurilor pentru îmbogățire este ilustrată în Fig.2.4.

Stratul filtrant de la fundul șanțurilor este mai fin, iar cel de la fundul lacurilor este mai grosier. Din fig.2.4 se poate observa că filtrarea din lacuri este mai ridicată decât din șanțuri din cauză că stratul de coc 30 m avînd o permeabilitate mai bună permite și o viteză de filtrare mai mare. Aceasta precum și porozitatea ridicată a stratului filtrant al lacurilor permite acumularea unei cantități crescute de depuneri și ce

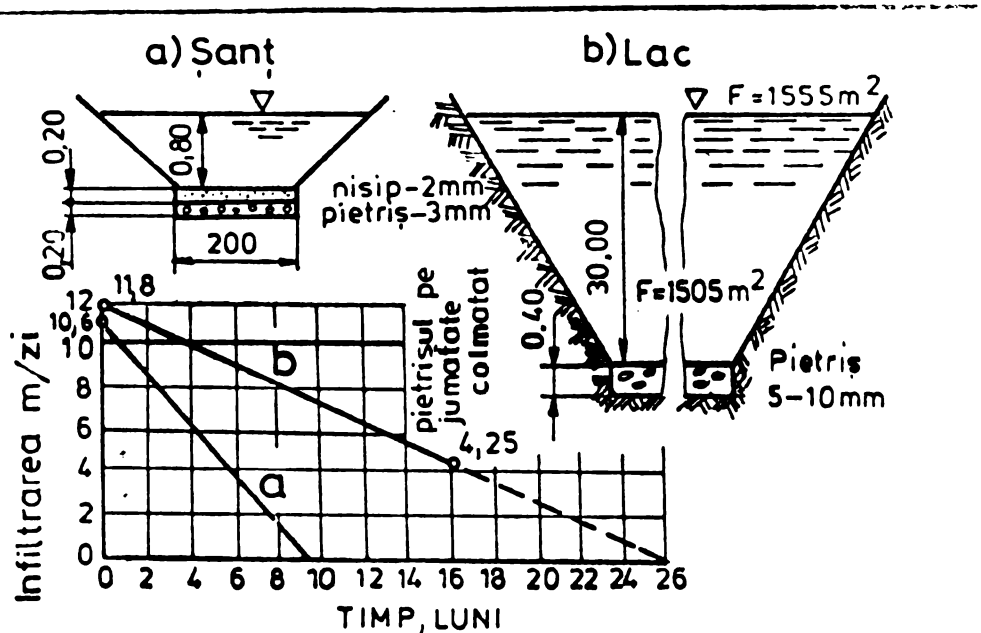


Fig. 2.4 PRINCIPIUL DE ALCĂTUIRE AL ÎMBOGĂȚIRII DE LA HARD (MUTTENZ) CU SANTURI ȘI LAC

strage după sine o perioadă mai mare de funcționare între curățiri. La sfârșitul perioadei de funcționare materialul filtrant este scos din lac, spălat și apoi reșezat din nou.

La o distanță de cca. 400-500 m de la îmbogățire se captează apa prin 26 de puțuri. Calitatea apei este excepțională, numai din motive de siguranță se procedează și la o clorinare. Se menționează de exemplu câteva cifre privind calitatea apei : consumul de permanenat 34 mg/l, oxigenul dizolvat 79%, nr. de germeni $1,7 \text{ m}^3/\text{cm}^3$

La instalația de îmbogățire de la Hamburg [60]. Pe un areal permeabil de 14 m grosime a fost amplasat o rețea de canale pentru îmbogățirea acestui strat. Canalele sînt alimentate cu apă brută prin pompare din Elba. Nu s-a prevăzut pretratarea apei brute. Există un număr de 272 de puțuri pentru captarea apei din strat amplasate pe o lungime de 7 km. Pe șabbele părții a liniei puțurilor la cca. 50 m sînt amplasate canalele pentru îmbogățirea stratului, sînd lățimea de 6,00 m. De la aceste canale apa ajunge în aproximativ 60 de zile la linia de captare a puțurilor. Productivitatea instalației 90.000-100.000 mc/zi, temperatura apei brute oscilează între

0 și 20°C, iar al apei extrase din **treceul** îmbogățit rămâne între 9 și 10°C.

Instalația de **îmbogățire** de la Goldstein [60] are o productivitate zilnică de 16 mii mc. Această cantitate de apă se filtrează în stratul freatic cu ajutorul unui canal de 200 m lungime. Canalul este situat la 1 km de la linia de captare a puțurilor după o filtrare de 38 zile (20 m) apa era lipsită de coli, după 140 zile (75 m) a avut o temperatură constantă, iar după 190 zile (100 m) a dispărut mirosul, gustul și culoarea neplăcută a apei brute.

Instalația de la Jansteen [60] are canale de îmbogățire cu o lățime de 500 m la fund și 28 m adâncime. Pentru rezolvarea favorabilă a acestei îmbogățiri s-au efectuat studii pe model. În baza experimentărilor și a considerațiilor teoretice s-a hotărât amplasarea de canale de îmbogățire situate la câte 100 m de ambele părți ale liniei de captare a puțurilor.

Pentru controlul funcționării și exploatării instalației au fost practicate 5 de puțuri de observație. Cu ajutorul acestora se veghează asupra caracteristicilor chimice și bacteriologice ale apei. S-a constatat că prin îmbogățire nu se modifică indicatorii de calitate a apei subterane inițiale naturale neîmbogățite.

Instalația de îmbogățire de la uzina de apă din Amsterdam [14] .

Apa brută se extrage din Rin printr-o stație de pompare situată la Jutphass (lângă Utrecht). Datorită încărcării puternice a apei brute a Rinului se aplică imediat o pretratare care constă dintr-o filtrare rapidă urmată de o **clorinare**. Apoi apa este trimisă pe terenul de filtrare, unde sînt numeroase șanțuri cu o adâncime mică.

Astfel apa brută a fluviului devine apă freatică artificială.

După o staționare de 2-3 luni în subteran, printr-un sistem de drenaj apa este captată și i se aplică o tratare ulterioară care constă din aerare, filtrare cu cărbune activ, filtrare rapidă și lentă precum și o **clorinare** de siguranță.

Acest exemplu ilustrează că se poate folosi și o apă

superficială puternic poluată pentru îmbogățire. Degradarea calității apei Rinului este un proces imposibil de oprit. În general cresc substanțele organice putrescibile care reclamă un consum foarte ridicat de oxigen și care amenință apariția unui proces anaerob. Pentru eliminarea apariției procesului anaerob și pentru asigurarea unei calități ireproșabile a instalației de îmbogățire^{se} necesită o pretratare a apei. Tratarea ulterioară după procesul de îmbogățire este necesară pentru eliminarea sărurilor de fier și mangan dizolvate în apă subterană, tratare care constă din aerare și filtrare.

b) sistemul de îmbogățire prin construcții subterane.

În acel caz când stratul superficial al terenului este impermeabil și primul strat permeabil este la o așa adâncime încât fundul unui bazin sau canal de îmbogățire nu atinge acviferul este rațional de a se amenaja un sistem de îmbogățire subteran.

Se deosebesc următoarele tipuri de îmbogățire prin construcții subterane:

b.1) prin puțuri.

În general puțurile pătrund pînă la stratul impermeabil și funcționează ca puțuri absorbante. Puțurile pot fi alcătuite prin forare sau prin săpare. Acest din ultim caz este mai avantajos pentru exploatare și întreținere datorită diametrului mai mare, sînt ușor accesibile și pot fi ușor curățite. Ca dezavantaj se amintește costul lor mai ridicat și nu se execută decît pe adâncimi relativ reduse.

Durata de funcționare a puțurilor, randamentul lor, depinde în mod hotărîtor de calitatea apei brute de aceea este necesar de a se pune un mai mare accent pe pretratarea apei în special la îndepărtarea suspensiilor.

Față de construcțiile de suprafață, puțurile sînt mai recomandabile deoarece:

- permit îmbogățirea terenurilor cu o permeabilitate mai redusă

- apa se poate introduce și prin presiune în stratul îmbogățit

- necesită o suprafață mult mai mică decît bazinele de infiltrare.

b.2) prin drenuri ^{de} galerii

Acestea se amplasează în general la o adâncime de 0,5-1,0 m pe ariile unde amenajarea și funcționarea bazinelor sau a canalelor nu mai este economică.

Ca exemplu se citează galeria folosită pentru îmbogățirea stratului freatic de la alimentarea cu apă a orașului Frankfurt [60]. Lungimea galeriei este 3 km fiind amplasat într-un nisip din cuaternar. Nivelul apei subterane se află la 12 km sub nivelul suprafeței terenului. Axa galeriei de $\varnothing = 2,00$ m se poartă la 8,0 m deasupra nivelului apelor subterane. Capacitatea instalației este de 30.000 mc/zi.

b.3) prin puțuri cu drenuri radiale

Acestea se compun dintr-o cameră de distribuție, executată sub formă unui puț săpat din care diverg o serie de drenuri radiale așezate pe unul sau pe mai multe rânduri. Drenurile sînt construite din tuburi metalice perforate și se execută prin forare orizontală cu ajutorul unor dispozitive speciale. Un exemplu de astfel de îmbogățire este folosit la alimentarea cu apă a Barcelonei [60].

b.4) prin retenția apei subterane

În cazul văilor care în zona talvegului au un teren aluvionar granular poros acestea se pot baza cu diguri transversale care pătrund pînă la roca sănătoasă sau terenul impermeabil. Această retenție subterană astfel creată în general se umple cu apă pe timpul ploilor [60]. Barajul nu permite alimentarea din retenția creată a unui rîu situat în zonă pe perioada secetoasă. Această rezolvare este indicată mai ales la țări cu climă caldă și secetoasă, deoarece datorită ascensiunii capilare mici evaporarea este redusă și apa reținută nu se ridică pînă la nivelul suprafeței terenului. Negulescu [130] citează exemplul clasic de înmagazinare a apei subterane în galeriile care alimentează orașul Weisbaden. De asemenea exemplifică înmagazinarea în urma executării unor diafragme baraj subterane, metodă care este practică în URSS. În [143] se citează cazul unei înmagazinări subterane din Texas obținută cu ajutorul unor ecrane pereți din noroi betonitic.

c) Sistemul de îmbogățire complex

În acest sistem de îmbogățire se folosesc concomitent cele două sisteme; cel de suprafață și cel subteran, ele completându-se reciproc.

Ca exemplu se poate cita îmbogățirea de la Leyden, care are ca scop mărirea stocului de apă subterană pe perioada secetoasă. Ca rezolvare se captează apa subterană care iese la zi la baza unor dealuri permeabile nisipoase. Apa captată se pompează pe crestele acestor dealuri unde cu ajutorul unor puțuri de mică adâncime și bazine de infiltrație ajunge din nou în stratul acvifer. Timpul de parcurs al apei de la locul de îmbogățire până la apariția din nou la suprafață este de cca. 2 luni. În acest caz s-a aplicat principiul recirculării apei subterane pe anotimpul ploios pentru a crea o acumulare și rezervă pentru perioada secetoasă.

2.3.2. Concluzii privind metoda directă

La ^mîmbogățirea cu metoda directă se filtrează apa captată dintr-o altă sursă - în general superficială și de multe ori de la distanțe apreciabile în stratul subteran.

Schema tehnologică a amenajării pentru mărirea stocului din subteran și pentru corectarea calității depind de structura terenului din subteran și de condițiile specifice ale fiecărui caz.

Când stratul acvifer este omogen, permeabil și apare la suprafață, îmbogățirea se rezolvă cu sisteme superficiale, bazine, canale, șanțuri, lacuri. Extragerea apei din stratul îmbogățit se face cu metodele de captare cunoscute așezate paralel cu îmbogățirea la distanțe mai mici sau mai mari după cum stratul freatic este mai permeabil sau mai puțin permeabil. În caz contrar se aplică sistemele subterane.

Indiferent de sistemul aplicat distanța dintre locul de infiltrație și captare se va alege astfel ca indicatorii de calitate a apei captate să fie satisfăcătoare în orice situație și anotimp.

Calitatea apei infiltrate se poate regla. Una din metode este aceea că se va infiltra apa sursei superficiale numai pe perioada când aceasta are o calitate bună, iar în tim-

pul apariției undelor de poluare opri procesul de îmbogățire.

O altă metodă este că înainte infiltrării apa brută se tratează îndepărtând substanțele consumatoare de oxigen și putrescibile prin aerare, filtrare rapidă și asigurării condiții aerobe în procesul de îmbogățire.

2.3.3. Metoda indirectă sau denumită și filtrarea prin mal este aceea când captarea apei se amplasează într-o zonă apropiată de râuri, dacă patul râului se află într-un teren permeabil. Prin coborârea nivelului apei subterane în zonă se mărește debitul filtrat din râu în terenul permeabil.

La Congresul internațional de alimentări cu apă de la Stockholm 1964 s-a precizat că metoda directă în viitor nu va mai avea prea mari perspective de aplicare din cauza poluării crescînde a râurilor [83].

Se amintește de exemplu că specialiștii care au întreprins studiile hidrogeologice pentru alimentarea cu apă a orașului Craiova [48] recomandă eliminarea factorilor dăunători ai industriilor din amonte de captare (suspensii de cărbune și produse petroliere din apa Jiului).

La proiectarea acestui gen de captări se mai pune și problema colmatării malurilor, o problemă complexă, existînd mai multe concepții teoretice, dar însă prea puțin studiate și insuficient lămurite pînă în prezent lucru semnalat de Congresul de alimentări cu apă de la Stockholm [83], apoi de Constantinescu Gh.P [49], de Trofin P și de Mănescu Al. [199].

Pentru a evita eventualele colmatări ale malurilor și albiei în dreptul captărilor, G.Thiem a formulat primele norme pentru proiectarea captărilor prin filtrare din mal și anume necolmatarea este asigurată dacă filtrarea se produce cu panta maximă la mal de 1% cifră semnalată de Constantinescu Gh.P [48] și de Trofin P [201].

Rezumînd cele expuse, în fig.2.5 se prezintă o clasificare schematică a metodelor de îmbogățire tehnică (artificială) a straturilor acvifere.

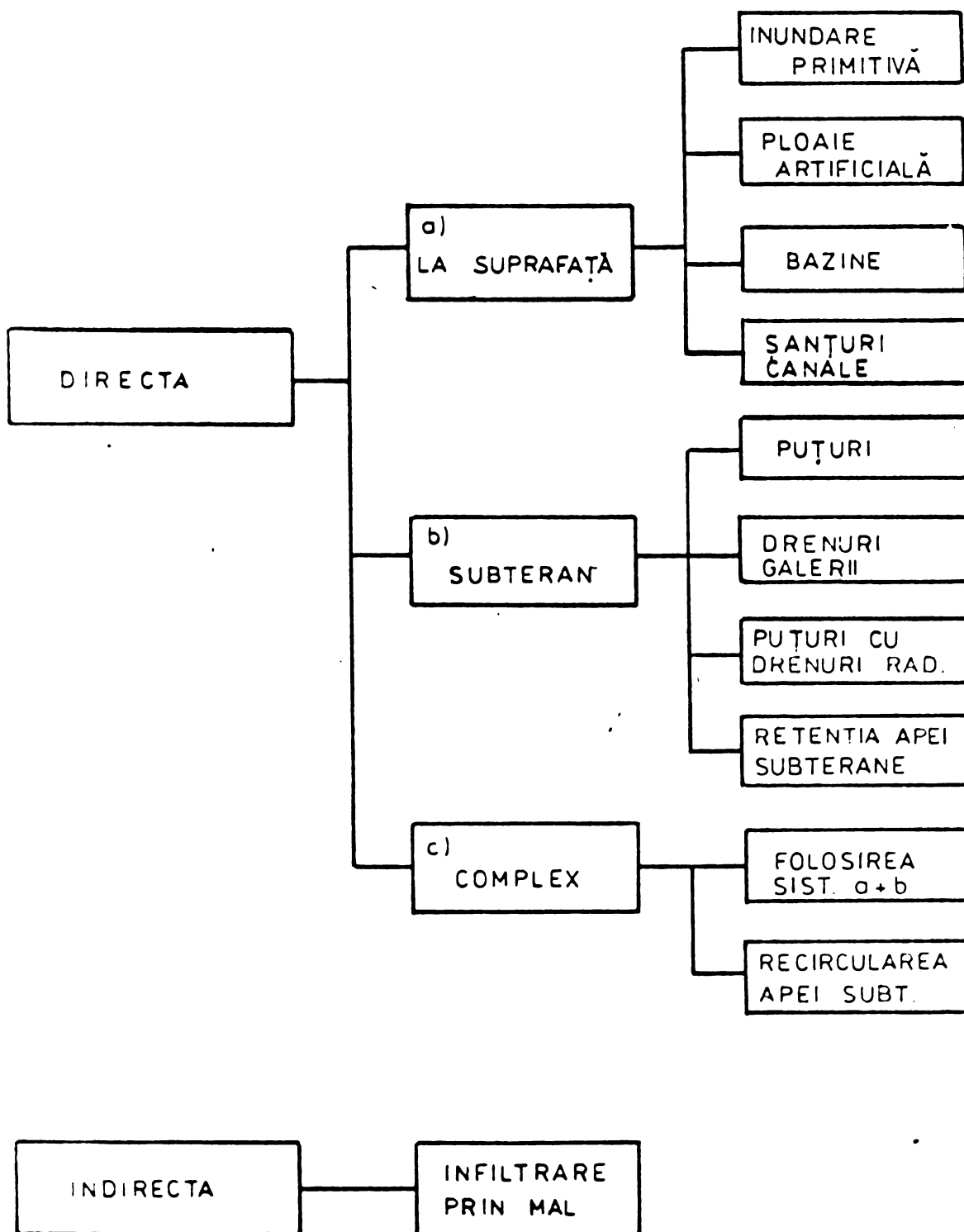
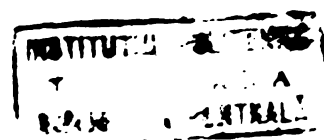


Fig. 2.5 CLASIFICAREA METODELOR DE IMBOGATIRE TEHNICA (ARTIFICIALA) A STRATURILOR ACVIFERE



2.4. Stadiul actual al cercetării și particularitățile infiltrăției prin construcții liniare

2.4.1. Generalități

Folosirea apei subterane, tehnologia și de tratare precum proiectarea marilor instalații de alimentare cu apă care captează apă subterană este de neconceput fără un studiu aprofundat al mișcării apei în medii poroase.

Începând din anii 1930 apar manualele care tratează exclusiv problema infiltrațiilor (Muskat, Polubarinova-Kocina, Aravin, Bear, Zaslavsky, Irmay). Atât în aceste manuale cât și în numeroase articole de specialitate din diverse reviste, se poate constata o accentuare și diversificare a metodelor de cercetare.

În ultimele două decenii și în literatura noastră de specialitate apar lucrări privind mișcarea apei în medii poroase. Se pot aminti aici lucrările lui Gheorghiu St., Negulescu M., Trofin P., Pietraru V., Grovesanu J., Ene H., Gogones S., David I. Ivan C.,

Tematica studiilor și a cercetărilor privind mișcarea apei în medii poroase se poate clasifica în trei mari grupe [107]

Prima grupă include toate acele cercetări care au avut ca scop determinarea limitei de valabilitate a legii lui Darcy precum și stabilirea coeficientului de permeabilitate (Kozeny, Karmen, Zemanin). Tot aici se pot include și acele lucrări care lămuresc mișcarea în afara zonei legii lui Darcy, atât la viteze mai mari (Lindquist, Veronese, Irmay) cât și la viteze mai mici (Bondarenko, Juhász). De asemenea acestei grupe aparțin cercetările privind mișcarea în medii bi sau trifazice (Averianov, Irmay).

În grupa doua se includ cercetările privind valabilitatea ipotezei lui Dupuit (Cesni, Numerov), cercetările asupra transformării conforme ale mișcării plane potențiale - instrument atât de des folosit în cercetări aerodinamice, dar și în hidraulica infiltrațiilor (Weaver, Khosla, Muskat) precum și continuarea dezvoltării transformării conforme (Kozeny, Vedernicov, Pavlovski). Aici con include și descrierea metodelor de calcul al mișcărilor nepermanente din mediul poros (Iacob, Polubarinova-

Kocina, Verighin) precum și metoda hodografului vitezelor (Vedernicov, Aravin și Numerov, Bear și Darcy).

În fine în grupa a treia se pot încadra acele lucrări care înlesnesc folosirea practică a relațiilor găsite din primele două grupe prin adoptarea unor ipoteze simplificatoare și considerarea condițiilor de margine primind o precizie acceptabilă în calculele tehnice. (Dachler, Muskat, Kamenski, Kořeny, Pavlovski). Aici se mai încadrează și toate acele lucrări care se ocupă cu metodele practice de modelare stabilind criteriile de similitudine sau cele de modelare analogică (Mosonyi-Kovács, Pavlovski, Dachler, Karplus, Hele-Shaw sau analogia Darcy-Poiseuille).

Datorită volumului mare al cercetărilor, în prezent se dispune de o serie de metode pentru rezolvarea cu destulă precizie a numeroaselor probleme ale infiltrațiilor.

Prin dezvoltarea rapidă a calculatoarelor digitale mari, în ultima vreme apar o serie de rezolvări numerice, și acestea din ce în ce mai ample, ale unor probleme speciale cu condiții de margine foarte complicate. Combinarea lor cu tehnica modelării analogice în hidraulica subterană a permis stacarea unor probleme care nu se pot rezolva analitic. În problema îmbogățirii apei subterane din apele superficiale până în prezent au fost precizate o serie de soluții și posibilități de rezolvare. În cele ce urmează se face o trecere în revistă a direcțiilor tematice ale cercetărilor, precum și a rezultatelor găsite, pentru conturarea preocupărilor din prezenta lucrare.

Astfel o mare parte a literaturii de specialitate se ocupă cu mișcarea plană verticală, care este tratată analitic mai simplu iar unele aspecte tridimensionale sînt approximate prin simplificarea la o mișcare plană.

O altă grupă a publicațiilor tratează procesele pentru un domeniu sub presiune (artezian) și pentru cele cu nivel liber scurgerii fiind influențată de forțele gravitaționale.

Ca o subgrupă a acestora se poate aminti problema influenței apei dintr-un canal într-un strat subteran acvifer în cele două cazuri; infiltrația liberă și infiltrația încetă (vezi fig.2.6 a și 2.6.b)

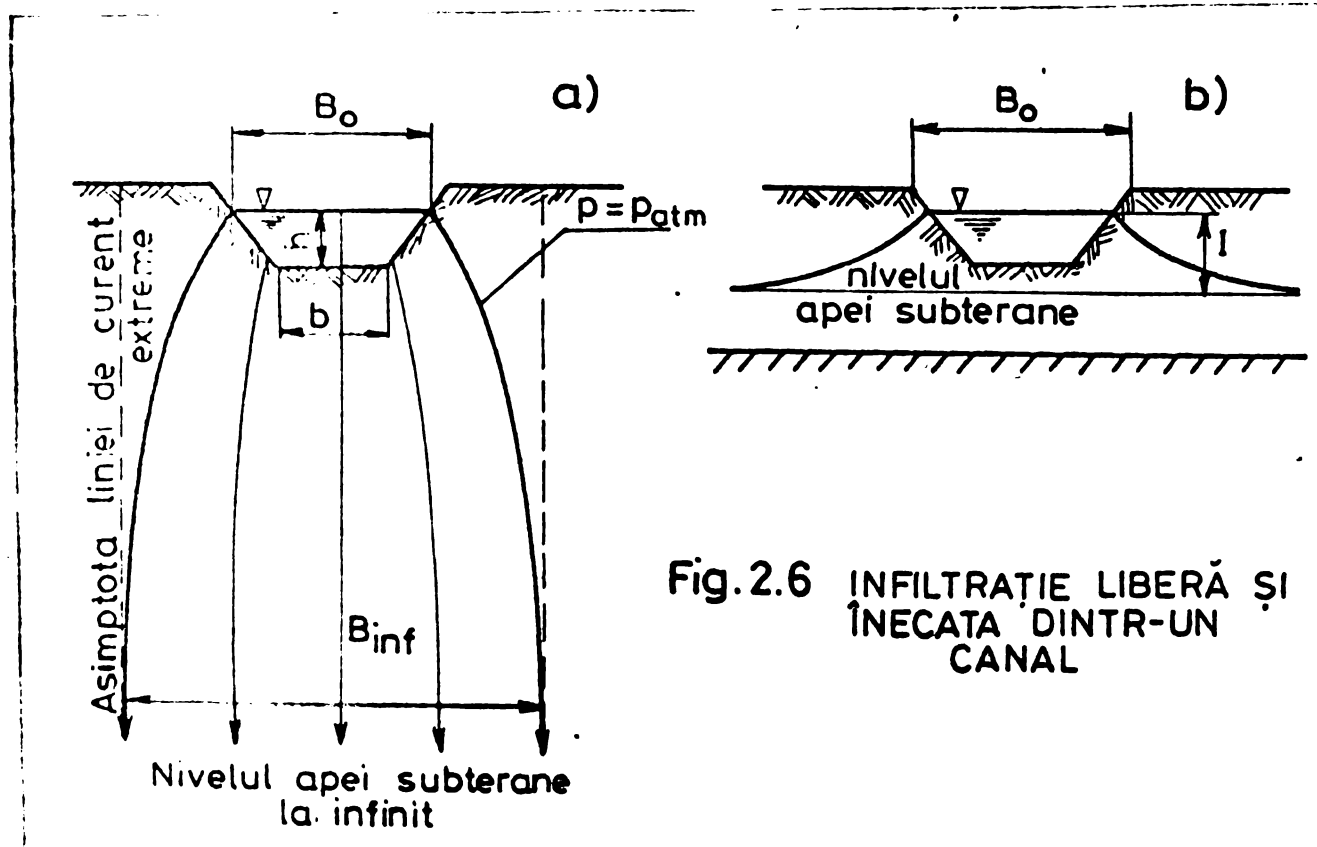


Fig.2.6 INFILTRAȚIE LIBERĂ ȘI ÎNECATA DINTR-UN CANAL

2.4.2. Infiltrația liberă

Infiltrația liberă dintr-un canal are loc când adâncimea apei subterane este destul de mare, teoretic infinită. Problema a fost tratată începând din 1930 de mai mulți cercetători, atât analitic cât și experimental. Astfel în remarcabila monografie a lui Polubarinova-Kocina [159] se dau soluții exacte bazate pe ipoteze simplificatoare. Scheidegger [174], ca și multe tratate de mecanică pământurilor, se ocupă mai mult de aspectul fizic al problemei. Soluția analitică a lui Vedernikov, (rezultatele citate de Polubarinova-Kocina [159]), demonstrează cum pot fi evaluate pierderile prin infiltrație, folosind hodograful vitezei, pentru canale de formă triunghiulară, trapezoidală și dreptunghiulară. Koženy [108] a obținut soluția pentru scurgere dintr-un canal deschis cu o formă de cicloidă scurtă, Bouwer [26] a considerat scurgerea dintr-un canal trapezoidal. Jeppson [90] [91] a obținut soluții numerice pentru scurgerea din canale triunghiulare, trapezoidale, rectangulare folosind metoda diferențelor finite. Lucrarea lui Jeppson [90] citează și pe alți

cercetători care s-au ocupat de problema scurgerii apei în regia liber din canale deschise, ca: Todd, Muskat, Bruch, Street. Ultimii doi din urmă au dat ca soluții niște funcții neintabulate, al căror evaluare reclamă un calcul numeric destul de laborios. Fără dubiu, aceste cercetări interesează la stabilirea infiltrațiilor din canale deschise, care apar din cauza numeroaselor aplicații relative în domeniul irigațiilor hidrologiei și al îmbogățirilor. Din nefericire însă soluțiile stabilite pînă în prezent nu sînt aplicabile decît la o clasă restrînsă de canale cu o geometrie specifică (dreptunghiulară, trapezoidală, triunghiulară și cicloidă scurtă), deoarece în general tehnicile numerice de soluționare sînt foarte scumpe și consumatoare de timp. Interesantă este rezolvarea relativ recentă a lui Hunt [85] din 1972, care prezintă o soluție de aproximare a pierderilor prin infiltrații de canale deschise puțin adînci cu o secțiune transversală arbitrară.

În continuare se redau o serie de formule și date practice pentru calculul pierderilor de apă din canale și al ridicării respective a nivelului freatic, elemente extrase din literatura de specialitate și din experiența dobîndită în țara noastră.

Pierderile prin infiltrație pe canale necăptușite sînt strîns legate de caracteristicile geotehnice ale terenului de elementele hidraulice ale canalului, de lungimea acestuia, după Cazacu E [39] acestea au loc în două cazuri:

a) Cazul I: pierderi de apă prin infiltrație, cu funcționare intermitentă a canalului; curentul de infiltrație se scurge liber, iar stratul impermeabil sau apa subterană se găsește la mare adîncime. (Fig. 2.6). Mărimea pierderilor de apă (q în m^3/sec și km) se calculează cu relația

$$q_p = 0,0116 k \cdot h \left(\frac{b}{h} + 2 \psi h \right) \sqrt{1+m_1^2} \quad (2.1)$$

în care

q_p = debitul pierdut prin infiltrație pe canale în m^3/sec și km ;

- b = lățimea la fund a canalului, în m
 h = adâncimea apei în canal, în m
 m_1 = cotangenta unghiului taluzului cu orizontala
= coeficient de absorbție în funcție de proprietățile terenului
 k = coeficient de infiltrație mediu corespunzător duratei de funcționare în m/zi

Întreruperea funcționării canalelor și darea lor din nou în exploatare modifică coeficienții de infiltrație

b) Cazul II; pierderi de apă prin infiltrație cu funcționare continuă a canalului; curentul de infiltrație se scurge liber, iar stratul impermeabil sau apa subterană se găsește la mare adâncime. Măximea debitului se determină cu relația:

$$q_p = 0,0116 k \cdot h \left(\frac{b}{h} + 2h \sqrt{1+m_1^2} \right) \quad (2.2)$$

Lățimea zonei de infiltrație B_{inf} din fig.(2.6) se determină orientativ cu relația

$$B_{inf} = B_0 + 2h \quad (2.3)$$

în care

B_0 = este lățimea luciului apei în canal

h = adâncimea apei în canal

2.4.3. Infiltrația înecată

Se disting două cazuri [149]

a.1. Stratul permeabil de grosime infinită. În cazul regimului permanent, pentru o mișcare plană verticală simetrică, cu patul impermeabil la adâncime foarte mare, teoretic infinită, expresia debitului rezultă din rezolvarea ecuației 159 :

$$B = \frac{2\lambda}{1-\lambda} \frac{\ell}{H} + \frac{2K_1}{K_1'} \quad (2.4)$$

din care se obține , după care se scrie:

$$q = KH \frac{2K_1}{K_1'} = KH \left(\frac{B}{H} - \frac{2\lambda}{1-\lambda} \frac{\ell}{H} \right) \quad (2.5)$$

unde: B , H și l rezultă din fig.2.7

K_1 și K_1' - integralele eliptice de specie I de modulii λ , respectiv $\lambda' = \sqrt{1-\lambda^2}$

Pentru calculele practice Polubarinova-Kocina a întocmit un grafic $\frac{q}{KH} = f\left(\frac{B}{H}, \frac{l}{H}\right)$

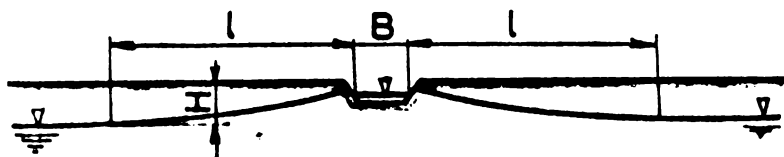


Fig. 2.7 MARIMILE CE INTERVIN LA INFILTRAREA INECATA

În cazul de mai sus l are semnificația unei distanțe de evacuare sau rază de influență. Dacă $H \gg l$, din formula (2.4) se obține $\frac{K_1}{K_1'} = B/H$, iar expresia debitului devine similară cu formula din cazul

infiltrației libere

a.2. Stratul permeabil de grosime finită.

Se observă că la o distanță suficient de mare de canal, mișcarea poate fi tratată cu ajutorul ipotezei lui Dupuit, iar zona canalului se poate reduce la o mișcare Dupuit, folosind metoda coeficienților de rezistență hidraulică.

O serie de cercetători tratează problema mișcării în cazul infiltrației înecate în cazul când axa canalului este și axa de simetrie a mișcării. Astfel Bouwer [26] în lucrarea sa, citează pe Dachler care a întreprins cercetări și a dat soluții de aproximare a infiltrării simetrice. Comparând rezultatele teoretice și cu cercetările efectuate pe modele, prezintă evaluarea cantitativă a infiltrației dintr-un canal de formă trapezoidală aflat într-un teren permeabil limitat în adâncime de un strat orizontal impermeabil. Dachler limitează domeniul mișcării, care după cercetările sale este influențat de frontiera (taluzul și fundul canalului), față de o frontieră mai depărtată în care sînt interconectate puțuri. Debitul infiltrat și pierderea de presiune în domeniul considerat depind de un așa zis factor de formă definit numai de condițiile geometrice ale domeniului. Așa cum au arătat cercetările întreprinse ulterior de către Bouwer [26], soluțiile lui Dachler

sînt valabile numai într-un domeniu destul de limitat și nu pot fi generalizate. Această afirmație critică se bazează pe studiile întreprinse de Bouwer pentru infiltrație înecată cu ajutorul modelului de rezistențe electrice. În urma cercetărilor se prezintă o diagramă valabilă pentru infiltrația înecată, din care rezultă debitul, pierderea de sarcină și limitarea geometrică a dimensiunii mișcării cînd stratul permeabil sau respectiv impermeabil se află la o adîncime mică. Rezultatele găsite de Dachler sînt figurate doar în cîteva puncte ale diagramei lui Bouwer, deci aceasta are un caracter mai general, mai extins.

În afară de aceasta se mai prezintă în [26] și influența colmatării canalului, și trage concluzia că la o adîncime a apei aproximativ egală cu lățimea fundului, colmatarea are o mică influență asupra mărimii debitului exfiltrat din canal.

Și în literatura sovietică există o serie de soluții în rezolvarea problemei citate. Ele se bazează pe o formă specială a transformării conforme folosind funcția Jukovski și au fost elaborate de Vedernicov și Pavlovschi.

Într-o lucrare mai recentă [74] cu privire la mișcarea între canale paralele, respectiv între canale și un drenaj de interceptare, se tratează comparativ soluția lui Vedernicov asupra curbei suprafeței libere și a debitului obținut.

Concluziile lucrării sînt că soluția lui Vedernicov dă debite mai mici.

Obținerea unor date sigure cu privire la mărimea infiltrațiilor de apă din canale, nu se poate face decît prin efectuare de măsurători directe.

În continuare se vor prezenta succint cîteva metode de măsurare a debitelor ce se exfiltrează din canale.

a) Metoda debitelor de intrare și ieșire constă în măsurarea volumelor de apă intrate și iese la capetele tronsonului ce trebuie examinat. Ca instrumente de măsurare se folosesc moriștile hidraulice sau construcțiile hidrometrice existente, deversoare, stăvilire. Gradul de exactitate al metodei este redusă. Instrumentele de măsurare conduc la erori peste ordinul de mărime a pierderilor de apă prin infiltrații.

De aceea această metodă nu se va aplica decât în cazuri cu totul speciale, cu o separatură foarte sensibilă și cu un personal deosebit de calificat.

b) Metodele biefurilor necesită oprirea exploatarei canalului pe perioade de observații, dă posibilitatea obținerii unor date mult mai sigure decât metodele anterioare. În principiu se izolează o porțiune din canal cu batarouri și după stabilizarea a nivelului hidrostatic se fac citiri de nivele pe baza cărora se poate calcula volumul de apă pierdut prin infiltrații. Măsurătorile se pot face cu sau fără adăugare de apă în canal.

c) Metoda măsurătorii cu dispozitiv. Un astfel de dispozitiv pentru măsurarea pierderilor de apă prin infiltrații din canale a fost imaginat de V. Perles și prezentat în [145]. Față de metodele anterioare, care sînt globale și dau valoarea debitului infiltrat ca o medie pe o lungime oarecare, dispozitivul lui Perles permite evaluarea acestor date în orice punct în care se face măsurătoarea.

2.4.4. Prezentarea unor soluții teoretice.

Propuneri pentru soluționarea infiltrației artificiale cu privire la îmbogățirea artificială a straturilor scvifere a fost prezentată de Louda în 1962 [116]. Aceste prezintă soluții analitice prin care se pot evalua cantitativ mărimile debitului infiltrat atât în cazul cu nivelul liber cît și cu nivelul sub presiune. Louda critică metoda de îmbogățire prin drenuri, galerii sau cu puțuri deoarece nu sînt satisfăcătoare sub aspectul capacității de infiltrare iar în exploatare sînt nesigure și neeconomice. Recomandă metoda superficială cea practică cu ajutorul bazinelor de infiltrare sau cu canale. După Louda, soluția optimă a unei îmbogățiri artificiale depinde de acuratețea, grija și pricepera proiectantului cu care acesta poate evalua numeric întreaga problemă. Efectul infiltrației artificiale va fi diminuată dacă proiectantul se va baza numai pe presupuneri și rezultate obținute din practica altor instalații. Prin acesta nu trebuie redus importanța comparării funcționării unor instalații existente dar atrage

atenția asupra justei evaluări a particularităților fiecărui caz în parte.

Se poate afirma cum precizează Londa, că pentru fiecare îmbogățire artificială trebuie cunoscute condițiile în care se va produce fenomenul, în special valorile privind coeficientul de permeabilitate al mediului poros din subteran. Pentru testarea posibilităților adecvate de infiltrare și pentru prevederea rezultatelor scontate este important cunoașterea valorilor k . Practica a dovedit că nu este recomandabil de a se baza pe valorile date din literatură sau pe relații empirice pentru valoarea k .

Dezvoltările matematice din lucrarea lui Londa se pot critica prin faptul că se consideră o structură izotropă a mediului poros, și că idealizează prea grosolan durata de parcurgere de la locul infiltrării până la punctul de captare.

Astfel

$$v_b = v_a + g' \cdot t \quad (2.6)$$

unde

v_b = viteza la captare

v_a = idem la locul infiltrării

g' = accelerația în profilul captării

t = durata de parcurs între infiltrare și captare

Distanța între infiltrare și captare notată cu l este

$$l = v_a \cdot t + \frac{1}{2} g' t^2 \quad (2.7)$$

Din (2.6) se obține că

$$t = \frac{v_b - v_a}{g'} \quad (2.8)$$

și care introdusă în (2.7) va permite obținerea accelerației g'

$$g' = \frac{v_b^2 - v_a^2}{2l} \quad (2.9)$$

Introducând g' în (2.6) se obține durata de parcurs a apei.

$$t = \frac{2l}{v_b + v_a} \text{ sec} \quad (2.10)$$

sau

$$t = \frac{2l}{86400(v_b + v_a)} \text{ zile} \quad (2.10')$$

relație care este criticabilă sub aspectul ipotezelor puse la deducerea ei.

La Congresul internațional de alimentari cu apă de la Stocholm din 1964 s-a precizat că eficiența îmbogățirii din canale sau bazine artificiale depinde de [83] :

- capacitates de înmagazinare al mediului subteran
- de viteza verticală cu care apa pătrunde în mediul subteran
- de viteza orizontală cu care apa se deplasează mai departe

felul și modul îmbogățirii este stabilit de relația acestor trei factori.

După cum arată în fig.2.8 sint reprezentate, diferența de nivel, lungimea traseului de infiltrare în ipoteza unui teren omogen.

Captarea apei se poate face fie cu puțuri fie cu galerii.

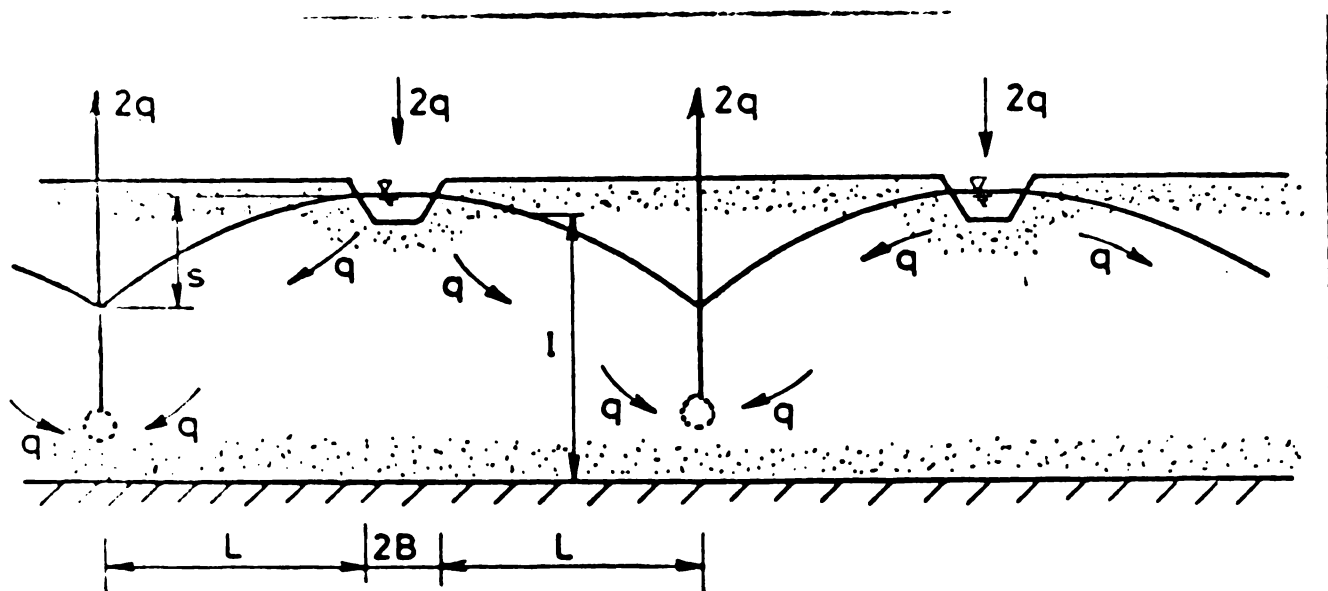


Fig. 2.8 MARIMILE CARE INTERVIN LA IMBOGATIRE

BUPT
7
6205 254 287144

Dacă din stratul îmbogățit apă se extrage cu un dren atunci distanța optimă dintre canalul de infiltrație și drenul de captare se determină din două condiții anagoniste. Pe de o parte va trebui obținut o distanță minimă de infiltrație L și o durată minimă de parcurs T , pe de altă parte va trebui respectată o diferență maximă de nivel între nivelul apei din canal și cota piezometrică din dren.

Aceste condiții limitează valorile maxime a debitului infiltrat și cu notațiile din fig.(2.8) avem:

$$q \leq \mu \frac{L}{T} H \quad (2.11)$$

și

$$q \leq k \frac{s}{L} H \quad (2.12)$$

în care

q = debitul infiltrat sau respectiv capacitatea drenului sau a puțului în $m^3/sec/m$ respectiv m^3/sec .

s = diferența de nivel între cota apei din canalul de infiltrație și cota minimă piezometrică în dreptul drenului

μ = coeficientul de cedare fiind raportul dintre cantitatea de apă cedată liber într-un mediu poros și volumul total al mediului poros, având dimensiunea m^3/m^3

k = coeficientul de permeabilitate

H = înălțimea stratului de apă peste stratul impermeabil la mijlocul distanței între canalul de infiltrație și dren

L = distanța dintre canalul de infiltrație și dren.

Debitul maxim se obține atunci când valorile limită a lui s și T sînt înlocuite în relațiile (2.11),(2.12).

Dacă se presupune că nu se necesită distanța minimă de infiltrație atunci pe unitatea de suprafață maximul lui q este

$$q = \frac{L \cdot \mu \cdot H}{T} \quad (2.13)$$

și care de fapt este capacitatea de debitare a stratului

scvifer.

Pentru reducerea cheltuielilor drenul de captare se va amplasa la o astfel de distanță de canalul de infiltrare cât permite valoarea maximă a diferenței de nivel s .

Această distanță se obține prin egalarea relațiilor (2.11) cu (2.12) adică

$$L = \sqrt{\frac{k T s}{\mu}} \quad (2.14)$$

și care înlocuită în (2.12) dă

$$q \leq \sqrt{\frac{\mu H^2 k s}{T}} \quad (2.15)$$

În afară de relațiile (2.11) și (2.12) este necesar de a se ține cont și de capacitatea precum și de alimentarea suprafeței de filtrare și canalului prin relația:

$$q \leq q_s \alpha \cdot B \quad (2.16)$$

unde

q_s = debitul maxim admisibil ce se poate infiltra din canal, în subteran

α = coeficient subunitar care ține cont de neuniformitatea permeabilității suprafeței de infiltrare și care poate varia în timp.

B = perimetrul udat al canalului

Din relația (2.16) se poate deduce că perimetrul udat trebuie să fie astfel ales ca mărimea vitezei de filtrare în subteran să fie sub o valoare maximă admisibilă.

În cazul când captarea se face cu un șir de puțuri atunci distanța acestora față de canalul de infiltrare trebuie corelat deoarece debitul infiltrat este maxim în dreptul unui puț ce este intersectat de o perpendiculară pe canal și minim în mijlocul distanței între două puțuri pe aliniamentul lor. Aceste diferențe de accentuează mai ales dacă distanța între puțuri crește. Acelaș lucru se poate spune și despre durata de parcurs a apei de la locul de infiltrare pînă la captare.

Infiltrarea sistematică a apei dintr-un bazin sau

canal artificial cu fundul parțial colmatat într-un strat permeabil la un sistem de drenaj sau puțuri de tratarea de Bear și Braester în 1966 [16]. Sînt prezentate soluții stît pentru scurgerea plană verticală a curgerii simetrice între bazine de infiltrație și drenuri paralele, precum și pentru scurgerea simetric radială. Se consideră stît cazul nivelului sub presiune cît și a celui liber. Soluțiile se deduc folosind metoda fragmentelor, relațiile diverselor fragmente sînt legate între ele prin condiția de continuitate.

Autorii dezvoltă și o soluție exactă analitică, care se referă la un domeniu plan al mișcării din stratul scvifer iar în stratul parțial colmatat se presupune că mișcarea este verticală. Apoi se compară rezultatele obținute prin soluția exactă și prin cea aproximativă, diferențele sînt cu stît mai mici cu cît grosimea stratului scvifer este mai mic iar lățimea de infiltrație corespunzătoare mai mare. În acest caz metoda fragmentelor dă o bună aproximare a fenomenului.

O altă lucrare, care se bazează pe metoda fragmentelor este și lucrarea [123] a unui grup de cercetători de la Universitatea Tehnică din Dresda elaborată sub conducerea prof. dr. Busch. Autorii critică metodele actuale de calcul ale infiltrației artificiale, în speță lucrarea citată a lui Londa [116] și a altor cercetători, deoarece pornesc de la modele matematice foarte simpliste și care nu pot avea o influență hotărîtoare asupra alegerii amplasării optime a instalațiilor de infiltrație și a celor de captare. În lucrarea [123] se folosește posibilitatea fragmentării domeniului unde mișcarea apei subterane este greu evaluabilă, într-o serie de porțiuni care au condițiile de margine bine definite. Reunirea respectiv divizarea curenților mișcării se face în moduri care se stabilesc pe baze condițiilor fizice și geometrice ale domeniului mișcării. În fig.2.9 se arată modul de folosire a acestui principiu.

Se poate observa că în zona de influență a rîului (cu fundul colmatat sau necolmatat) s-au considerat două curenți de infiltrație q_{1a} și q_{1b} precum și un curent subteran q_{2b} . În zona liniei captării a puțurilor sînt considerate de asemenea diverse fragmente de curent al infiltrației la care s-a

ținut cont în afară de condițiile problemei și de influența

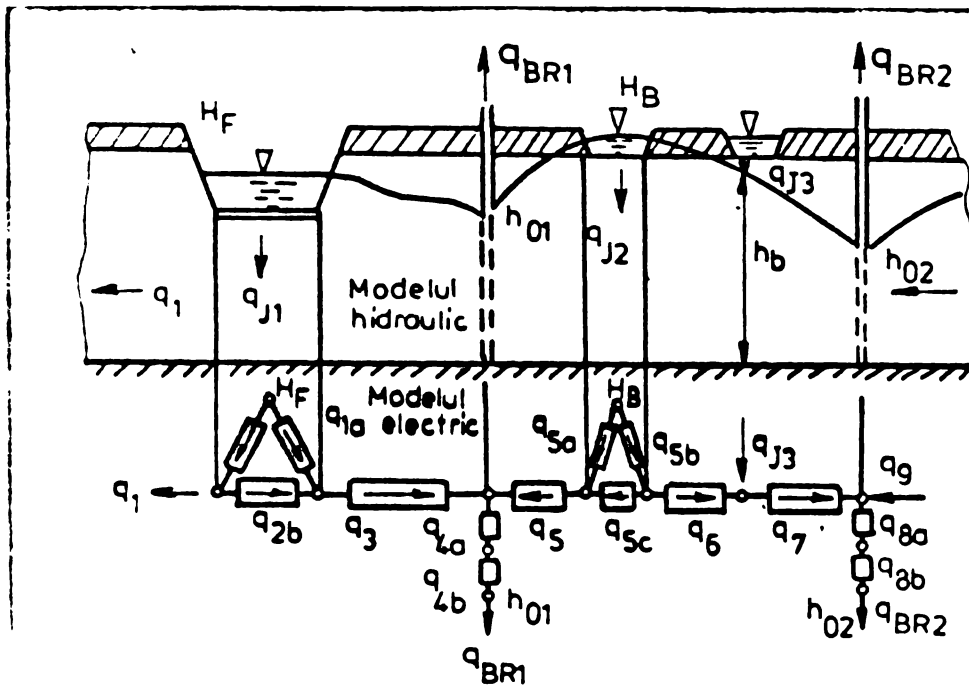


Fig.2.9 METODA FRAGMENTELOR DUPĂ BUSCH

dacă puțul este perfect sau nu. Principiul de bază folosit în lucrare este dependența liniară între debitul curenților și căderea de potențial respectiv rezistența. Așa cum precizează și autorii lucrării, fenomenul fizic este oglindit mai veridic cu cât crește numărul și finețea fragmentelor. Totodată crește însă și gradul de dificultate în rezolvarea calculelor numerice atașate acestei probleme.

În multe cazuri practice însă, este suficientă o fragmentare grosieră. Sistemul obținut se poate rezolva atunci cu ajutorul unui simplu model analogic electric, sau folosind un minicalculator electric. În lucrarea citată se dezvoltă modul cum se fragmentează scurgerea din subteran pentru drenuri, puțuri perfecte sau imperfecte, pentru infiltrare din bazine colmatate parțial într-un strat scvifer.

În studiul său [104] Kovacs elaborează o metodă de calcul hidraulic unitar pentru determinarea caracteristicilor hidraulice cu privire la poziția apei subterane care se formează în zona canalelor de irigație cu nivelul aproape constant, pentru determinarea debitelor de infiltrare, a curbelor

de suprafață influențate de canal și a efectului de distanță a canalului.

În studiul citat [104], autorul presupune că apa care se infiltrează în sol din canalul examinat este în echilibru cu excesul de evaporație în urma ridicării nivelului apei subterane. Această ipoteză a curgerii permanente se poate accepta totdeauna când factorii care influențează mișcarea în apropierea canalului examinat sînt aproape constanți, sau pot fi considerați constanți într-o perioadă suficient de lungă, în timpul căreia se poate forma un regim permanent.

Un studiu interesant [112] prezintă Léczfalvy, privind dimensionarea hidrolică a sistemelor de infiltrație prin mal și prin instalații de îmbogățire artificială. Autorul lucrării [112] consideră un râu (sau bazin, canal de infiltrație) amplasat ca în fig. 2.10 al cărui fund de lățimea L vine în contact cu stratul permeabil de grosimea M . La suprafața acestui strat este acoperit cu un teren impermeabil (situație ce apare deseori în multe văi).

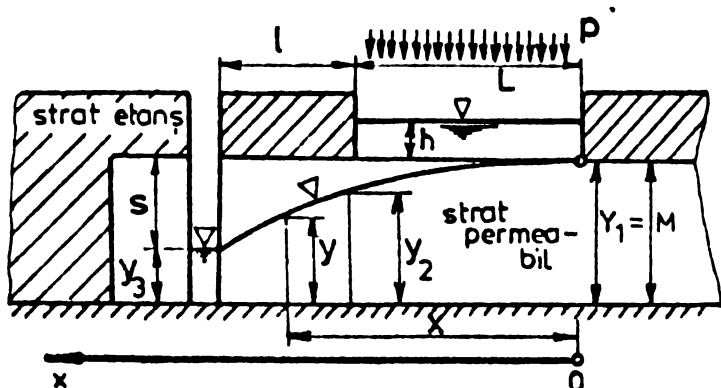


Fig. 2.10 METODA LUI LÉCZFALVY

La o distanță de la râu (bazin, sau canal de infiltrație) se amplasează o instalație de captare galerie (sau șir de puțuri) care produc o denivelare $s = M - y_3$. Evident, sub acțiunea denivelării apa va scurge

în instalația de captare, iar mărimea debitului captat depinde de mai multe condiții antagoniste. Pentru simplificare Léczfalvy a considerat că mișcarea în subteran se face după direcția verticală și orizontală. Întregul sistem este împărțit în 3 subsisteme componente:

- un sistem unde mișcarea este verticală și care dă de

fapt debitul infiltrat din rîu, notat cu p în mc/sec/mp. .

- un subsistem unde mișcarea este orizontală și care reprezintă zona situată sub rîu respectiv între rîu și instalația de captare,

- instalația de captare, galerie de dren sau șir de puțuri.

Debitul care este posibil de captat prin subsistemul al treilea depinde evident de toate subsistemele considerate, mărimea lui este dictată de subsistemul cu cea mai mică capacitate de transport al apei.

Autorul studiază cîteva cazuri simple ca: instalație de captare numai pe un mal amplasat chiar lîngă rîu, idem pentru un amplasament pe ambele maluri. Se subliniază că debitele stabilite prin metoda descrisă sînt teoretic maxime. În practică se va ține cont de ex.viteza de filtrație nu poate depăși o anumită limită, deoarece stratul freatic s-ar colmata. De asemenea în practică curentă nu trebuie atins limita $y_3 = 0$, cînd denivelarea este maximă și cînd s-ar părea că instalația de captare va da debitul maxim. În procesul de exploatare nu este admisă antrenarea continuă a particulelor de nisip care duce pe de o parte la distrugerea scheletului scvifer, iar pe de altă parte la înisiparea instalației de captare.

În continuare se studiază amplasamentul depărtat al instalației de captare față de rîu, precum și cazul cînd instalația de captare este un puț cu drenuri radiale. Autorul concluzionează că amplasamentul depărtat al instalației de captare este necesar din motive sanitare sau din motive de apărare față de inundații. Dar un amplasament mai depărtat va diminua într-un fel debitul exploatabil capabil, deoarece se lungeste traseul mișcării subterane și care reclană un surplus de pierdere de presiune .

Lucrarea se referă exclusiv la dimensionări din punct de vedere hidraulic a instalațiilor de îmbogățire și numai la cazurile simpliste mai sus citate. Nu se abordează și dimensionarea sub aspectul normelor sanitare. Considerarea acestora ar plasa sub anumite limite valorile lui p și l , respectiv și debitul exploatabil. Hotărîtor pentru calitatea apei este durata de parcurs între infiltrare și captare și care se

apreciază de autor la cca. 1-2 luni.

2.5. Obiectul studiului și a cercetărilor din prezenta lucrare.

Studiile și cercetările din prezenta lucrare se referă la captarea apei subterane obținută prin îmbogățirea azealului prin șanțuri și canale. Pentru proiectarea a unei astfel de instalații trebuie respectate următoarele două criterii antagoniste:

a) amplasarea instalațiilor de captare cât mai aproape de locul de îmbogățire va permite obținerea debitelor mult mai ridicate decât la amplasări la distanțe mai mari

b) apa infiltrată din șanțuri și canale în timpul procesului de filtrare este supusă unei purificări în mediul subteran, eficiența purificării fiind mai mare cu cât distanța dintre locul de infiltrare și captare este mai mare.

La proiectarea instalațiilor de îmbogățire aceste criterii trebuie considerate și supuse unei optimizări. Este necesară cunoașterea precisă a tuturor parametrilor și mărimilor r de asemenea și influența lor asupra exploatării, și eficacității unei instalații de îmbogățire din șanțuri și canale.

Pentru aprecierea eficacității unei astfel de instalații trebuie analizate următoarele aspecte [155] .

- 1. Cantitatea apei infiltrate obținute

2. Calitatea apei respectiv durata filtrației de la punctul de îmbogățire până la captare

3. Reducerea pe cât posibil la minim a colmatării prin măsuri tehnice constructive și de întreținere - exploatare

4. Amplasarea optimă a captărilor dealungul canalului și care se influențează reciproc.

Se subliniază sub formă complexă, neglijarea uneia din acestea, ar putea duce la compromiterea instalației de îmbogățire. Autorul acestei lucrări și-a propus de a lămurii aceste aspecte prin studiul și cercetările întreprinse spre a da un ajutor celor ce vor proiecta, executa și exploata în viitor astfel de instalații.

Lămurirea lor cere cunoașterea repartiției a curentului de infiltrație subteran spre punctele de captare având în vedere posibilitățile multiple ale condițiilor de margine.

2.6. Elaborarea programului de cercetare

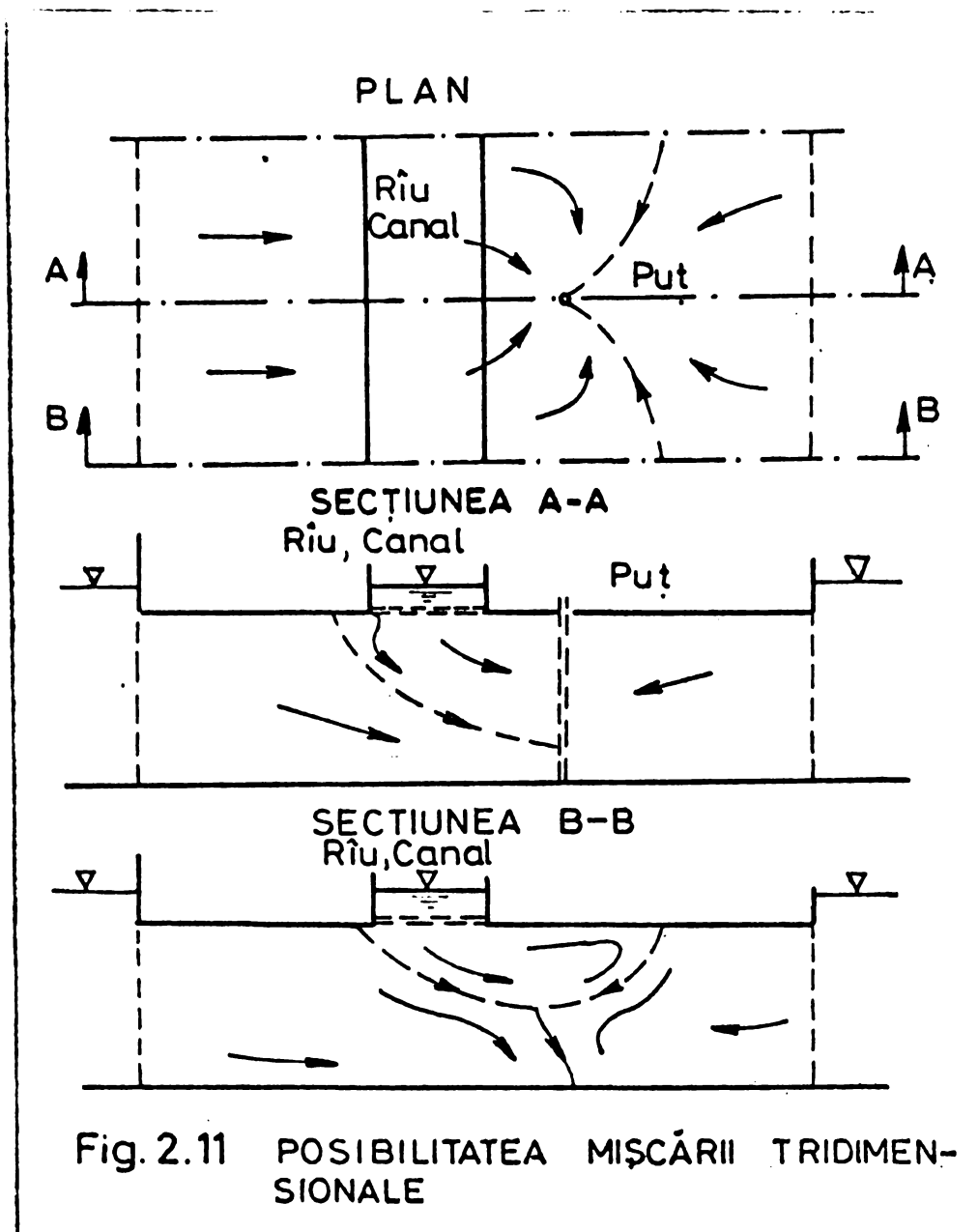
2.6.1. Tendințe actuale

Pentru rezolvarea problemelor complexe ale mișcării apei prin medii poroase, pe plan mondial în prezent se folosesc două căi de rezolvare: metode numerice la care se folosesc calculatoare electronice și metode de calcul analogic [87].

Considerarea că mișcarea se manifestă tridimensional în cazul captării apei cu ajutorul unui sau a mai multor șiruri de fântini în apropierea unei surse superficiale (canal de îmbogățire, râu), este foarte apropiată de fenomenul real din punct de vedere fizic. Posibilitatea mișcării tridimensionale este ilustrată în fig.2.11. Dar soluționarea acestor mișcări spațiale este foarte greoaie din cauza dificultăților tehnice ce apar și anume: capacitatea de memorare redusă a calculatoarelor și volumul mare de informații ce trebuie introdus și extras [97]. Și în viitor mișcarea tridimensională va fi încă greu de soluționat. Există deci tendința de a descrie fenomenul printr-o bună aproximație prin considerarea mișcării în plan orizontal și în plan vertical. Există numeroase exemple de rezolvări de acest gen în literatura de specialitate și care dau rezultate foarte acceptabile mai aproape în toate cazurile ce apar în practică.

Rezolvarea problemelor tridimensionale prin analogie electrică este prea scumpă pe de altă parte simularea pe rețele din rezistențe și capacități este adesea foarte greoaie [87].

Folosirea calculatoarelor și a analogiei la rezolvarea mișcării apei în medii poroase, apare ca o consecință firească a dezvoltării tehnicii moderne de calcul prin răspândirea tot mai largă a calculatoarelor mari precum și a folosirii metodelor de analogie cu instrumente din ce în ce mai competitive pentru măsurarea și reglarea mărinilor. Ca exemplificare a acestei tendințe se pot aminti unele studii și cercetări asupra mișcării



apei subterane în condiții mai complicate în apropierea apelor superficiale.

Prima modalitate a soluționării moderne este calculul câmpurilor cu condiții de margine dificile, cu ajutorul calculatoarelor electronice mari. În [195] se studiază un caz de mișcare complexă cu un număr mare de fântâni de captare grupate neuniform în apropierea unui râu. Fântânile sînt astfel amplasate, ca modelul matematic să poată fi considerat fără limitări sau aproximații, ca o fișie oglindită multiplu prin metode imaginilor în malurile râului.

Pe cînd în [195] calculul numeric constă în rezolva-

rea unei ecuații integrale cu ajutorul dezvoltării în serie și suprapunerea multiplă a soluțiilor, în [115] se așează o rețea fictivă cu noduri discrete peste câmpul orizontal al curgerii, iar valorile din noduri se calculează prin diferențe finite folosind ecuația lui Boussinesq. În materialul citat [115] s-a calculat curgerea nepermanentă la o fântână așezată în apropierea unui râu. Ca un control al preciziei calculului numeric în [115] ca și în [195] se face bilanțul maselor de apă intrate și ieșite în domeniul studiat.

Aceste două materiale exemplifică folosirea metodei numerice a diferenței finite pentru determinarea mărimilor fizice într-un câmp al mișcării subterane. În ultime vreme însă se folosește tot mai des metoda numerică, cea a elementelor finite, pentru cercetarea și rezolvarea diverselor probleme din practica mișcării apei subterane.

În lucrările lui Zenkiewicz și Chenung [213], [214], [215], [216], a lui Martin [129], Taylor [189], Oden [138] și a altor autori a fost subliniat că metoda elementelor finite este în general suficientă de a rezolva o gamă largă de probleme din teoria câmpurilor. Dintre acestea se poate menționa afară de aplicațiile la calculul uzual al structurilor și cele pentru rezolvarea problemelor de infiltrație ale lichidelor, cele care studiază mișcare potențială și la rezolvarea ecuației Poisson.

Metoda elementelor finite se poate aplica și la o clasă de probleme din dinamica fluidelor. Astfel de aplicații prezintă o serie de particularități care nu au fost considerate la calculul uzual al structurilor. În primul rând se poate sublinia că în reprezentări cinematice este mai indicată de a aproxima pentru un element finit viteza și nu deplasarea. În cel de al doilea rând în loc de a reprezenta elemente finite ale materialului fluid, elementele finite constau din subdiviziuni ale spațiului care sînt traversate de fluidul în mișcare sa (metoda lui Euler de reprezentare matematică a mișcării unui fluid).

Metoda elementelor finite pornește de la ideea discretizării corpului într-un ansamblu de părți independente - elemente finite - cu proprietăți specifice și interconectate prin elemente de conexiune de tip punct material - noduri - în care se va obține soluția problemei.

Așa cum se va vedea în cap.4, principalul avantaj al me-

todei îl constituie tehnica de introducere a condițiilor la limită; ele nu afectează ecuațiile care guvernează fenomenul fizic, ci intervin ca restricții exterioare impuse sistemului în unele noduri, după ce acesta a fost asamblat.

Formulara energetică a metodei elementelor finite (se reprezintă în cap.4) a permis extinderea domeniului ei de aplicabilitate la întreaga clasă de probleme ingineresti care acceptă existența unei funcții de potențial (clasa sistemelor conservative). Trebuie citate aici o serie de probleme din calculul structurilor. De asemenea metoda permite rezolvarea problemelor caracterizate prin neomogenitatea fizică sau geometrică a mediului solid analizat, cum ar fi problemele de mecanică solului (interacțiune , teren cu stratificație orizontală - fundație-structură, stabilitatea taluzului, calculul barajelor de pământ) ca și în cele de mecanica rocilor (calculul galeriilor și tunelurilor etc.). Neomogenitatea sau discontinuitățile domeniului analizat se rezolvă aici printr-o împărțire corespunzătoare a acestuia în elemente cu proprietăți fizice diferite. Generalizând restricțiile metodei, ea poate fi aplicată la întreaga clasă a problemelor de câmp cum ar fi cele întâlnite în hidraulică, termotehnică, electricitate, viscoelasticitate etc. Din punctul de vedere al inginerului constructor hidrotehnic trebuie amintite aici rezolvarea unor probleme specifice ale hidrotehnicii cum ar fi : curgerea fluidelor prin medii poroase cu suprafața liberă sau sub presiune, comportarea viscoasă a miezurilor argiloase ale barajelor de pământ, eforturi din temperatură și contracție în baraje de beton etc.

Studiul câmpurilor fizice prin elemente finite este un produs al erei calculatoarelor electronice digitale. Nu a existat înainte. S-a născut în această eră și a progresat uimitor de repede , ca și calculatoarele înseși. A început ca o metodă numerică de analiză a tensiunilor în mecanica corpurilor deformabile și continuă să fie utilizată de asemenea pentru rezolvarea unor probleme din alte ramuri ale mecanicii. După anul 1960 au apărut cărți și un imens număr de alte publicații care discută variatele aspecte de folosire a metodei elementului finit. Citirea tuturor acestor lucrări a constituit o carte

publicată de Whitemann cu titlul „ A bibliography for finite elements.”

Folosirea metodei elementului finit în hidraulică este exemplificată în lucrările clasice ale lui Zienkiewicz [213], [214], [215], [216], apoi în lucrarea lui Reason, Hornberger și Molz din 1971 care se referă la metode numerice în hidraulica subterană cu o introducere și asupra metodei elementului finit [166], a lui Lühr [124], Diersch [61], Roller [167], Kaden, Luckner și Quast [97], Bottgen, Quast și Kaden [27] lista autorilor ne fiind epuizată.

În literatura de specialitate din țara noastră se pot găsi lucrările lui Căpriță și Danchiv [34], Căpriță și Constantinescu [35], Pietraru [149], iar Zaharescu, Căpriță și Danchiv în [210] studiază posibilitățile de drenaj frontal ale depresiunii Rădăuților prin metoda elementului finit, pe un model în plan orizontal al pânzei de apă subterană.

A doua modalitate de soluționare este cea a modelelor analogice. Fundamentarea teoretică a acestei metode se citează lucrările lui Albring [1], Aravin [12], Becker [16], Certousov [41], Cristea [56], Heckesmidt [81], Ivan [87], Ivicsics [88], Kovács [107], Koženy [108], Mateescu [127], Pietraru [149], Tetelbaum [190]. Se menționează că s-au citat numai cele mai semnificative surse. Totalitatea fenomenelor care au același model matematic formează o clasă de fenomene analogice, când fac parte din domenii diferite ale fizicii.

Metodele analogice au apărut încă din secolul trecut în momentul când a fost necesară rezolvarea mișcării apei subterane în domenii cu condiții de margine dificile. Rezolvarea matematică, în aceste cazuri a ecuațiilor diferențiale era foarte greoaie, de multe ori imposibilă. Din acest motiv o serie de cercetători au recurs la studiul prin analogie al fenomenului de rezolvat cu un alt fenomen dintr-un domeniu diferit al fizicii, însă având același model matematic.

Prima referire la analogia dintre electricitate și hidraulică apare în lucrarea lui Maxwell din 1875 „Tratat despre electricitate și magnetism”; el a propus reprezentarea fizică a părții reale și imaginare a potențialului complex cu ajutorul distribuției potențialului și curentului pe o foiță de material

electroconductor.

În anul 1887 N.Jukovski în „Lecții de hidromecanică” consacră un capitol întreg analogiilor electrohidrodinamice, iar în anul 1913 R.Fösster publică articolul „Experimentale Lösung von Randwertaufgaben der Gleichung $\Delta u = 0$ ”, în care prezintă rezolvarea experimentală a ecuației lui Laplace cu ajutorul cuvei cu electroliți și face descrierea instalației folosite [67].

În perioada anilor 1918-1922 N.N.Pavlovski a organizat laboratorul de infiltrații din Petrograd (Leningrad) și a pus bazele științifice ale metodelor de modelare electrică [149].

În Franța metoda analogiei ~~maselctrice~~ a fost dezvoltată de L.Malevard, situația actuală fiind deosebit de avansată.

În Uniunea Sovietică s-au realizat diferite calculatoare analogice cu ajutorul cărora se pot studia diverse tipuri de ecuații, unele pot fi utilizate și la cercetarea în hidraulica subterană.

În R.D.G. s-a brevetat instalația de calcul analogic denumit Topotron care discreditează domeniul de studii în rețele de rezistențe electrice de triunghiuri echilaterale. Topotronul a fost folosit prima dată în 1972 și testat la un domeniu lângă Odera pentru cunoașterea limitei zonei de unde mișcarea apei subterane nu mai este influențată de nivelele din Odera [162], [163].

În [165] se semnalează că cercetările geohidraulice întreprinse în 1973 asupra domeniului subteran al zonei de captare prin infiltrație din Elba (Uzina de apă din Dresda-Tolkenvite), s-au efectuat cu un model electroanalog denumit de autori „analog 2”. Tot cu un „analog 2” a fost rezolvat sistemul de ecuații al rețelei fragmentelor (menționat în 2.4.4 fig.2.9) de către un grup de cercetători de la Universitatea Tehnică din Dresda [123].

Se menționează în [165] că cercetările vor continua în special în direcția dezvoltării modelelor independente analogice și digitale. Cu acestea se vor studia zone subterană de alimentare a uzinei de apă Dresda - Hosterwitz. O simulare, a diferitelor variante de îmbogățire și de captare a apei sub-

terane se poate face cu un program pentru calculator denumit „ HOREGO ” care dă posibilitatea studierii problemelor de mișcare plan orizontală a apei subterane cu parametri liniari folosind o rețea ortogonală având condiții de margine în prealabil stabilite.

Tendința de a conduce cercetările prin combinația analog + digital așa zise metodă hibridă este semnalată deja în 1972 de Tieser [191] .

O exemplificare concretă a acestei combinații este amintită în [69] în anul 1976. În cadrul unei colaborări tehnico-științifice dintre Universitatea Tehnică din Dresda și Politehnica din Cracovia, în ultimii ani au fost studiate diferite metode de simulare a mișcării apei subterane. Astfel în Cracovia s-a folosit un simulator analog de rețea electrică denumit AP 600 iar la Dresda s-a rulat programul „ HOREGO”. În cadrul acestei colaborări s-a cercetat captarea apei potabile pentru un mare oraș polonez.

Simulatorul analog de rețea electrică AP 600 este o instalație analogă bazată pe o rețea de rezistențe electrice. Poate servi pentru rezolvarea problemelor din fizica câmpurilor guvernate de ecuații diferențiale de ordinul doi parabolice sau eliptice. Constă din 3 blocuri. Primul bloc este format dintr-o rețea de rezistențe pentru 600 de noduri și un sistem automat de reglaj, de măsurare și înregistrare a datelor măsurate (imprimantă, perforator de bandă). Al doilea bloc servește pentru generarea condițiilor de margine și poate fi conectat la orice nod al rețelei blocului 1. Blocul 3-lea realizează simularea mișcărilor variabile în timp. Instalația AP 600 , într-o versiune modernă fabricată în serie a fost implementată în URSS, Bulgaria, Cehoslovacia. Prin cuplarea instalației AP 600 cu un calculator ODRA 1204 la Politehnica din Cracovia s-a realizat calculatorul hibrid APH 600 care poate rezolva și mai eficient problemele mișcării apei subterane.

Programul de calcul HOREGO rezolvă ecuația lui Laplace sau Poisson prin metoda diferențelor finite, pentru mișcarea plan-orizontală a apei subterane.

Datele de intrare în acest program sînt parametrii geohidraulici ale acviferului, condițiile de margine și parametrii tehnologici (debite). Se obțin înălțimile piezometrice în nodurile rețelei [98] .

În țara noastră Simionescu și Serbănescu [181] au folosit metoda analogiei electro-hidrodinamice în 1966 la studiul îmbogațirii artificiale a zonei de captare Luduș.

Studiul sportului subteran într-o unitate indiguită din lunca Dunării [99] efectuat de Kellmer P și Ivan C s-a făcut cu ajutorul modelării electrice. Concepția modelului s-a bazat pe ideea că afluxul subteran este rezultatul curgerii alimentate din pânza subterană din terasă și de Dunăre, la cele două extremități ale profilurilor de studii. Modelul s-a executat din hârtie electroconductoare în care s-au cunoscut trei condiții de margine ;

- nivelul piezometric al pânzei din complexul permeabil la limita terasei

- nivelul suprafeței terenului

- nivelul apei din Dunăre.

Utilizând modelul de analogie electrohidrodinamică în cadrul laboratorului de hidrotehnică a Institutului Politehnic " Traian Vuia" din Timișoara David [58] , [59] verifică formulele de debit obținute prin metode analitice pentru drenul ecranat de lungime finită dispus în curentul subteran; pentru sistemul periodic (șir) de puțuri cu drenuri radiale și pentru sistemul periodic (șir) de puțuri cu drenuri radiale tubulare pozate la nivelul stratului impermeabil.

În sfera tipurilor expuse mai înainte pentru anumite probleme se folosește și analogia cu membrana elastică. Modul de deformare a membranei elastice sub acțiunea unor sarcini exterioare poate fi asimilat, în anumite condiții, cu variațiile cotelor suprafeței libere ale apei într-un mediu poros. Acest tip de model cunoscut de multă vreme, din păcate este mai puțin utilizat în studiul mișcării apei prin medii poroase din cauza dificultăților mari care apar atât la construcția, cât și la măsurarea formei deformate a membranei [1] , [81] , [212] , [140] .

Autorul a propus ca măsurarea deformațiilor suprafeței membranei să se efectueze folosind franjele moire-urilor [156] utilizate în tensometrie. Însă și în această privință

există dificultăți din cauza lipsei deocamdată a tehnicii de laborator care să traseze rețele cu o uniformitate perfectă de 200-400 linii/mm. Această desime este uzuală în aplicațiile curente ingineresti din domeniul tensometriei.

Dacă în locul hîrtiei conductoare sau al apei din cuva electrolitică se folosesc soluții care într-un câmp electric devin bisefringente (prezintă efectul Kern), suma tensiunilor principale poate fi vizualizată într-un polariscop circular așa cum se pun în evidență izocromatele în modelele fotoelastice. Există numeroase substanțe care prezintă această proprietate de a deveni birefringente într-un câmp electric. Dintre acestea mai potrivită pentru analogia electrooptică este soluția de colorant organic de 15% în apă distilată, cunoscut sub denumirea comercială de Milling Yellow MGS. Această analogie o folosește Morușcă [133] pentru studiul mișcării apei din bazine dreptunghiulare de infiltrare către puțuri.

Înainte de încheierea acestui subpunct se amintesc și numeroasele lucrări de analogie din domeniul hidraulicii subterane efectuate de Pietraru.V. [149] și de Ivan C [87]. Lucrările citate reprezintă nu numai o monografie a problemelor de calcul ale infiltrațiilor dar reprezintă și o exemplificare cum trebuiesc soluționate numeric și analogic multitudinea de cazuri care apar în proiectarea noilor obiective din domeniul construcțiilor hidrotehnice, la rezolvarea celor mai variate probleme de infiltrații.

2.7. Concluzii parțiale

1. Îmbogățirea tehnică a straturilor acvifere este un procedeu folosit în alimentarea cu apă (potabilă sau industrială) și poate asigura cerințele crescînde cantitative și calitative ale apei.
2. Dintre multiplele metode tehnologice prezenta teză aprofundează metoda directă folosind construcțiile liniare de suprafață (șanțuri și canale)
3. Folosirea soluțiilor analitice-matematiche la mișcarea apei subterane nu este încheiată nici astăzi chiar

decă în prezent există o tendință mai puțin accentuată în acest sens.

4. Privind particularizarea infiltrației prin construcții liniare literatura de specialitate conține o serie de soluții teoretice. Acestea însă în general idealizează situația din natură și introduc unele simplificări în calcule.
5. Autorul acestei teze și-a propus să aducă o modestă contribuție la analizarea unor aspecte care au o influență asupra exploatarea și eficacității instalațiilor de îmbogățire din șanțuri și canale.
6. În prezent pe plan mondial, pentru rezolvarea problemelor mișcării apei prin medii poroase se folosesc din ce în ce mai mult calculatoarele electronice și modelele analogice. Ultimele semnalări din literatura de specialitate arată tendința de a conduce cercetările folosind combinația calculator + analogie, prin așa zisa metodă hibridă.

C A P I T O L U L III

ANALIZA CONDIȚIILOR FIZICE ȘI MATEMATICE ALE MIȘCĂRII APEI ÎN MEDII POROASE ÎN CAZUL ÎN- FILTRĂRII PRIN CONSTRUCȚII LINIARE

3.1. Legea lui Darcy și domeniul valabilității ei

3.1.1. Generalități

În 1856, în baza cercetărilor întreprinse pentru proiectarea unor fântini necesare alimentării cu apă a orașului Dijon, Darcy a stabilit legea scurgerii apelor subterane [78],
[196]

$$v = k \frac{h}{l} \quad (3.1)$$

Această lege cunoscută azi în literatura de specialitate sub denumirea de „legea lui Darcy” precizează că viteza de filtrație este proporțională cu panta hidrolică

$$j = \frac{h}{l} \quad (3.2)$$

Factorul de proporționalitate k , denumit coeficient de permeabilitate este o constantă a terenului și are dimensiunea unei viteze. Viteza aparentă de filtrație

$$v = \frac{Q}{F} \quad (3.3)$$

nu are o semnificație fizică, deoarece F reprezintă întreaga secțiune a suprafeței de scurgere a terenului, pe când în mod real mișcarea apei se manifestă numai în golurile dintre granulele terenului. Totuși formula (3.1) este unanim utilizată și astăzi pentru definiția ei simplistă și permite aprecieri statistice globale asupra mărimii vitezei de scurgere din mediul poros.

În locul vitezei de filtrație se poate evalua o viteză reală de filtrație care este egală cu raportul dintre debitul printr-o suprafață plană din mediul poros, perpendiculară pe direcția curentului de fluid și aria golurilor din suprafața considerată.

$$v_r = \frac{Q}{nF} \quad (3.4)$$

unde n este porozitatea și nF este partea din secțiunea de scurgere care corespunde golurilor dintre granule. Formula (3.4) din valoarea reală a vitezei reale care apare între granule, presupunând că secțiunea F considerată are o porozitate suficientă. Această presupunere însă limitează valabilitatea legii lui Darcy, valabilitate ce depinde de mărimea granulelor a mediului poros.

Măsurători exacte întreprinse la fântâni executate și cercetări de laborator au arătat însă că între panta hidraulică și viteză nu există totdeauna o relație liniară. Dificultățile matematice ce apar la acceptarea a unei alte legi, diferă de cea liniară, sînt însă considerabile. În cadrul prezentei lucrări autorul consideră valabilitatea legii liniare a lui Darcy. În cele ce urmează se va încerca de a justifica această ipoteză pe baza cercetărilor întreprinse și publicate

în literatura de specialitate pînă în prezent.

De la publicarea legii lui Darcy, o serie de cercetători au căutat să confirme valabilitatea ei, iar alții bazîndu-se de asemenea pe rezultatele unor măsurători, au criticat-o și au propus alte formule.

3.1.2. Clasificarea mișcărilor din diverse medii poroase

Clasificarea se poate face după forțele care produc mișcarea și după cele care o frînează. Astfel avem în medii bifazice următoarea clasificare:

Tabelul 3.1

Nr. crt.	Forța care produce mișcarea	Forța care frînează mișcarea	Tipul mișcării
1	Forța gravitațională	Frecarea și aderența	Preliniară (microfiltrație)
2	Forța gravitațională	Frecarea	Laminară
3	Forța gravitațională	Inerția și frecarea	Tranziție
4	Forța gravitațională	Inerția	Turbulentă

În prezenta lucrare nu se va considera mișcarea în medii trifazice, deasupra nivelului liber al apei subterane, unde intervine capilaritatea.

Pentru caracterizarea în continuare a tipurilor de mișcare din tabelul 3.1 se va face raportul dintre forțele de frînare și cele care produc mișcarea.

Aceste rapoarte adimensionale sînt:

- pentru mișcarea preliniară

$$\frac{F_f + F_{ad}}{F_g} = \frac{F\eta \frac{dv}{dn} + I_0 V \rho g}{V \rho g} = \frac{v \cdot v}{l^2 g} \cdot I_0 = Nr_1 \quad (3.5)$$

- pentru mișcarea laminară

$$\frac{F_f}{F_g} = \frac{F \eta \frac{dv}{dn}}{V \rho g} = \frac{v \nu}{l^2 g} = MK \quad (3.6)$$

- pentru mișcarea de tranziție

$$\frac{F_i + F_f}{F_g} = \frac{V \rho \frac{dv}{dt} + F \eta \frac{dv}{dn}}{V \rho g} = \frac{v^2}{lg} + \frac{v \nu}{l^2 g} = Nr_2 \quad (3.7)$$

- pentru mișcarea turbulentă

$$\frac{F_i}{F_g} = \frac{V \rho \frac{dv}{dt}}{V \rho g} = \frac{v^2}{lg} = Fr \quad (3.8)$$

De asemenea se va putea lua în considerare și raportul adimensional al forțelor de frînare. Acest raport, ca valoare numerică va preciza când anume o forță de frînare devine dominantă față de cealaltă. Astfel se va putea stabili mai precis limita zonelor de valabilitate a diverselor tipuri de mișcări. Limita zonei între mișcarea turbulentă și cea de tranziție este caracterizată prin neglijarea forțelor de frecare față de cele inerțiale, iar limita dintre mișcarea de tranziție și cea laminară va fi caracterizată prin dominarea forțelor de frecare față de cele inerțiale.

Astfel cele două limite se pot caracteriza prin raportul forțelor de inerție față de frecare

$$\frac{F_i}{F_f} = \frac{V \rho \frac{dv}{dt}}{F \eta \frac{dv}{dn}} = \frac{v l}{\nu} = Re \quad (3.9)$$

De asemenea la aflarea limitei inferioare a legii lui Darcy se va face raportul forțelor de aderență către cele

de frecare

$$\frac{F_{ad}}{F_f} = \frac{I_0 V \rho g}{F \eta \frac{dv}{dn}} = I_0 \frac{l^2 g}{v \cdot \eta} = Nr_3 \quad (3.10)$$

În fine ca ultim raport se va putea scrie cel dintre forța de aderență și gravitațională, aceea zonă unde forța de frecare devine nulă și unde încetează mișcarea

$$\frac{F_{ad}}{F_g} = \frac{I_0 V \rho g}{V \rho g} = I_0 = Nr_4 \quad (3.11)$$

După cum se observă unele din rapoartele de mai sus sînt identice cu cîteva numere adimensionale cunoscute din teoria similitudinii hidraulice. Astfel (3.8) este numărul lui Froude, (3.9) este numărul lui Reynolds, iar (3.6) dă numărul lui Mosony-Kovács.

3.1.3 Caracterizarea limitelor de valabilitate a domeniilor mișcărilor prin medii poroase.

După cum s-a precizat în 3.1.1 raportul adimensional al forțelor de frînare va putea stabili limita zonei de valabilitate a unui tip de mișcare.

De asemenea prin măsurători experimentale se poate stabili care dintre forțele de frînare din tabelul 3.1 devin dominante și care anume se pot neglija.

Rezumînd cercetările lui Forchheimer (1926), Zamatin (1928), Lindquist (1933), Irmay (1958), Veronese și Juhász (1967); Kovács [107] propune următoarea delimitare a mișcărilor din medii poroase:

$$\begin{aligned} R_{ec} < 10 & \text{ zona laminară Darcy} \\ 10 < R_{ec} < 100 & \text{ prima zonă de tranziție Lindquist} \\ 100 < R_{ec} < 1000 & \text{ a doua zonă de tranziție} \\ R_{ec} > 1000 & \text{ zona turbulentă Froude} \end{aligned}$$

unde valoarea R_{ec} este

$$R_{ec} = \frac{4}{1-n} \cdot \frac{R_e}{\alpha} \quad (3.12)$$

iar R_e are definiția după (3.9), n este porozitatea, iar α este un coeficient de formă și depinde de geometria granulelor și de natura mineralogică-petrografică (de ex. pentru cuarțuri $\alpha = 7-11$ iar pentru gresie $\alpha = 20$).

În fig.3.1 se prezintă sinoptic delimitarea diferitelor zone ale tipurilor de mișcare în medii poroase.

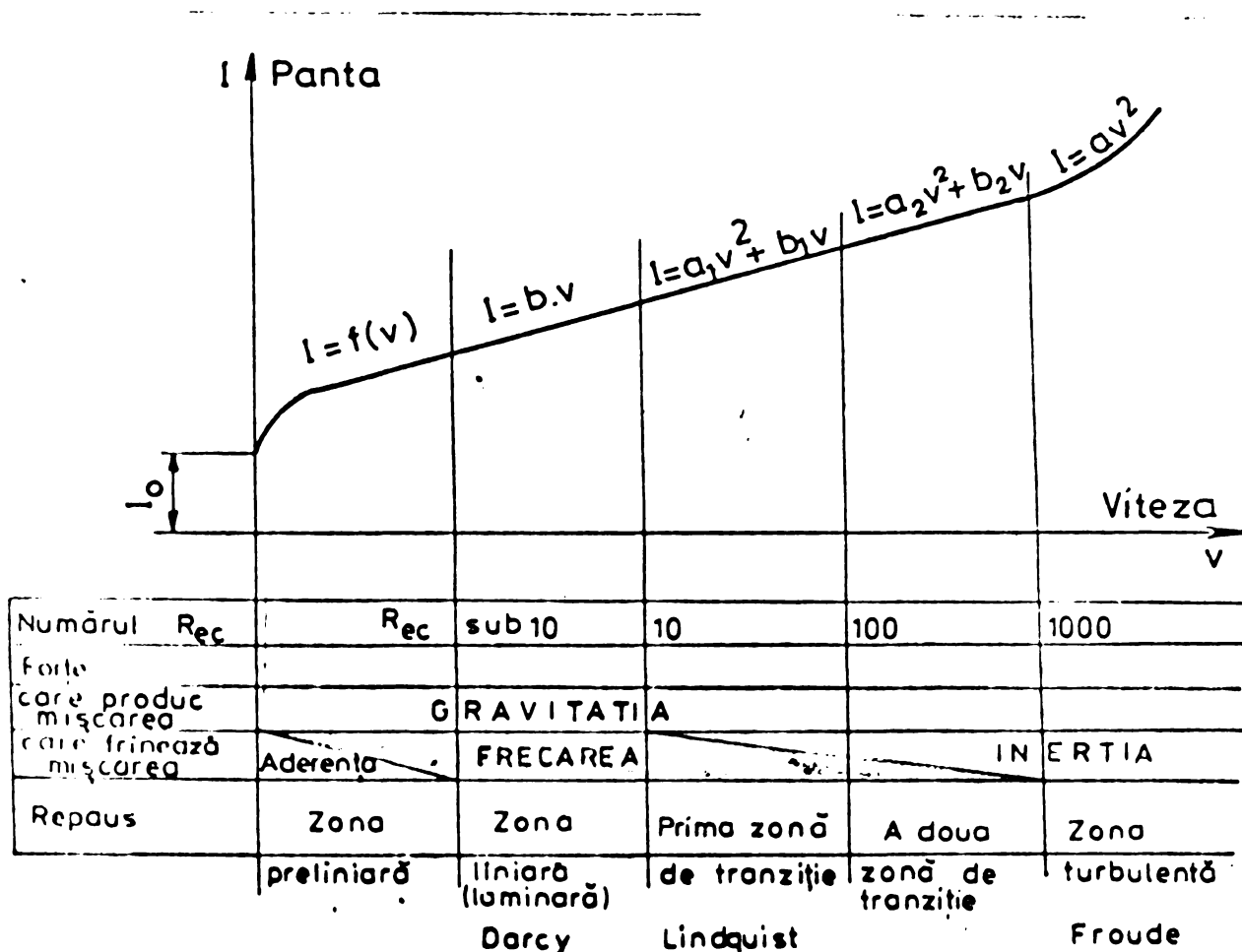


Fig.3.1 DELIMITAREA TIPURILOR DE MIȘCARE ÎN MEDII POROASE

Pe baza confruntării acestor rezultate se poate afirma în concluzie, că deși legea Darcy este încadrată în anumite limite, ea corespunde totuși realității în marea majoritate a cazurilor practice legate de mișcare apei subterane [198], [78], [44], [45], [127]. În cadrul prezentei lucrări se va considera valabilitatea ei.

3.2. Ecuațiile fundamentale ale mișcării apei în medii poroase.

3.2.1. Formularea matematică

În condițiile întâlnite în practică, mișcările prin medii poroase sînt de obicei, tridimensionale. Caracterul tridimensional al mișcării se poate manifesta chiar și în cazul cînd mediul prezintă aceeași configurație geometrică în plane paralele cu un plan dat. Dată fiind complexitatea problemelor tridimensionale, în hidraulică se indică de a se utiliza unele simplificări ale fenomenelor studiate. Acestea permit să reducă problemele tridimensionale la cele bidimensionale cu rezultate satisfăcătoare.

În cazul problemelor bidimensionale la mișcările plane, componentele vitezei și presiunea vor depinde numai de coordonatele x și y față de un sistem cartezian de axe luat într-un plan arbitrar, paralel cu planul mișcării. Problemele plane se vor reduce în ultimă analiză la găsirea unei funcții necunoscute care satisface anumite condiții la limită pe frontiera domeniului în care se studiază mișcarea, formulînd în preslabil matematic fenomenul mișcării apei prin mediul poros.

Modelul matematic se poate defini ca fiind reprezentarea sau descrierea sistemului examinat prin intermediul unui limbaj formal oarecare, care pune în evidență și relațiile între variabilele problemei și permite să se studieze comportarea acestui sistem. Prin sistem, deși există diferite definiții, în această lucrare s-a admis definiția dată după Nicolsu, Ed. și Popovici Al, că este punerea în evidență a unei relații între cel puțin a două mărimi sau obiecte.

Modelarea matematică a mișcării apei prin medii poroase s-a dezvoltat în trei direcții de formulare:

- diferențială
- integrală
- variațională

Prima formulare necesită rezolvarea unei ecuații cu derivate parțiale de ordinul doi cu două variabile independente, domeniul de definiție și condițiile la limită pe frontiera domeniului fiind date. Aici intră ecuațiile de tip Laplace, Poisson și Fourier.

A doua formulare necesită rezolvarea unei ecuații integrale. Aceasta a fost considerată de către Hilbert pentru a ilustra cercetările sale în domeniul ecuațiilor integrale. Mai târziu problema a fost atacată pe diferite căi de Noether, de Caius Iacob care a utilizat ecuații integrale de tip Fredholm precum și de alți cercetători [66].

Oricât sînt de frumoase, în principiu, în practică rezolvarea ecuațiilor integrale se folosește foarte rar. Rezolvarea numerică a ecuațiilor integrale prezintă dificultăți matematice mari, chiar și în cazurile cele mai simple.

A treia formulare se bazează pe bine cunoscutul principiu din mecanică „a lucrului mecanic minim”. Expresia lucrului mecanic este dată de o integrală dublă asupra domeniului D în al cărui integrand apare o funcție φ pe care va trebui să o precizăm ca integrala să aibă o valoare minimă.

Deci funcția $\varphi = \varphi(x, y)$ se va preciza astfel ca integrala dublă sau denumită și „funcțională”

$$E = \iint_D F(x, y, \varphi, \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}) dx dy \quad (3.13)$$

în domeniul D închis al planului x, y să aibă un minim. Cu notațiile

$$\varphi_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \varphi_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (3.14)$$

se scrie „eulerianul”

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial \varphi_y} \right) = 0 \quad (3.15)$$

De obicei această este o ecuație cu derivate parțiale de ordinul doi. Dacă reușim să găsim o soluție a lui (3.15), aceasta va minimaliza funcționala (3.13)

3.2.2. Ecuațiile mișcării apei prin medii poroase

În cazul celei mai generală legea lui Darcy sub formă vectorială se scrie [176] :

$$\bar{v} \cdot \bar{n} = -k(\bar{n}) \cdot \text{grad } H \quad (3.16)$$

în care \bar{v} = vectorul viteză de filtrație

\bar{n} = versorul direcției vitezei

$k(\bar{n})$ = coeficientul de permeabilitate în direcția vitezei

Relația (3.16) stabilește o legătură univocă între vectorii \bar{v} și $\text{grad } H$, deci pentru un gradient dat nu poate să-i corespundă decât un singur vector \bar{v} .

Pentru obținerea ecuației mișcării se atașează legii lui Darcy ecuația de continuitate care în cazul mișcării fluidelor incompresibile, este de forma

$$n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (3.17)$$

În (3.17) s-a presupus că porozitatea n nu depinde de timp și că ea nu este influențată de compresibilitate, de natura fluidului sau de alți parametri.

Dacă mediul poros este compresibil, porozitatea lui este funcție de timp atunci ecuația de continuitate are forma

$$\frac{\partial (n\rho)}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad (3.18)$$

Ecuațiile (3.16) și (3.18) conduc la relația

$$\text{div}(\rho k \text{grad } H) = \frac{\partial (n\rho)}{\partial t} \quad (3.19)$$

care dezvoltată și prin eliminarea termenilor a căror valoare numerică este neglijabilă, se transformă în

$$\text{div}(k \text{grad } H) = A \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.20)$$

sau dezvoltat

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) = A \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.21)$$

In cazul mediului omogen și izotrop (3.21) devine

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{A}{k} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.22)$$

care este cunoscută în ecuațiile fizicii matematice sub denumirea de ecuația difuziunii a lui Fourier.

Termenul A are sensul fizic al unui coeficient de înmagazinare a apei în strat sub influența variației de presiune și el conține coeficientul de compresibilitate al mediului poros α , coeficientul de compresibilitate al apei β , greutatea specifică a apei în condiții de presiune și temperatură date γ și porozitatea totală a stratului scvifer n legați după relația

$$A = n \gamma (B + \frac{\alpha}{n}) \quad (3.23)$$

In cazul mișcărilor permanente $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$ și pentru cazul

cel mai general al mediilor neomogene și anizotrope ecuația (3.20) devine

$$\text{div} (k \text{ grad } H) = 0 \quad (3.24)$$

și (3.24)

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) = 0 \quad (3.25)$$

Dacă mediul poros este omogen și izotrop (3.25) se transformă în ecuația lui Laplace:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (3.26)$$

In cazul domeniilor cu surse, definite prin funcția $f(q)$ și cunoscută, ecuația lui Laplace (3.26) se transformă într-o ecuație Poisson (3.26)

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = f(q) \quad (3.27)$$

Dacă ne referim la bazinele de apă subterană cuprinzând teritorii întinse și adâncimi foarte mici în raport cu dimensiunile în plan, de cele mai multe ori se dovedește admisibil să se neglijeze variațiile de adâncime a apei subterane și să se aplice ipoteza lui Dupuit a liniilor de curent orizontale. În aceste condiții mișcarea poate fi studiată într-un singur plan orizontal x, y .

La scrierea ecuației de continuitate trebuie introdusă noțiunea de „porozitate efectivă”.

Porozitatea efectivă n' este o noțiune similară cu porozitatea totală n , care reprezintă volumul porilor raportat la volumul total; spre deosebire de acesta, n' reprezintă acea parte din volumul porilor care participă la procesul de infiltrație nepermanente, raportată la volumul total. De regulă cei doi coeficienți nu sînt identici.

Raportul n'/n este cu atât mai apropiat de 1 cu cît nebulul poros este format din granule mai grosiere și fiind mai permeabil.

După cercetările lui Boreli și a lui Vachend citați în [149] de Pietraru, porozitatea efectivă n' nu este o constantă ci variază în timpul procesului de infiltrație nepermanentă, depinzînd foarte mult și de viteză de coborîre sau de ridicare a suprafeței libere. Tot Pietraru [149] consideră ipoteza acceptabilă în calculele practice, constanta lui n' , pentru medii foarte permeabile (nisipuri și pietrișuri) și în cazul variației lente a suprafeței libere.

Deci în acest caz mișcarea într-un singur plan orizontal respectă relația

$$\operatorname{div} (k H \operatorname{grad} H) = n' \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.28)$$

În cazul mediilor omogene și izotrope alimentate de la suprafața terenului cu un debit distributiv q , relația (3.28) se scrie sub forma

$$\operatorname{div} (H \operatorname{grad} H) = \frac{n'}{k} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{q}{k} \quad (3.29)$$

$$\text{sau} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{n'}{k} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{q}{K} \quad (3.30)$$

ecuația stabilită de Boussinesq și a cărei integrare este foarte dificilă.

Dacă vectorul vitezei este considerat orizontal, fenomenul mișcării este comparabilă cu ecuația mișcării într-un strat sub presiune de grosime a și care este de forma

$$\text{div} (k a \text{ grad } H) = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.31)$$

în care $T = ka$ este noțiunea de transmisivitate, iar S reprezintă coeficientul de înmagazinare.

Dacă se definește transmisivitatea sub forma unui tensor al transmisivităților, care operează la fel cu tensorul permeabilităților

$$T = \sum k_i a_i \quad (3.32)$$

este necesar ca în tot complexul celor i straturi să fie respectată condiția ca sarcina hidrolică să fie constantă în lungul oricărei verticale, condiție care decurge din admiterea ipotezei Dupuit.

În acest caz ecuația (3.31) se poate scrie sub forma

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T(x,y) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T(x,y) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.33)$$

Dacă $T(x,y) = \text{const}$, adică mișcarea apei subterane are loc sub presiune într-un strat de grosime constantă sau dacă variațiile de înălțime a coloanei de apă sînt neimportante în cazul curgerii cu nivel liber, ecuația (3.33) devine

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.34)$$

Considerînd și debitul superficial $q(x,y)$ provenit alimentarea din precipitații, irigații sau pierderi prin evaporație, prelevări ecuația (3.34) se scrie

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{q}{T} \quad (3.35)$$

q având semnul + pentru alimentări și - pentru pierderi

3.2.3. Bazele teoriei hidrodinamice ale mișcării apei prin medii poroase.

După cum este cunoscut din bazele hidrodinamice ale teoriei infiltrației [41], [127], [149] în cazul mișcării plane a apei subterane, spectrul hidrodinamic este alcătuit din două familii de curbe:

liniile echipotențiale ($\psi = \text{const}$, sau $H = \text{const}$) și liniile de curent ($\psi = \text{const}$, sau $Q = \text{const}$), iar mișcarea este potențială.

Pentru fluide incompresibile în regim de mișcare plan permanent vitezele derivă dintr-un potențial

$$\bar{v} = \text{grad} \psi \quad (3.36)$$

La mediile poroase omogene și izotrope potențialul vitezelor se definește prin funcția

$$\psi(x,y) = k H(x,y) + C \quad (3.37)$$

unde, C este o constantă pentru întregul domeniu (x,y) iar H este sarcina hidraulică funcție de (x,y). Funcția ψ verifică ecuația lui Laplace (3.26). De obicei însă nu se cunoaște la început funcția ψ , ci va trebui să găsim forma ei din rezolvarea relației (3.26), operație dificilă, chiar și pentru contururile cele mai simple. Literatura prezintă metodele de rezolvare a problemei infiltrațiilor elaborate pînă în prezent de numeroși cercetători.

$$\text{Ecuația } \psi(x,y) = \text{const} \quad (3.38)$$

reprezintă o curbă plană, în punctele căreia potențialul vitezelor are o aceeași valoare constantă, respectiv aceasta este o linie echipotențială fiind o funcție de coordonate [47], [78], [127], [149].

Dacă în ecuația (3.38) se dă constantei valori diferite, se obține un șir de ecuații cu care se poate construi o familie de linii echipotențiale caracteristice mișcării date. Se

mai amintește că de-a lungul liniei echipotențiale viteza este mereu perpendiculară pe această linie.

Din teoria mișcărilor potențiale a rezultat că derivata parțială a potențialului viteză în raport cu axele de coordonate sînt egale cu proiecțiile vitezei pe axele de coordonate

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad , \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (3.39)$$

sau vectorial

$$\bar{v} = \text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \bar{n} \quad (3.40)$$

unde \bar{n} este versorul normalei la linia $\varphi = \text{const}$ în punctul considerat.

Dar proiecțiile vitezei pe axele de coordonate se pot obține și din derivatele parțiale ale unei alte funcții ψ denumită funcția de curent. Intre φ și ψ există relațiile Cauchy-Riemann.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = v_x \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = v_y$$

$$\text{Ecuația } \varphi(x,y) = \text{const} \quad (3.42)$$

reprezintă o linie de curent. Dacă în ecuația (3.42) se dă constantei valori diferite, se obține un șir de ecuații cu care se poate construi o familie de linii de curent caracteristice mișcării date.

Ecuația unei linii de curent este

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} \quad (3.43)$$

și care exprimă că vectorul viteză este tangent la linia de curent.

Debitul care se scurge între liniile de curent i și k are valoarea

$$\psi_k - \psi_i = Q_{ik} \quad (3.44)$$

3.3. Condițiile de margine

Din punct de vedere fizic se pot deosebi patru tipuri de frontiere [41] , [78] , [127] , [149] .

a) Frontiera de alimentare, care este cea prin care fluidul poate intra sau ieși din mediul poros. Pe această frontieră valoarea funcției de potențial φ sau a funcției H este constantă. Acestea sînt condiții Dirichlet și implică faptul că frontiera de alimentare reprezintă o linie echipotențială.

În baza celor precizate la 3.23 viteza este normală la frontieră, altfel scîrs, notînd cu ds elementul de arc al acestei frontiere, condiția de margine pentru acest tip de frontieră se poate pune sub formă

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (3.45)$$

b) Frontiera impermeabilă, prin care se realizează contactul mediului poros cu un mediu cu coeficient de filtrație nul. În orice punct de-a lungul frontierei impermeabile viteza este tangentă la frontieră, deci componenta normală este nulă $v_n = 0$ sau

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial s} = 0 \quad (3.46)$$

Cu alte cuvinte frontierele impermeabile sînt linii de curent și este indicat de a utiliza funcția de curent $\psi = \text{const}$. Prima relație din (3.46) este o condiție Neumann și implică faptul că linia de curent este perpendiculară pe linia echipotențială.

c) Frontiera liberă , care desparte partea din mediul poros în care se găsește fluid de partea în care acesta nu există. De-a lungul ei se poate scrie condiția (3.46) sau că $\psi = \text{const}$. Afară de acestea, pe frontiera liberă, presiunea este egală cu cea atmosferică. În sistemul de referință relativ considerînd ca origine a presiunilor cea atmosferică, pentru un fir de curent a b (vezi fig. 3.2) se poate scrie relația lui Bernoulli

$$H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + y \quad (3.47)$$

și deoarece viteza în mediul poros este foarte mică se poate neglija sarcina din energia cinetică și se obține

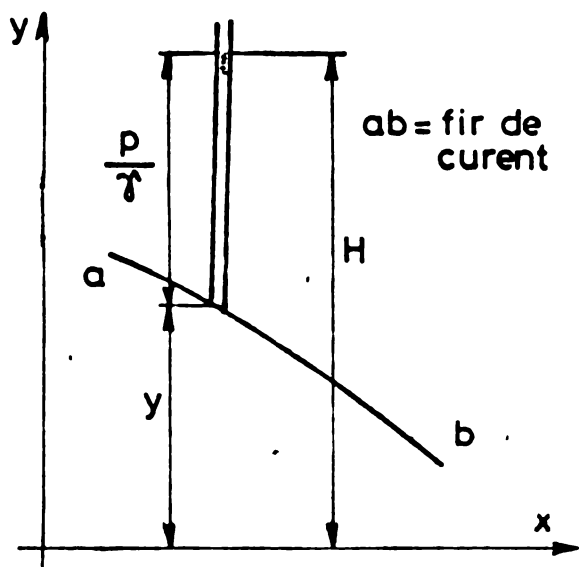


Fig. 3.2 FRONTIERA LIBERA

$$H = \frac{p}{\gamma} + y \quad (3.48)$$

Dar de-a lungul frontierei libere $\frac{p}{\gamma} = 0$ și deci (3.48) devine

$$H = y \quad (3.49)$$

iar potențialul este $\varphi(x,y) = ky + \text{const}$ (3.50)

în care y este ordonata frontierei libere.

Prin derivarea acestui potențial după direcția

frontierei se obține

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s} = k \frac{\partial y}{\partial s} \quad (3.51)$$

în care derivata parțială a lui y după s este sinusul unghiului cuprins între tangenta geometrică în punctul considerat și orizontală. Dar derivata parțială a lui φ după s este viteza v_s dirijată după direcția tangentei în punctul considerat deci

$$v_s = k \sin \alpha \quad (3.52)$$

adică viteza după direcția tangentei într-un punct al frontierei libere este proporțională cu sinusul unghiului de înclinare al tangentei față de orizontală.

d) Frontiera umedă este suprafața mediului poros care reprezintă în același timp suprafața de delimitare a fluidului din mediul poros de atmosfera înconjurătoare. Unii autori folosesc în loc de frontieră sau suprafața umedă denumirea de suprafața de alunecare, suprafața de izvorire sau suprafața de picurare.

Pe această frontieră se poate scrie că presiunea este egală cu cea atmosferică, deci ca și la frontiera liberă relațiile (3.49) și (3.50) rămân valabile.

În calculele de infiltrație nu se cunoaște de la început poziția suprafeței libere și nici mărimea zonei de izvo-

rîre, ceea ce face ca problemele de acest fel să se rezolve cu unele dificultăți suplimentare.

3.4. Metode de rezolvare a ecuațiilor mișcării

Rezolvarea exactă a ecuațiilor prezentate la punctul 3.2 în general este posibilă numai în unele cazuri simple. Analiza matematică permite să se obțină soluții pentru câteva situații, puține la număr, în care forma domeniului este suficient de regulată. Dezavantajul procedurilor de rezolvare din analiza matematică este faptul că problemele rezolvate sînt dintre cele mai simple în practică.

Dar de obicei numeroasele probleme din practică construcțiilor hidrotehnice ale alimentărilor cu apă și a îmbunătățirilor funciare nici nu se pot soluționa cu analiza matematică și nu necesită o rezolvare directă a ecuațiilor menționate.

Clasificarea cea mai potrivită a metodelor practice de calcul uzuale în etapa actuală este cea după Pietraru [149] și Ivan [87]. Sistematizînd rezumativ aceste metode sînt:

- a) Metode care se bazează pe determinarea spectrului hidrodinamic, denumite metode hidrodinamice
- b) Metode simplificate care nu se bazează pe spectrul hidrodinamic și care apelează la unele ipoteze simplificatoare privind cinematica curenților, denumite metode hidraulice
- c) Metode combinate între cele două

3.4.1. Metode care se bazează pe determinarea spectrului hidrodinamic

Din această grupă se pot enumera:

- metode analitice care la rîndul lor pot fi: metoda reprezentării mișcării prin funcții de variabilă complexă, metoda transformărilor complexe inițiată de Pavlovski, funcția lui Jukovski, metode bazate pe aplicarea ecuațiilor diferențiale (Polubarinova-Kocina), metoda condițiilor de margine propusă de Numerov, metoda hodografului vitezelor (Hamel, Vedernikov, Polubarinova-Kocina, Aravin-Numerov [11]).

- metode analogice de laborator dintre care se amintesc: analogia electrică în mediu conductor continuu și cele

cu modele în rețea, cele cu modele din rețele hidraulice, membranele elastice, modele cu câmp magnetic, cu flux termic analogia Darcy-Poiseuille (Hele-Shaw) sau modelele fizice experimentale la scară mare sau naturală.

- metode grafice prin aproximații succesive pentru calcule preliminare și care sînt folosite la desenarea liniilor echipotențiale și de curent folosind proprietățile geometrice ale spectrului hidrodinamic.

- metode numerice. Numeroase probleme de infiltrație sînt deosebit de complexe, astfel încît valoarea lor prin celelalte metode implică adoptarea unor scheme de calcul simplificate, care conduc adesea la abateri importante de la fenomenul real. În aceste situații este necesar să se recurgă la metode numerice, care deși aproximative, dau posibilitatea unei apropieri mai mari de condițiile de fenomenul concret din natură.

Printre metodele numerice de calcul utilizate la rezolvarea problemelor de mișcare a apei subterane, avînd ca ecuație de bază ecuația lui Laplace, se pot menționa: metoda diferențelor finite, metoda Monte Carlo și metoda elementelor finite, metoda programării liniare. Toate acestea însă facilitează folosirea calculatoarelor electronice fapt pentru care încep să cunoască o dezvoltare și răspîndire în ultima vreme din ce în ce mai accentuată.

a) Metode diferențelor finite

La folosirea acestei metode cercetătorii s-au preocupat de unele aspecte specifice și anume:

- îmbunătățirea convergenței iterației la rezolvarea sistemului de ecuații examinate de Thimiot și Efthimistos în 1967 și de Pietraru în 1968 [149]

- precizia metodei abordată de Collatz prin asocierea intimă între dezvoltarea în serie Taylor a funcției necunoscute și a ecuației diferențiale de integrat. În această metodă denumită plurilocală intervin nouă coeficienți după tiparul din fig.3.3.

- facilitatea automatizării calculului electronic la codificarea și la felul cum trebuie tratate nodurile în calcul

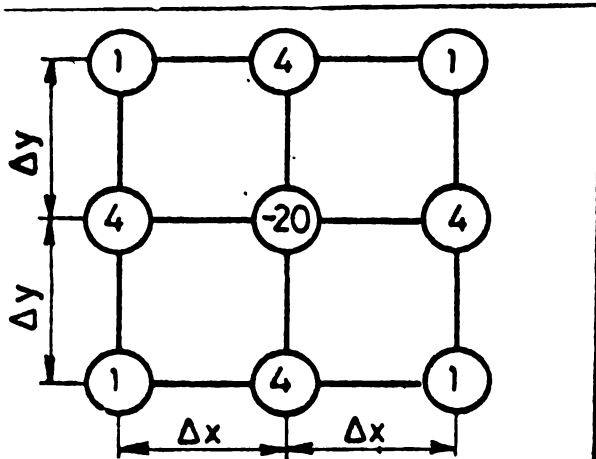


Fig. 3.3 TIPARUL COEFICIEN-
TILOR LA METODA PLURILOCALA

rezolvată de Pietraru [147] ,
[149] .

- explicitarea condițiilor de
limită în cazul general al re-
țelelor dreptunghiulare cu pes
variabil în coordonate carte-
ziene și polare, problema care
s-a preocupat David.I [57].

b) Metoda Monte Carlo

Această metodă a fost elabora-
tă în 1948 și a căpătat o lar-
gă răspîndire în diverse domenii

datorită posibilităților oferite de noua tehnică de calcul [87]
[198] . La baza metodei stă teoria probabilității privind mărimi-
le aleatoare. Ea are avantajul că permite obținerea soluției
ecuației diferențiale chiar și într-un singur punct, fără a fi
necesară determinarea soluției în alte puncte. În problemele
practice ale mișcării apei în medii poroase începe să fie folo-
sită și se pare că datorită acestui avantaj deosebit de impor-
tant (obținerea de exemplu a sarcinii hidraulice în zonele
interesate fără parcurgerea întregului domeniu) aplicabilita-
tea ei se va extinde în viitor.

c) Metoda elementelor finite se va prezenta amplu în
capitolul IV.

d) Metoda programării liniare

Pietraru și Drobot [150], [151] , [152] au abordat un
nou mod de evaluare a debitului potențial exploatabil al stra-
turilor acvifere. În acest sens pe baza cercetărilor proprii
și a interpretării unor date rezultate, autorii literaturii ci-
tate prezintă posibilitatea de a calcula debitul acvifer prin me-
toda programării liniare.

Domeniul de mișcare se împarte într-o rețea de ochiuri
de formă patrată. Principiul set de restricții al problemei
are la bază un calcul de bilanț al debitelor, realizat ochi cu
ochi și implicit pentru întreg domeniul studiat. Un alt set de
restricții se referă la nivelurile piezometrice minime admisibile.

Funcția obiectiv reprezintă suma debitelor exploatabile suplimentar din ochiurile cu captări. Soluția optimă va fi reprezentată de acele valori care maximizează funcția obiectiv.

În model intervin, de asemenea, diversele condiții de margine de la frontieră sau din interiorul domeniului modelat, condiții care sînt utilizate în zonele de alimentare sau de descărcare a scviferului, precum și în zonele de izvorîre sau la legătură hidraulică între cursurile de apă de suprafață și de apă subterană. Obținerea unor rezultate corecte este condiționată de determinarea prealabilă a parametrilor hidraulici ai scviferului. Si această metodă, utilizează tehnica modernă de calcul pentru precizarea valorilor numerice.

3.4.2. Metode simplificate (hidraulice)

grupă din care se amintesc:

- ipoteza Dupuit-Forchheimer prin care se consideră că liniile de curent sînt paralele cu un plan dat, în particular orizontal.

- ipoteza Dupuit generalizată denumită în literatura sovietică ipoteza Mistiev-Ghirinski, în care liniile de curent se consideră orizontale în stratele foarte permeabile și verticale în cele mai puțin permeabile, valabilă numai în anumite condiții de margine.

3.4.3. Metode combinate

- ipoteza lui Hooghoudt, în care pentru zonele cu surse punctiforme (puțuri, drenuri) se consideră că liniile de curent sînt radiale;

- metoda coeficienților de rezistență hidraulică, dezvoltată de școala sovietică, pentru calculul infiltrațiilor sub construcții hidrotehnice (Muserov și Ciugaev) și varianta sa - metoda drenului perfect echivalent, dezvoltată în mai multe țări (Borisov și Sestakov în U.R.S.S., Pietraru în România).

Aceasta face parte din metodele analitice aproximative bazate pe împărțirea domeniului de infiltrație în fragmente caracteristice legate în serie. Metoda este recomandată pentru calculul infiltrației pe sub construcțiile hidrotehnice cu

profil subteran mai complicat [11] .

Pierderea de sarcină pe fiecare fragment se exprimă prin relația

$$h_1 = \xi_1 \frac{q}{k} \quad (3.53)$$

unde q este debitul specific infiltrat, iar ξ_1 - coeficientul de rezistență propriu fragmentului considerat.

Tinând seama de faptul că suma pierderilor de sarcină este H , rezultă

$$H = \sum_{i=1}^n h_i = \frac{q}{k} \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (3.54)$$

de unde se poate calcula debitul q

$$q = \frac{k H}{\sum_{i=1}^n \xi_i} \quad (3.55)$$

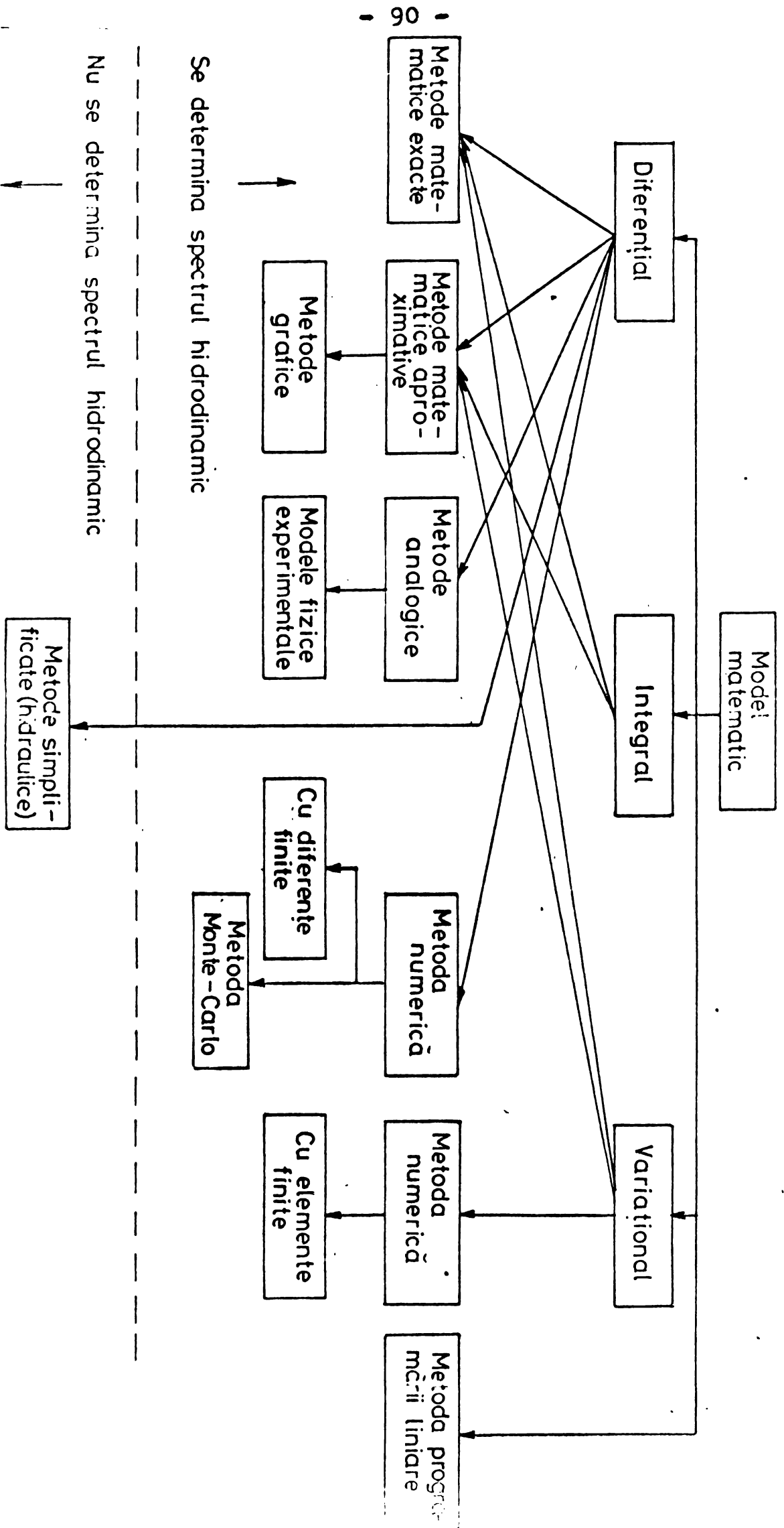
După determinarea debitului, rezultă pierderile de sarcină pe fiecare fragment. Metoda presupune că aceste pierderi de sarcină se distribuie liniar pe lungimea conturului aferent fragmentului.

Ca încheiere a acestui subpunct se prezintă în fig.3.4 o clasificare a metodelor de rezolvare ale problemelor mișcării în medii poroase.

3.5. Concluzii parțiale

1. În cadrul prezentei lucrări autorul consideră valabilitatea legii liniare a lui Darcy
2. La analizarea fenomenelor mișcării apei în medii poroase în cazul infiltrării prin construcții liniare autorul consideră că mișcarea se manifestă într-un domeniu bidimensional.
3. Datorită volumului mare al cercetărilor, în prezent se dispune de o serie de metode pentru rezolvarea problemelor mișcării apei prin medii poroase.

4. Pentru stabilirea unor aspecte ale mișcării apei în medii poroase în cazul infiltrării prin construcții liniare, în prezenta lucrare se va folosi și determinarea spectrului hidrodinamic al mișcării și analogia.
5. La determinarea spectrului hidrodinamic al mișcării autorul și-a propus analizarea folosirii metodelor numerice, metode care folosesc calculatoare electronice, conduc la o precizie ridicată, timp de calcul redus și care încep să cunoască o dezvoltare în ultima vreme din ce în ce mai accentuată.
6. Dintre metodele numerice au fost trecute în revistă metoda diferențelor finite, metoda elementelor finite, metoda Monte Carlo, metoda programării liniare.
7. Autorul critică metoda diferențelor finite fiindcă implică următoarele dificultăți:
 - forma tiparelor pentru scrierea sistemului de ecuații cu necunoscute în nodurile rețelei, este limitat. Există tipare de forma patratică, dreptunghiulară, exagonală și triunghiulară. Față de această dificultate metoda elementelor finite este net superioară, deoarece se poate acoperi domeniul de studiat cu o rețea de orice formă
 - tiparele se referă la o discretizare uniformă a domeniului. În zonele cu gradient ridicat apare necesitatea îndesirii rețelei ceea ce prezintă o complicație a metodei
 - tiparele de calcul pot satisface numai anumite condiții de margine
 - pentru anumite probleme ale condițiilor de margine se necesită considerarea unor puncte exterioare fictive, care însă au repercursiuni asupra preciziei și convergenței calculului.
8. În prezenta lucrare pentru analizarea mișcării apei în medii poroase în cazul infiltrării prin construcții liniare, autorul și-a propus folosirea metodei elementelor finite, metodă care se dezvoltă în cap. IV.



Se determina spectrul hidrodinamic

Nu se determina spectrul hidrodinamic

Fig. 3.4 CLASIFICAREA METODELOR DE REZOLVARE A MISCARII APEI IN MEDII POROASE

C A P I T O L U L IV

METODA ELEMENTELOR FINITE FOLOSITA LA REZOL- VAREA PROBLEMELOR MISCARII APEI IN MEDII POROASE

4.1. Mișcarea apei în medii poroase neomogene și anizotrope

Legea lui Darcy pentru mișcarea apei prin medii poroase a stabilit o relație liniară între viteza apei prin mediul poros și gradientul înălțimii piezometrice. Această lege care este o consecință a curgerii unui lichid vâscos neglijând efectele inerției se poate generaliza și într-o situație tridimensională.

Dacă viteza într-un sistem de axe triortogonale x, y și z este determinat de vectorul

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

și dacă gradientul înălțimii piezometrice este definit de asemenea prin cei trei componenți

$$- \{grad H\} = \begin{Bmatrix} - \frac{\partial H}{\partial x} \\ - \frac{\partial H}{\partial y} \\ - \frac{\partial H}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

atunci sub formă generalizată relația liniară între cele două mărimi este de forma

$$\{v\} = - [k] \{grad H\} \quad (4.3)$$

în care $[k]$ este tensorul permeabilității definit prin 9 componenți și are forma

$$[k] = \begin{vmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{vmatrix} \quad (4.4)$$

In general mediile porose naturale sînt atît neomogene cît și anizotrope, permeabilitatea lor variînd de la un punct la altul și avînd în același timp proprietăți direcționale. In acest caz deci o componentă a vitezei depinde de toate componentele gradientului funcției H. Acesta a sugerat generalizarea legii lui Darcy sub forma (4.3)

In notația tensorială, notînd prin k^{ij} tensorul contravariant de filtrație și prin v^j componentele contravariante ale vectorului viteză, folosind convenția de sumare se poate scrie

$$v^j = k^{ij} \frac{\partial h}{\partial x^i} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

ceea ce se poate interpreta cu transformarea liniară a cîmpului vectorial covariant $\partial h / \partial x^i$ în cîmpul vectorial contravariant v^j .

Ferrandou, J. a dat o demonstrație prin care a arătat că tensorul permeabilității este simetric [78] și în care apar numai 6 componente pentru a-l defini.

Deci și în consecință există un sistem de axe carteziene rectangular în care tensorul permeabilității are numai trei componente diferite de zero, anume acelea care se găsesc pe diagonala principală a matricii (4.4)

In acest caz, tensorul permeabilității ia forma:

$$[k] = \begin{vmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{vmatrix} \quad (4.6)$$

iar legea lui Darcy se va scrie dezvoltat astfel

$$v_x = -k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}; \quad v_y = -k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}; \quad v_z = -k_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (4.7)$$

Cele trei direcții reciproc perpendiculare pentru care tensorul permeabilității are forma (4,6) se numesc direcțiile principale ale mediului poros. De exemplu într-un mediu stratificat mișcarea apei după axa perpendiculară pe straturi este simetrică și deci această axă va coincide cu una din direcțiile principale, sau într-un strat, mediul poros, de multe ori nu are direcții preferențiale și oricare axă se poate considera ca direcție principală. Găsirea direcțiilor principale a mediului poros când cunoaștem valorile lui k după trei direcții oarecare, este identică ca și în teoria elasticității, unde la găsirea direcțiilor principale se folosește metoda grafică a cercurilor lui Mohr.

4.2. Soluția mișcării apei în medii poroase bidimensionale anizotrope

Pentru unele probleme întâlnite în mod curent în practică se pot aduce o serie de simplificări pe baza admiterii unor ipoteze cu privire la cinematica curenților de infiltrație, ca urmare a condițiilor impuse formei domeniului în care are loc mișcarea. Așa este cazul mișcărilor care se desfășoară în domenii extinse în planul orizontal și cu dimensiunile reduse pe verticală. În astfel de domenii se poate admite ipoteza lui Dupuit a liniilor de curent orizontale, mișcarea putând fi astfel studiată într-un singur plan orizontal planul (x,y) .

În cazul general al mediilor neomogene și anizotrope și transmisivitatea reprezintă un tensor care operează la fel cu tensorul permeabilităților.

Cu această precizare, condiția de continuitate, în ipoteza regimului permanent al mișcării și în cazul unei suprafețe libere alimentate cu un debit distribuit $q(x,y)$, conduce la ecuația : [149], [87]

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} + T_{xy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{xy} \frac{\partial H}{\partial x} + T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + q(x,y) = 0 \quad (4.8)$$

În relația (4.8) debitul $q(x,y)$ are semnul + când este de alimentare (precipitații, irigații, îmbogățirea

scviferului) și are semnul - când este prelevat din stratul subteran (pierderi prin evaporatie, pompări).

Dacă direcțiile x și y coincid cu axele principale ale mediului poros, ecuația de continuitate (4.8) se transformă în :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + q (x,y) = 0 \quad (4.9)$$

Soluția ecuației (4.9) avind condițiile pe contur al domeniului D cunoscute, din punct de vedere matematic este echivalent de a găsi o funcție H care minimizează funcționala E(H) pe întreg domeniu D:

$$E(H) = \iint_D \left\{ \frac{1}{2} \left[T_{xx} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + T_{yy} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right] + qH \right\} d_x d_y \quad (4.10)$$

Verificarea acestei afirmații se poate obține prin aplicarea bine cunoscutelor principii ale calculului variațional, prin integrarea ecuației Euler-Lagrange. In particular dacă se scrie ecuația lui Euler-Lagrange pentru minimalizarea lui E(H) ,

$$\frac{\partial E(H)}{\partial H} = 0 \quad (4.11)$$

se obține relația (4.9)

Acest minim are și o interpretare fizică. Dacă se consideră un strat de 1,00 m grosime transversal vitezei, unde debitul pe acest strat unitar este $Q_1 = - T \text{ grad } H$, expresia

$$- (Q_{1x} \frac{\partial H}{\partial x} + Q_{1y} \frac{\partial H}{\partial y} + qH) = T_{xx} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + T_{yy} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + qH \quad (4.12)$$

reprezintă lucrul mecanic specific de disipare pe unitatea de volum. Deci integrala (4.10) este lucrul mecanic disipat în desfășurarea procesului de curgere a apei prin mediul poros din domeniul D. Minimul integralei constituie bine cunoscutul principiu din mecanică al „ lucrului mecanic minim”.

O cale de rezolvare a problemelor variaționale este metoda Rayleigh-Ritz [129]. Ideia de bază, folosirea unei serii de puteri ca expresia de aproximare a funcției necunoscute și determinând apoi coeficienții seriei, a fost introdusă

prima dată de Lord Rayleigh în 1877 în lucrarea sa celebră despre teoria sunetului. În continuare a fost generalizată în 1909 de W.Ritz într-o memorabilă lucrare de contribuție la teoria plăcilor elastice subțiri.

Cît de eficientă este metoda Rayleigh-Ritz, ea devine dificilă de aplicat cînd problemele devin mai complexe. Martin H [129] referindu-se prin aproximări a problemelor variaționale discută în principiu dezavantajele metodei Rayleigh-Ritz. Din acest punct de vedere avantajele metodei elementelor finite devin aparente. Se va vedea mai tîrziu, că elementele finite prevăd o nouă schemă alternativă de extindere a procedeu-
lui clasic Rayleigh - Ritz.

Pentru folosirea metodei elementelor finite domeniul de cercetat se împarte într-o serie de figuri geometrice (așa numite elemente finite de unde vine și numele metodei) suficient de mici pentru a se putea reconstitui pe baza comportării elementelor studiate continuitatea ansamblului. Cea mai simplă figură care se poate forma este triunghiul care se folosește cel mai comod în problema analizată.

Elementul finit triunghiular este precizat prin cunoașterea coordonatelor vîrfurilor (nodurilor) în ordinea i, j, m (Fig.4.1).

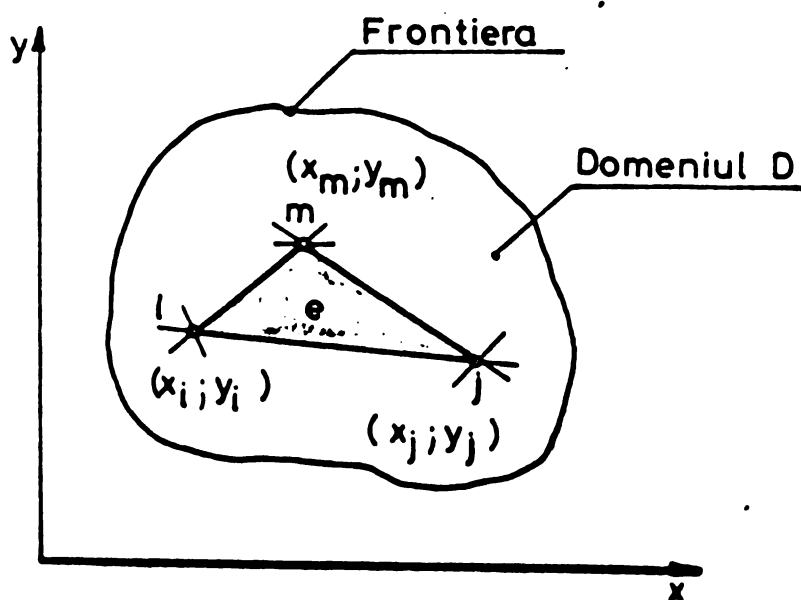


Fig.4.1 ELEMENT FINIT TRIUNGHIUULAR
NOTAȚII

Se consideră ca parametri necunoscuți valorile funcției $H = H(x, y)$, adică înălțimile piezometrice în nodurile alese arbitrar.

Pentru calcularea valorilor H după metoda elementelor finite se presupun următoarele ipoteze simplificatoare:

1. Permeabilitatea caracterizată prin tensorul permeabilității

$[K_e]$ este constant în interiorul elementului e . (indicele e înseamnă că s-a considerat elementul e)

2. Direcțiile principale ale mediului poros coincid cu direcțiile axelor x, y ale sistemului de coordonate.

3. Înălțimile piezometrice $H = H(x, y)$ variază liniar în interiorul unui element e , sau se poate spune că ele depind liniar de coordonatele nodurilor.

Decă funcția $H = H(x, y)$ se interpretează ca o suprafață curbă având ca proiecție un plan chiar domeniul D studiat și admitând că se cunoaște această suprafață (funcție) numai în punctele alese și în rest înlocuind funcția prin variații liniare în raport cu x și cu y , aceasta echivalează cu a aproxima suprafața reală $H = H(x, y)$ cu un poliedru (fig.4.2) care are toate vîrfurile pe suprafață, iar între vîrfuri evident mici fețe plane. Aproximarea este cu atât mai bună cu cît punctele din plan sînt mai apropiate între ele.

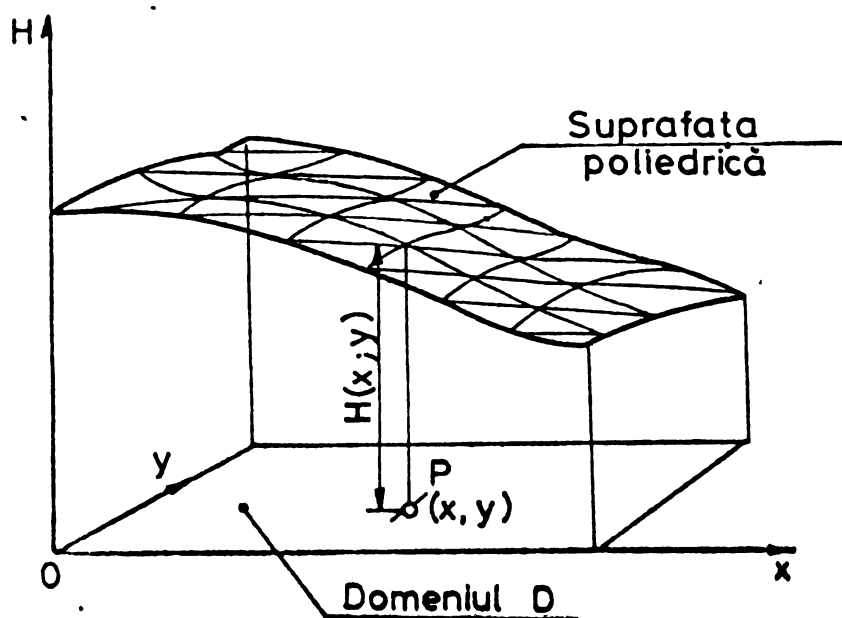


Fig. 4.2 APROXIMAREA FUNCȚIEI $H = H(x, y)$

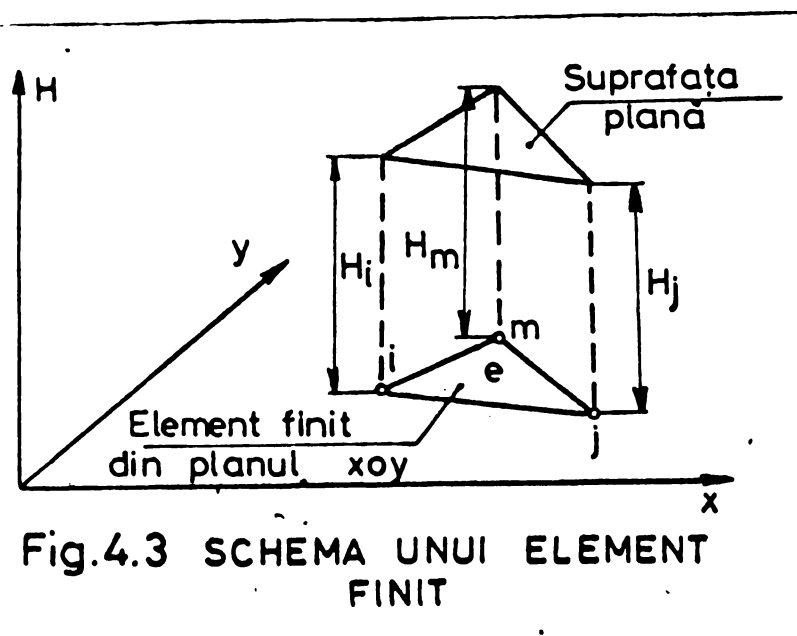
metrice $H = H(x, y)$ în interiorul unui element finit se află pe o suprafață plană. Ecuația acestui plan pentru un element finit e , într-un sistem de coordonate x, y, H este

$$H = A_1 x + B_1 y + C_1 \quad (4.13)$$

și care dă înălțimea H pentru punctele situate numai în interiorul elementului e , precizînd coordonatele punctului,

Să considerăm un element finit e de formă triunghiulară avînd nodurile în punctele i, j, m ; și înălțimile piezometrice în aceste puncte H_i, H_j, H_m care deocamdată le presupunem cunoscute (vezi Fig.4.3).

O altă consecință a ipotezei 3 este că înălțimile piezo-



Evident pentru alte elemente și coeficienți A_1, B_1, C_1 din (4.13) se modifică. Din (4.13) se particularizează înălțimile piezometrice în nodurile elementului e de coordonate cunoscute scriind că planul trece prin puncte cunoscute de coordonate (x_i, y_i, H_i) ; (x_j, y_j, H_j) ; (x_m, y_m, H_m) .

$$H_i = A_1 x_i + B_1 y_i + C_1$$

$$H_j = A_1 x_j + B_1 y_j + C_1 \quad (4.14)$$

$$H_m = A_1 x_m + B_1 y_m + C_1$$

Relațiile (4.14) formează un sistem linear de ecuații unde necunoscutele sînt A_1, A_2, A_3 , iar H_i, H_j, H_m deocîndată le presupunem cunoscute. În exprimare matriceală, (4.14) devine

$$\{H_e\} = [G] \cdot \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

unde

$$[G] = \begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_m & y_m & 1 \end{vmatrix} \quad (4.16)$$

pe care o denumim matricea referitoare la geometria elementului finit și care depinde numai de coordonatele nodurilor elementului finit respectiv.

Rezolvarea sistemului (4.15) ne va da coeficienți

A_1, B_1, C_1

$$\begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \end{Bmatrix} = [G]^{-1} \begin{Bmatrix} H_e \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Pentru ca operația de inversare a matricii (4.16) să fie posibilă este necesar ca matricea $[G]$ să fie pătrată și nesingulară.

Prima condiție este îndeplinită deoarece în matricea $[G]$ numărul liniilor este egal cu numărul coloanelor.

A doua condiție a nesingularității este și ea îndeplinită, determinantul matricii $[G]$ ne fiind nul niciodată, matricea $[G]$ va fi totdeauna o matrice nesingulară. Așa dar matricea $[G]$ este totdeauna inversabilă.

Pentru inversarea ei practic se procedează în modul următor:

- se scrie matricea transpusă $[G]^T$ și care este:

$$[G]^T = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_j & x_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_j \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} y_1 & y_j & y_m \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix} \end{matrix} \quad (4.18)$$

se înlocuiește fiecare termen al acestei matrici cu valoarea determinantului obținut, suprimînd linia și coloana respectivă:

$$\begin{vmatrix} y_j - y_m & y_1 - y_m & y_1 - y_j \\ x_j - x_m & x_1 - x_m & x_1 - x_j \\ x_j y_m - x_m y_j & x_1 y_m - x_m y_1 & x_1 y_j - x_j y_1 \end{vmatrix} \quad (4.19)$$

- se schimbă semnul termenilor a căror sumă de indici este impară

$$\begin{vmatrix} y_j - y_m & y_m - y_1 & y_1 - y_j \\ x_m - x_j & x_1 - x_m & x_j - x_1 \\ x_j y_m - x_m y_j & x_m y_1 - x_1 y_m & x_1 y_j - x_j y_1 \end{vmatrix} \quad (4.20)$$

Matricea (4.20) astfel obținută se dividează cu determinantul matricii $[G]$ și care este dublul ariei triang. având coordonatele vîrfurilor în nodurile i, j, m , care se notează cu 2Ω .

Deci avem

$$[G]^{-1} = \frac{1}{2\Omega} \begin{vmatrix} y_j - y_m & y_m - y_i & y_i - y_j \\ x_m - x_j & x_i - x_m & x_j - x_i \\ x_j y_m - x_m y_j & x_m y_i - x_i y_m & x_i y_j - x_j y_i \end{vmatrix} \quad (4.21)$$

În baza relației (4.17) avem

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2\Omega} \left[(y_j - y_m)H_i + (y_m - y_i)H_j + (y_i - y_j)H_m \right] \\ B_1 &= \frac{1}{2\Omega} \left[(x_m - x_j)H_i + (x_i - x_m)H_j + (x_j - x_i)H_m \right] \\ C_1 &= \frac{1}{2\Omega} \left[(x_j y_m - x_m y_j)H_i + (x_m y_i - x_i y_m)H_j + (x_i y_j - x_j y_i)H_m \right] \end{aligned} \quad (4.22)$$

În introducînd aceste valori în (4.13) ecuația planului înălțimilor piezometrice pentru elementul e va fi:

$$\begin{aligned} H &= (N_i H_i + N_j H_j + N_m H_m) \text{ sau} \\ H &= [N_i \ N_j \ N_m] \left\{ H_e \right\} \end{aligned} \quad (4.23)$$

unde

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2\Omega} \left[(y_j - y_m)x + (x_m - x_j)y + (x_j y_m - x_m y_j) \right] \\ N_j &= \frac{1}{2\Omega} \left[(y_m - y_i)x + (x_i - x_m)y + (x_m y_i - x_i y_m) \right] \\ N_m &= \frac{1}{2\Omega} \left[(y_i - y_j)x + (x_j - x_i)y + (x_i y_j - x_j y_i) \right] \end{aligned} \quad (4.24)$$

Rezultînd (4.23) și (4.24) se poate spune că în cadrul fiecărui element înălțimea piezometrică într-un punct curent al elementului se exprimă ca funcție de înălțimile piezometrice nodale.

$$H(x,y) = [N] \{H_e\} \quad (4.25)$$

unde $[N]$ este o matrice care nu depinde decît de geometria elementului, $\{H_e\}$ fiind vectorul înălțimilor piezometrice din cele trei noduri ale elementului considerat.

Prin descompunerea domeniului studiat într-o rețea de elemente finite, funcționala (4.10) devine suma funcționalelor elementelor:

$$E(H) = \sum_1^{NEL} E_e(H) \quad (4.26)$$

unde $E_e(H)$ este funcționala scrisă pentru un singur element, iar NEL este numărul total de elemente din domeniul de studiat.

La condiția de minimalizare a acestei funcționale conform ecuației Euler-Lagrange (4.11) vs contribuți fiecare element finit. Pentru un element finit oarecare avem în baza lui (4.10) și (4.11) derivatele în raport cu H_i, H_j și H_m :

$$\frac{\partial E(H)}{\partial H_i} = \iint_{\Omega} \left\{ T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial}{\partial H_i} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial}{\partial H_i} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial H_i} (qH) \right\} dx dy \quad (4.27)$$

și similar pentru $\frac{\partial E(H)}{\partial H_j}$ și $\frac{\partial E(H)}{\partial H_m}$ menționînd că domeniul de in-

tegrare Ω este suprafața triunghiului elementar i, j, m .

Inlocuind în aceasta pe H din relația (4.23) avem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(H)}{\partial H_i} = & \iint_{\Omega} T_{xx} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x}, \frac{\partial N_j}{\partial x}, \frac{\partial N_m}{\partial x} \right] \{H_e\} \cdot \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \right) dx dy + \\ & + \iint_{\Omega} T_{yy} \left[\frac{\partial N_i}{\partial y}, \frac{\partial N_j}{\partial y}, \frac{\partial N_m}{\partial y} \right] \{H_e\} \cdot \left(\frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy + \\ & + \iint_{\Omega} q N_i dx dy \end{aligned} \quad (4.28)$$

Folosind definițiile (4.24) ale lui N_i, N_j, N_m

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(H)}{\partial H_i} = & \frac{1}{4\Omega^2} \left\{ T_{xx} [(y_j - y_m), (y_m - y_1), (y_1 - y_j)] \{H_e\} (y_j - y_m) \right\} \iint_{\Omega} dx dy + \\ & + \frac{1}{4\Omega^2} \left\{ T_{yy} [(x_m - x_j), (x_i - x_m), (x_j - x_1)] \{H_e\} (x_m - x_j) \right\} \iint_{\Omega} dx dy + \\ & + q \iint_{\Omega} \frac{1}{2\Omega} [(y_j - y_m)x + (x_m - x_j)y + (x_j y_m - x_m y_j)] dx dy \end{aligned} \quad (4.29)$$

Se poate scrie că $\iint_{\Omega} dx dy = \Omega$ și

$$\iint_{\Omega} \frac{1}{2} [(y_1 - y_m)x + (x_m - x_j)y + (x_j y_m - x_m y_j)] dx dy =$$

$$= \frac{1}{2} [(y_j - y_m)\bar{x} + (x_m - x_j)\bar{y} + (x_j y_m - x_m y_j)] \quad (4.30)$$

unde $\bar{x} = \frac{1}{3} (x_1 + x_j + x_m)$ și $\bar{y} = \frac{1}{3} (y_1 + y_j + y_m)$

și care sînt coordonatele centrului de greutate al triunghiului elementar. Prin dezvoltarea în continuarea a lui (4.30) găsim valoarea $-\frac{\Omega}{3}$. Relația (4.29) devine:

$$\frac{\partial E(H)}{\partial H_1} = S_{11}H_1 + S_{1j}H_j + S_{1m}H_m - q \frac{\Omega}{3} \quad \text{sau} \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial E(H)}{\partial H_1} = [S_{11} \ S_{1j} \ S_{1m}] \{H_e\} - q \frac{\Omega}{3} \quad \text{unde}$$

$$S_{11} = \frac{1}{4\Omega} [T_{xx}(y_j - y_m)^2 + T_{yy}(x_m - x_j)^2]$$

$$S_{1j} = \frac{1}{4\Omega} [T_{xx}(y_j - y_m)(y_m - y_1) + T_{yy}(x_m - x_j)(x_1 - x_m)] \quad (4.32)$$

$$S_{1m} = \frac{1}{4\Omega} [T_{xx}(y_j - y_m)(y_1 - y_j) + T_{yy}(x_m - x_j)(x_j - x_1)]$$

Rezumînd (4.31) se poate scrie că în cadrul unui element condiția de minimizare a funcționalei (4.10) depinde de coordonatele vîrfurilor triunghiului elementar finit și de proprietățile fizice ale elementului respectiv. Scriînd similar și derivatele în raport cu H_j și H_m în final se poate scrie și mai concentrat:

$$\frac{\partial E(H)}{\partial H_e} = 0 ; \quad \text{sau} \quad [S] \{H_e\} - \{F_e\} = 0 \quad (4.33)$$

unde $[S]$ este o matrice determinată de coordonatele nodurilor și de proprietățile fizice ale elementului, iar vectorii sînt de forma :

$$\left\{ H_e \right\} = \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_j \\ H_m \end{Bmatrix} \quad \text{și} \quad \left\{ F_e \right\} = \begin{Bmatrix} q \frac{\Omega}{3} \\ q \frac{\Omega}{3} \\ q \frac{\Omega}{3} \end{Bmatrix} \quad (4.34)$$

în care q este debitul distribuit pe unitatea de suprafață și Ω suprafața triunghiului elementar i, j, m

În privința matricii se observă din (4.32) că $S_{ij} = S_{ji}$; $S_{im} = S_{mi}$ și $S_{jm} = S_{mj}$ de unde rezultă că matricea $[S]$ este simetrică în raport cu diagonala principală.

Adică se poate scrie:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{im} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

cu termenul general

$$S_{ij} = \frac{1}{4\Omega} \left[T_{xx}(y_j - y_m)(y_m - y_i) + T_{yy}(x_m - x_j)(x_i - x_m) \right] \quad (4.36)$$

din care se poate obține oricare termen introducând notațiile de mai jos după regula permutărilor

$$\begin{aligned} a_i &= y_j - y_m ; a_j = y_m - y_i ; a_m = y_i - y_j \\ b_i &= x_m - x_j ; b_j = x_i - x_m ; b_m = x_j - x_i \end{aligned} \quad (4.37)$$

și deci

$$S_{ij} = \frac{1}{4\Omega} \left[T_{xx} a_i a_j + T_{yy} b_i b_j \right] \quad (4.38)$$

Elementele se reasamblează prin aceea că pentru a obține minimul funcției E , se scrie că suma derivatelor lui E în raport cu H_i este nulă pentru toate elementele finite care sînt în jurul punctului i .

$$\sum_1^{NEJ} \frac{\partial E(H)}{\partial H_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, NN \quad (4.39)$$

unde NEJ este numărul total de elemente în jurul nodului i

NN este numărul total de noduri i din rețeaua care acoperă întregul domeniu D.

Pentru fiecare nod „i” se obține o astfel de ecuație. Rămâne deci de rezolvat un sistem liniar de NN ecuații cu NN necunoscute, avînd sistemul

$$[SR] \{H\} = \{F\} \quad (4.40)$$

în care [SR] este matricea de influență, {H} vectorul necunoscute-
lor și vectorul {F} matricea de încărcare. Aceste denumiri sînt
adoptate din mecanica mediilor continue.

Sistemul (4.40) este liniar și matricea de influență are o structură tip bandă și este simetrică față de diagonala principală. Numărul elementelor semnificative diferite de zero pentru o linie a matricei bandă, depinde de numărul de elemente MEJ din jurul unui nod „i” și este egal cu NEJ + 1. Printr-o justă ordine de numerotare a nodurilor se poate obține o lățime minimă de bandă și deci un spațiu minim necesar pentru memorizare.

În prezent există și preocupări în privința automatizării ordinei de numerotare a nodurilor, prin programul de calcul urmînd să se modifice numerotarea inițială, aleasă arbitrar, astfel încît să se reducă la minimum necesarul de memorie.

4.3. Particularitățile matricei de influență

Dintre matricele care intervin la rezolvarea ecuației (4.40) cea mai dezvoltată este matricea de influență. În consecință, atenția trebuie concentrată asupra modului optim de memorizare a acestei matrice.

Matricea de influență [SR] se poate obține direct din matricele [S] ale elementelor finite componente după o cale ce se prezintă mai jos

Astfel pentru un element finit e, cu trei noduri i, j, m schematizat ca în Fig.4.4

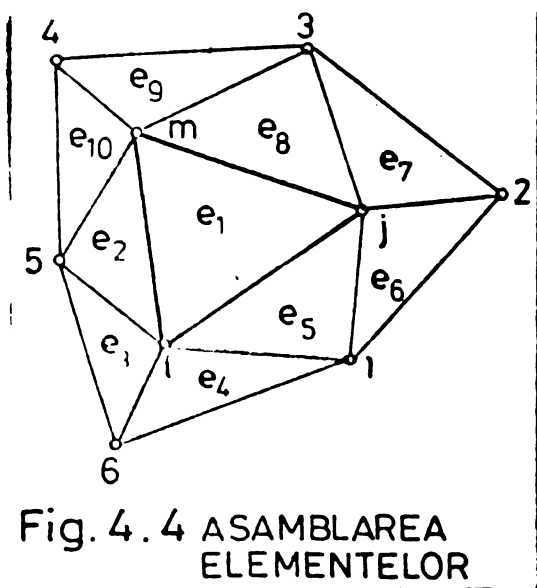


Fig. 4.4 ASAMBLAREA ELEMENTELOR

pentru fiecare nod i, j, m al elementului e , se scrie o relație de forma (4.39). Apare astfel clar modul de alcătuire a matricii $[SR]$ prin depunere succesivă a aportului fiecărui element finit în parte și anume termenii $SR_{ii}^e, SR_{ij}^e, SR_{im}^e$ se depun pe linia nodului i , în coloanele corespunzătoare nodurilor i, j, \dots, m ; termenii $SR_{ji}^e, SR_{jj}^e, \dots, SR_{jm}^e$ se depun în aceleași coloane dar pe linia nodului j etc.

Efectuând această operație pentru toate elementele structurii discretizate, matricia $[SR]$ rezultă alcătuită din termenii de forma

$$SR_{ii} = \sum_1^{NEJ} S_{ii}^e \quad \text{și} \quad SR_{ij} = \sum_{e_1}^{e_{i+j}} S_{ij} \quad (4.41)$$

Primele sînt dispuse pe diagonala principală și provin de la toate elementele care se întîlnesc în nodul i , celelalte sînt așezate în afara diagonalei principale și provin de la cîte un grup de elemente, anume acelea care au comune nodurile i și j (laturi adiacente $i-j$). Simetria matricii SR este asigurată de reciprocitatea $SR_{ij} = SR_{ji}^T$.

Particularizînd matricia SR pentru schema din fig.4.4 presupunînd cunoscute valorile $H_1 \dots H_6$ pe frontieră se poate scrie

		necunoscute		
		H_1	H_j	H_m
} noduri	i	$\sum S_{ii}$ $e(1+2+3+4+5)$	$S_{ij}^{e_1} + S_{ij}^{e_5}$	$S_{im}^{e_1} + S_{im}^{e_2}$
	j	$S_{ji}^{e_1} + S_{ji}^{e_5}$	$\sum S_{jj}$ $e(1+5+6+7+8)$	$S_{jm}^{e_1} + S_{km}^{e_8}$
	m	$S_{mi}^{e_1} + S_{mi}^{e_2}$	$S_{mj}^{e_1} + S_{mj}^{e_8}$	$\sum S_{mn}$ $e(1+8+9+10+2)$

(4.42)

Matricea $[SR]$, pe lângă simetria față de diagonala principală cuprinde mulți coeficienți secundari nuli. Devine esențial să se folosească slaba populare a acestei matrice, în scopul memorizării elementelor sale într-o formă cât mai condensată. Este important modul în care elementele diferite de zero sînt grupate în matricea de influență. Așezarea coeficienților secundari nenuli depinde de alcătuirea a rețelei, precum și de ordinea adoptată la numerotarea nodurilor.

Se constată că elementele nenule ale matricei formează o bandă cu o anumită lățime, așezată simetric de-a lungul diagonalei principale, proprietate de alcătuire ce se folosește la calculul automatizat.

În aceste condiții, în memoria calculatorului este avantajos să se rețină numai elementele semnificative ale matricei $[SR]$, anume coeficienții principali și coeficienții secundari diferiți de zero așezați deasupra diagonalei principale, (Fig.4.5 a unde cu m s-a notat lățimea benzii ocupate de elementele semnificative ale matricei)

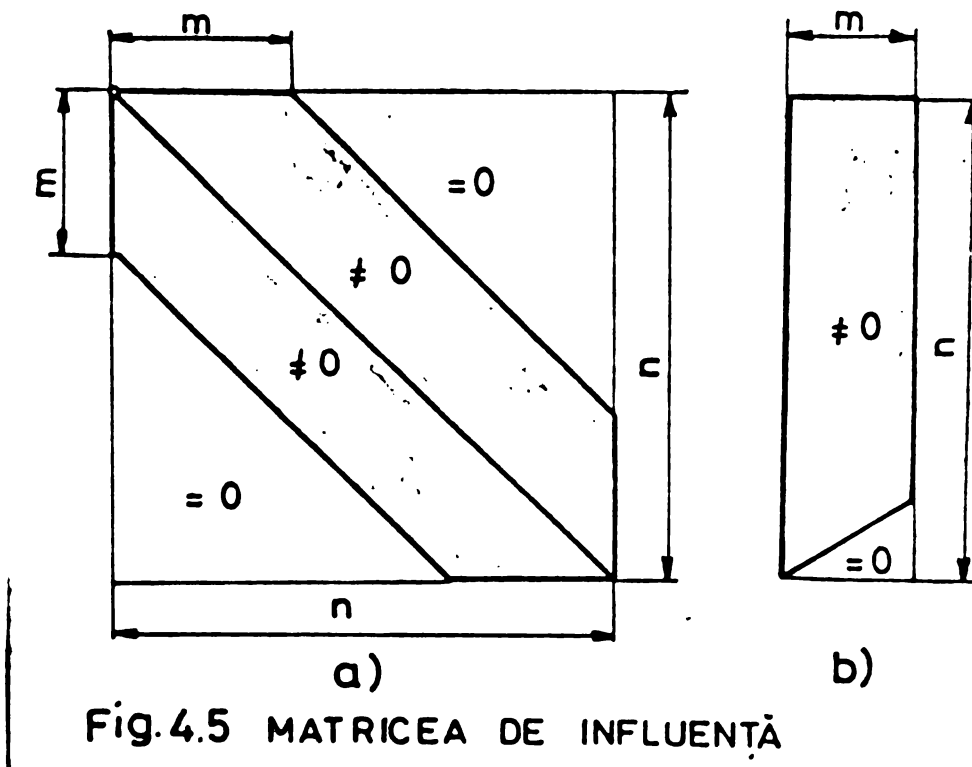


Fig.4.5 MATRICEA DE INFLUENȚĂ

Matricea de influență, cu dimensiunile inițiale ($n \cdot n$) se depune în memorie într-o formă condensată, anume sub forma unei matrice dreptunghiulare cu dimensiuni ($n \cdot m$) în care coeficienții principali ocupă prima coloană, iar celelalte coloane conțin coeficienții secundari diferiți de zero (fig.4.5.b). Un

element aflat pe linia i și coloana j în matricea $[SR]$ va

ocupa deci în nouă formă poziția $(i, j - i + 1)$. Programul de calcul poate fi astfel întocmit încât în memoria calculato- rului să se asambleze direct forma condensată a matricii de influență a rețelei, pornind de la matricile de influență a- le elementelor componente fără a mai fi necesar să se defines- că în prealabil matricile $[SR]$ în forma completă.

Lățimea m al benzii elementelor semnificative din ma- tricea de influență se determină prin program în mod automat folosind relația

$$m = \max |i-j| + 1 \quad (4.43)$$

Lățimea benzii depinde deci de diferența maximă (în valoare absolută) dintre indicii i și j ai nodurilor aflate la extre- mitățile aceleiași laturi. Rezultă că, pentru anumită rețea, lățimea benzii în matricile $[SR]$ poate diferi în limite foarte largi, în funcție de ordinea aleasă pentru numerotarea nodu- rilor. Există astfel interesul de a alege o ordine de numero- tare care să conducă la o grupare cât mai condensată a coefici- enților secundari nenuli în jurul diagonalei, obținându-se o lățime minimă de bandă și deci un spațiu necesar pentru memori- zare.

4.4. Procedee de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare

Rezolvarea sistemelor de ecuații liniare date de rela-ția (4.40) necesită utilizarea unor procedee de calcul sistematizate. În literatura de specialitate sînt propuse numeroase asemenea procedee, care își dovedesc eficiența în diferite si- tuații. Prezintă un interes special rezolvarea sistemelor de e- cuații numeroase, în acest caz se apelează la procedee care oco-lesc inversarea directă a matricii de influență.

Dintre procedeele cunoscute se amintesc: metoda Cramer, procedeul Gauss-Jordan sau metoda pivoților, metoda iterativă Gauss-Seidel, metoda Cholesky.

Eficiența practică a unui procedeu de rezolvare a sis-temelor de ecuații liniare depinde în primul rînd de numărul to- tal de operații numerice necesare.

În tabelul 4.1 de mai jos se prezintă comparativ numărul de operații elementare necesare pentru rezolvarea unui sistem de n ecuații liniare cu n necunoscute după diferitele metode:

Tabel 4.1

Compararea nr.de operații

Metoda \ n	2	3	4	5	6	7	8
Cramer	11	59	319	1949	13691	109.591	386.399
Gauss-Jordan	12	42	100	195	366	532	792
Gauss	10	33	76	145	246	385	568
Cholesky	12	25	44	70	114	179	200

Metoda Cramer este cu totul neindicată, mai ales în cazul când numărul ecuațiilor este mare. Procedul Gauss-Jordan de asemenea reclamează un număr ridicat de operații, astfel rămâne de comperat și de ales ultimele trei metode din lista enumerată.

Algoritmul lui Gauss are avantajul că este finit și este valabil, teoretic, pentru orice sistem de ecuații. Metoda iterativă Gauss-Seidel converge numai pentru sisteme speciale, ea are nevoie de $2n^2 - n$ operații aritmetice la fiecare iterație. Numărul de operații aritmetice, la valori mari ale lui n , este aproximativ :

- la algoritmul lui Gauss $2n^3/3$
- metoda Gauss-Seidel: $\approx 2n^2$ numai la o iterație. Astfel, dacă numărul de iterații la metoda Gauss-Seidel este mai mic de $n/3$, metoda iterativă implică mai puține operații aritmetice, în caz contrar ea nu mai este eficientă.

Tehnicile iterative trebuiesc folosite cu mare atenție și sub rezerva dacă numărul iterațiilor este sub $n/3$ și dacă procesul de iterare este convergent (cît se poate de rapid convergent). Aceste condiții sînt destul de greu de îndeplinit, astfel rămîne metoda Gauss și Cholesky în discuție.

La volumul mare de calcule din algoritmul gaussian se adaugă și un mare număr de operații privind manevrarea

datelor. Este realmente evident, de exemplu, că vor avea loc o serie de permutări de linii. În toate cazurile, acestea reprezintă un consum de timp. Timpul de calcul, cu ajutorul calculatoarelor electronice, este proporțional cu numărul operațiilor ce trebuiesc efectuate, acesta poate fi extrem de costisitor la calculatoarele moderne.

Rezultă că metoda Cholesky, expusă în cele ce urmează, este cea mai indicată de a se folosi. Numărul de operații aritmetice la metoda Cholesky este de 3,3 - 3,5 ori mai mică decât la metoda Gauss și se poate afirma că la un număr foarte mare de ecuații acesta tinde spre 4 [129].

4.4.1. Metoda Cholesky. Aceasta metodă a fost propusă încă în 1916, reluată și adaptată de diferiți cercetători. Metoda Cholesky este cea mai indicată de a rezolva un sistem de ecuații liniare unde matricea coeficienților necunoscutelor este simetrică față de diagonala principală.

Fie sistemul liniar

$$[A] \cdot x = P \quad (4.44)$$

Matricea $[A]$ se poate pune sub formă unui produs a unei matrice triunghiulare inferioare $[B]$ cu o matrice triunghiulară superioară $[C]$ care are diagonala egală cu unu, adică

$$A = BC \quad (4.45)$$

unde

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ b_{21} & b_{22} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & \dots & \dots & b_n \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & \dots & \dots & c_{1n} \\ 0 & 1 & \dots & \dots & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Elementele b_{ij} și c_{ij} sînt definite cu formulele

$$b_{11} = a_{11}$$

$$b_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{ik} c_{kj} \quad i \geq j > 1 \quad (4.47)$$

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{b_{ii}}$$

$$c_{ij} = \frac{1}{b_{ii}} \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} b_{ik} c_{kj} \right) \quad 1 < i < j \quad (4.48)$$

Pe baza descompunerii (4.45) sistemul de ecuații (4.44) devine

$$[B][C] \{x\} = \{P\} \quad (4.49)$$

și poate fi rezolvat în două etape introducând necunoscutele intermediare y , care se definesc

$$[B] \{y\} = \{P\} \text{ și } [C] \{x\} = \{y\} \quad (4.50)$$

Matricile $[B]$ și $[C]$ fiind triunghiulare sistemul (4.44) se rezolvă

- prin substituție înainte

$$y_1 = \frac{P_1}{b_{11}}$$

$$y_i = \frac{1}{b_{ii}} \left(P_i - \sum_{k=1}^{i-1} b_{ik} y_k \right) \quad i > 1 \quad (4.51)$$

- prin substituție înapoi

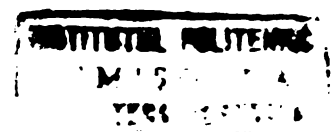
$$x_n = y_n$$

$$x_i = y_i - \sum_{k=i+1}^n c_{ik} x_k \quad i < n \quad (4.52)$$

Metoda Cholesky este foarte comodă de a fi folosită la calculatoarele electronice, în care caz operațiile (4.47) - (4.51) se pot efectua fără a tipări rezultatele intermediare.

În cazul în care matricea $[A]$ este simetrică $a_{ij} = a_{ji}$ atunci avem

$$c_{ij} = \frac{b_{ji}}{b_{ii}} \quad (i < j) \quad (4.53)$$



4.4.2 Considerarea condițiilor de margine

La rezolvarea sistemului de ecuații (4.40) intervin și nodurile situate pe frontiera domeniului care se tratează după cum urmează:

a) Frontiera de alimentare

Fie un nod marginal notat cu indicele c la care se cunoaște înălțimea piezometrică H_c , ca fiind date condițiile pe contur. Atunci în sistemul de ecuații numărul necunoscutelor se poate reduce cu numărul nodurilor de tip c în care se cunoaște înălțimea piezometrică. Aceste se face astfel ca nodurile corespunzătoare nodurilor de tip c din sistemul (4.40) se elimină. Apoi mai este necesar de a multiplica coeficienții coloanelor de tip c din matricea $[SR]$ cu înălțimea piezometrică corespunzătoare H_c și produsele obținute se trec pe partea dreaptă a ecuației (4.40) cu semn schimbat, adică se scad din termenul liber al rîndului corespunzător. Procedura este ilustrată în fig.4.6.

$$[SR] \cdot \{H\} = \{F\} \quad (40)$$

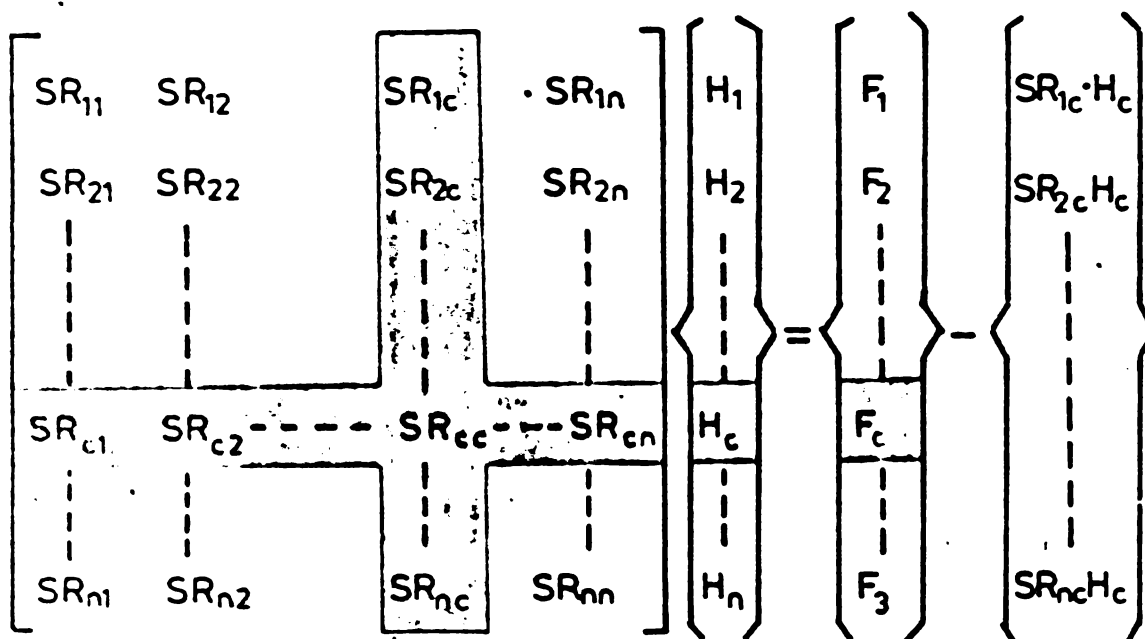


Fig.4.6 PROCEDURA DE REZOLVARE A SISTEMULUI DE ECUAȚII ÎN CAZUL FRONTIEREI DE ALIMENTARE

Acesta este aspectul teoretic. Dar practic va trebui ținut cont că matricea $[SR]$ nu este patrată (așa cum s-a considerat în fig.4.6) ci este depusă sub formă condensată ca o matrice bandă de m coloane și NN linii (câte noduri există). În această situație se complică algoritmul de eliminare a unor linii și de modificare a unor termeni liberi deoarece regăsirea liniilor și coloanelor respectiv necesare la eliminare din matricea bandă este foarte dificilă. Autorul acestei teze a elaborat un nou procedeu, testat și verificat și la care nu mai apare dificultatea mai sus semnalată. Pe scurt procedeul nou constă în următoarele:

- rîndul unde necunoscute de tip c este pe diagonala principală nu se elimină, toți coeficienții ai necunoscuteilor care nu sînt pe diagonala principală se fac nuli, iar termenul liber se face egal cu coeficientul de pe diagonala principală multiplicat cu valoarea H_c (de această dată valoarea fiind cunoscută)

- în celelalte rînduri unde în coloane intervine diverse valori H_c , acestea se multiplică cu coeficientul necunoscuteii de pe coloana respectivă, produsele se însumează și se scad din termenul liber inițial de pe partea dreaptă obținînd astfel noul termen liber.

Procedeul se pretează foarte bine la o matrice de tip bandă. Cu o astfel de matrice cu elementele corectate (idem și termenii liberi corecțați) se trece la descompunerea și rezolvarea sistemului după metoda Chlesky.

b) Debit concentrat în nod

Pentru un nod n_c la care apare un debit concentrat în nod fie el marginal sau din interiorul domeniului, termenul liber de pe linia n_c va fi egal cu valoarea debitului concentrat. Semnul $+$ pentru alimentări și $-$ pentru prelevări de debit.

c) Debit distribuit

Dacă nodul n_d face parte dintr-un element pe care se distribuie un debit, atunci termenului liber va fi egal cu o treime din produsul dintre valoarea debitului distribuit și suprafața elementului respectiv. Regula este valabilă atît

pentru elemente interioare cît și pentru cele marginale. Prin programul de calcul se testează dacă toate elementele care sînt legate de nodul n_d au debite distribuite. În caz afirmativ se face însumarea produselor de mai sus, obținîndu-se termenul liber. Regula de semne este cea amintită la debitele concentrate.

d) Frontieră liberă

Acest tip de frontieră pune probleme deosebite deoarece trebuie să fie satisfăcute două condiții limitative cînd încă nici nu se cunoaște traseul acestei frontiere. După cum se știe condițiile limitative sînt că de-a lungul frontierei libere sau mai bine zis în punctele nodale situate pe această frontieră fiind vorba de metoda elementelor finite, debitul concentrat și presiunea este zero (presiunea zero corespunde presiunii atmosferice de referință). Valorile nodale se notează cu q_n și p_n .

Rezolvarea problemelor cu frontieră liberă necesită un proces iterativ [61] [139]. În principiu se consideră în prealabil un traseu aproximație I-a a curbei frontierei libere denumit C_I , pe care se satisfac una din condițiile limitative (fie q_n sau p_n egale cu zero). Prin satisfacerea celei de a doua condiții se caută corectarea poziției curbei C_I la o nouă poziție C_{II} . Ajustarea se face iterativ și sînt două posibilități:

- adoptarea ca în toate nodurile $q_n = 0$ și iterarea pînă se obține $p_n = 0$; sau
- adoptarea ca $p_n = 0$ și respectiv iterarea pînă la obținerea lui $q_n = 0$ pe toată frontiera.

Cercetările arată [61] că prima posibilitate nu este recomandabilă în practică deoarece apar efecte deranjante în procesul iterației și care duc la divergență, fenomen deocamdată neprofundat și nelămurit matematic.

A doua posibilitate a fost selectată și de autor deoarece în esență este destul de simplă și constă în

- 1) fixarea unui traseu inițial C_I
- 2) adoptarea ca $p_n = 0$ care se face prin eve-

luarea prealabilă a înălțimilor piezometrice în nodurile pe C_I . Aceste două anticipații cer o cercetare experiențială din partea cercetătorului și sînt în dependență de proprietățile de permeabilitate și de celelalte condiții de margine.

3. se determină înălțimile piezometrice rezolvînd sistemul (4.40).

4. pentru fiecare nod al traseului C_I se scrie relația

$$S_{11} \cdot H_1 + \sum_1^{N_{1j}} S_{1j} H_j = q_1 \quad (4.54)$$

în total n astfel de relații unde $n = n_x$ total al nodurilor pe frontiera liberă C_I

i = numărul curent al unui nod pe C_I

j = numărul nodului care este legat cu nodul i

N_{1j} = n_x total al nodurilor de tip j sau mai bine zis n_x elementelor în jurul punctului i

S_{11} resp. S_{1j} = elementele matricei de influență calculate după regula (4.41) și (4.42) și fiind cunoscute H_1 și resp. H_j -urile = înălț. piezometrice în nodul i , respectiv în cele j , cunoscute de operația c)

5. dacă $q_1 \neq 0$ se va ajusta curba C_I la un nou traseu C_{II} repetînd operațiile b, c, d pînă cînd $\delta q_1 \rightarrow 0$.

Acest procedeu însă este laborios că o dată cu schimbarea traseelor $C_I, C_{II} \dots$ pînă la C_n se necesită și schimbarea unor elemente din matricea de influență.

Procedeu iterativ se poate introduce în calculator. În control final al tuturor iterațiilor pe lângă condiția că $\delta q_1 = 0$ este ca prin curba ce delimitează frontiera liberă nu trebuie să treacă nici o linie de curent.

Senul debitelor δq_1 rezultate din iterații indică direcția și mărimea corecției curbei frontierei libere, și anume nodul respectiv se va mișca în sens invers debitului

δq_1 (care poate fi de alimentare sau de prelevare). În general soluții bune se obțin la un număr de 5-20 de iterații

[189] .

e) Frontieră impermeabilă

Deoarece pe acest tip de contur nu există un schimb de debite între exterior și domeniul studiat, nodurile situate pe frontiera impermeabilă se consideră ca și puncte interioare și deci nu modifică cu nimic mersul calculului.

4.5. Determinarea liniilor echipotențiale

După aflarea tuturor înălțimilor piezometrice $H = H(x, y)$ în nodurile rețelei, acum se poate trasa alura unei linii echipotențiale de $H = \text{const}$, prin interpolare. În principiu se procedează la fel ca și la trasarea curbelor de nivel în topografie. În ceea ce urmează se propune o metodă de trasare a acestor linii folosind tehnica de calcul modernă.

De regulă vom diviza diferența $H_2 - H_1$ între înălțimile piezometrice a două frontiere în 100 părți egale, adică pentru o frontieră avem $H_2 = 100$ iar pentru cealaltă 0. Se obișnuiește să se traseze liniile care au înălțimea piezometrică egală cu $0 \text{ const} = 10, 20, 30 \dots$

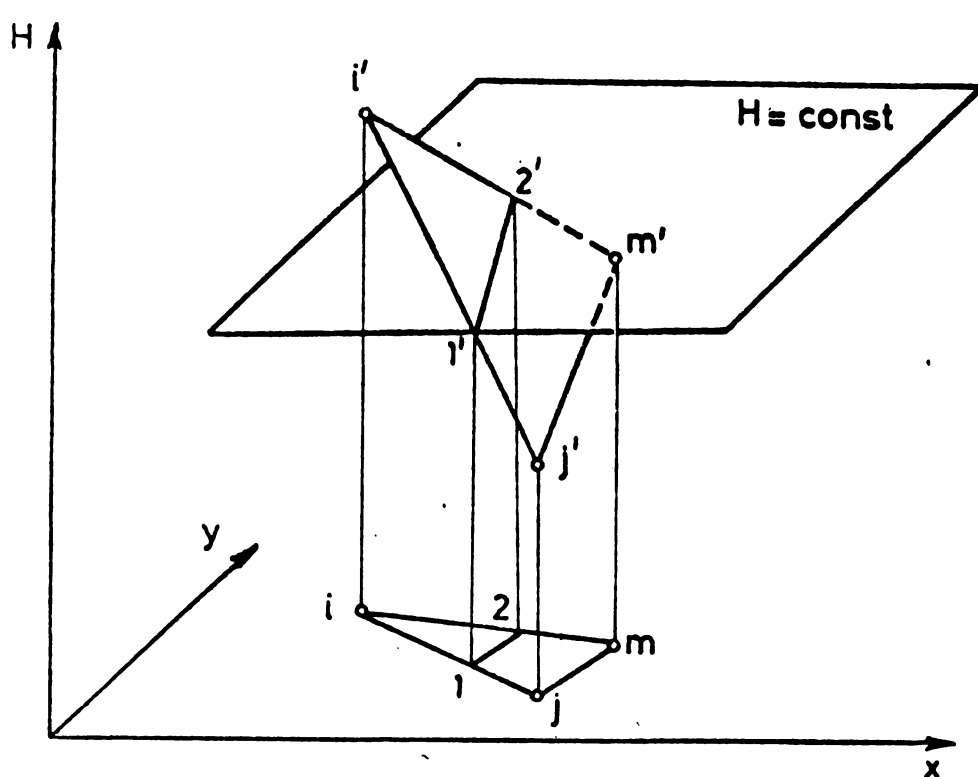


Fig.4.7 SCHEMA DE DETERMINARE A LINIEI ECHIPOTENȚIALE $H = \text{const}$ ÎNTR-UN ELEMENT FINIT

Practic va trebui să determinăm proiecția pe planul orizontal de referință, intersecția planului înălțimilor liniilor piezometrice al unui element finit e , cu un plan paralel cu planul orizontal și care se află la o cotă $H = \text{const.}$ (vezi fig.4.7)

Ecuația planului înălțimilor liniilor piezometrice $i' - j' - m'$ este dată de relația (4.13), coeficienții A_1 , B_1 , C_1 fiind determinați după relațiile (4.22) în care se cunosc coordonatele punctelor i , j și m precum și cotele H_i , H_j și H_m .

Intersecția acestui plan cu un plan orizontal aflat la cota $H = \text{const.}$ va da o dreaptă care proiectată pe planul orizontal de referință are ecuația:

$$A_1 x + B_1 y + C_1 \text{ const} = 0 \quad \& (4.55)$$

Ecuațiile parametrice ale dreptei $i-j$

$$x = x_i + (x_j - x_i) \delta \quad (4.56)$$

$$y = y_i + (y_j - y_i) \delta$$

Intersecția dreptei (4.55) cu latura $i-j$ va da punctul l (vezi fig.4.7) care este caracterizat prin valoarea lui

$$\delta = \frac{-(A_1 x_i + B_1 y_i + C_1 - \text{const})}{A_1 (x_j - x_i) + (B_1 (y_j - y_i))} \quad (4.57)$$

Punctul l se află pe latura $i-j$ când

$$0 \leq \delta \leq 1 \quad (4.58)$$

În cazul când (4.58) nu se verifică înseamnă că punctul l este în afara domeniului triunghiului elementar finit considerat și ca atare nu ne interesează această intersecție. Apoi după același procedeu vom testa în continuare și laturile $j-m$ și $m-i$. Se va determina astfel dacă prin elementul finit e trece sau nu linia echipotențială $H = \text{const.}$

În continuare se va repeta operația și pentru celelalte triunghiuri de elemente finite. Vom obține o pereche de valori de coordonate x, y care unite ne vor da o linie poligonală

care aproximează cu o anumită precizie linii echipotențiale $H = \text{const}$. Cu cât rețeaua de elemente finite este mai densă cu atât aproximarea este mai bună.

Schimbând constante putem trasa liniile echipotențiale la desimea dorită

4.6. Determinarea liniilor de curent

Există două cai de a le obține:

- prima din direcția vitezei care este acum cunoscută. Din ecuația (4.3) avem componentele vectorului viteză cunoșcând gradientul presiunilor în fiecare nod. Dacă există un număr suficient de noduri, linia de curent se poate calcula ușor. Această simplă metodă se poate programa, deci direcția liniilor de curent în fiecare element se poate obține

- a doua metodă folosește chema conjugată a spectrului mișcării, funcția de potențial al vitezei și funcția de curent se pot înlocui una cu alta. Domeniul mișcării este același însă se întreschimbă condițiile de limită. Liniile echipotențiale obținute din a doua schemă după metoda descrisă în prezenta lucrare reprezintă de fapt liniile de curent al primei scheme.

Al doilea procedeu este valabil numai în cazul mediilor omogene și izotrope.

La determinarea liniilor de curent autorul a ales prima cale de rezolvare fiindcă se poate aplica la orice tip de mediu.

Pentru aflarea componentelor v_x și v_y vom folosi relația (4.7). Neavem decât să adăugăm ipoteza că distribuția înălțimilor piezometrice în fiecare element finit triunghiular se face după un plan, conform (4.13) și (4.7) se poate scrie

$$v_x = -k_{xx} A_1 \quad v_y = -k_{yy} B_1 \quad (4.59)$$

O concluzie a acestei ultime relații este că în domeniul unui element finit componentele vitezei sînt constante.

Astfel deci putem stabili pentru fiecare triunghi element finit mărimea și direcția vitezei de filtrație, constantă pentru elementul respectiv.

O linie de curent care de fapt este o înfășurătoare a vectorilor viteză, se va aproxima cu o linie poligonală.

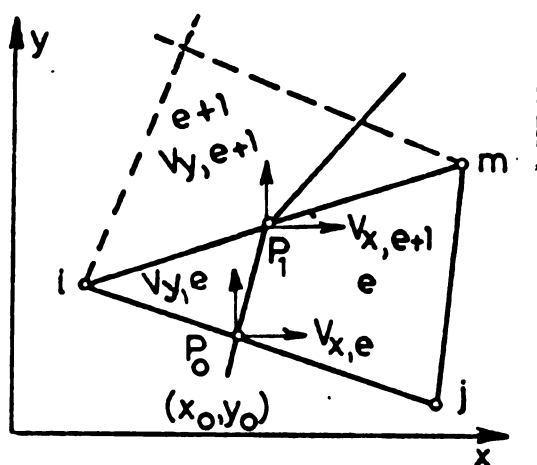


Fig.4.8 SCHEMA DE DETERMINARE A LINIEI DE CURENT

Se consideră fig.4.8 și că pe latura i-j a elementului e am ales un punct de coordonate $P_0(x_0, y_0)$ situat deci pe frontiera elementului respectiv.

Ecuațiile parametrice ale liniei de curent care trece prin acest punct, pentru elementul e :

$$x = x_0 + v_{x,e} t \quad (4.60)$$

$$y = y_0 + v_{y,e} t$$

De asemenea se poate scrie pentru dreapta m-i ecuația parametrică

$$x = x_m + (x_i - x_m) \xi \quad (4.61)$$

$$y = y_m + (y_i - y_m) \xi$$

Intersecția liniei de curent cu latura m-i este dat de sistemul cu necunoscutele ξ și t ;

$$v_{x,e} t - (x_i - x_m) \xi = x_m - x_0 \quad (4.62)$$

$$v_{y,e} t - (y_i - y_m) \xi = y_m - y_0$$

din care putem determina pe

$$\xi = \frac{v_{x,e}(y_m - y_0) - v_{y,e}(x_m - x_0)}{-v_{x,e}(y_i - y_m) + v_{y,e}(x_i - x_m)} \quad (4.63)$$

Decă $0 \leq \xi \leq 1$ (4.64)

atunci există un punct P_1 de intersecție între latura m-i și linia de curent mai sus precizată (vezi fig.4.8)

Decă în ec.(4.63) înlocuim componentele vitezei după (4.59) se poate scrie:

$$\xi = \frac{-k_{xx} A_1 (y_m - y_0) + k_{yy} B_1 (x_m - x_0)}{k_{xx} A_1 (y_i - y_m) - k_{yy} B_1 (x_i - x_m)} \quad (4.65)$$

Dacă în interiorul fiecărui element finit coeficienții de transmisivitate T (respectiv coeficientul de permeabilitate) sînt constanți, atunci valoarea din (4.65) pentru același element finit e devine:

$$\xi = \frac{-T_{xx}A_1 (y_m - y_0) + T_{yy}B_1 (x_m - x_0)}{T_{xx}A_1 (y_1 - y_m) - T_{yy}B_1 (x_1 - x_m)} \quad (4.66)$$

Coordonatele punctului P_1 se pot calcula cu (4.61) introducînd valoarea lui ξ din (4.66).

Dacă (4.64) nu este satisfăcut vom căuta punctul de intersecție P_1 pe latura j - n .

În continuare pasul următor va fi acela că rolul lui x_0 și y_0 din (4.60) îl va lua x_1 și y_1 și se va căuta care este elementul finit următor $e+1$ care are o latură pe care este situat punctul P_1 . Operația se repetă pînă cînd se ajunge cu linia de curent pe cealaltă frontieră care delimitează domeniul studiat.

Unind punctele de coordonate astfel găsite vom obține o linie poligonală care aproximează linia de curent.

4.7. Prezentarea programului de calcul MELFIN -1

Cele descrise anterior au fost transcrise într-un program în limbaj FORTRAN IV testat și rulat pe un calculator Felix C-256. Programul poate fi executat pe orice calculator care dispune în sistemul de operare de un compilator FORTRAN și are cel puțin configurația următoare: cititor de cetele, imprimantă rapidă cu 132 de caractere utile. Eventual și în caz de nevoie accesă configurație (vezi pct.4.9) se poate amplifica cu o unitate de discuri sau cu o unitate de bandă și de asemenea cu o masă de desen plotter.

La programare s-a avut în vedere că datele primare să fie reduse la minim iar rezultatele să fie prezentate într-o formă concludentă. S-a avut în vedere și volumul de memorare și optimizarea timpului de calcul.

Programul este un program modular compus dintr-un

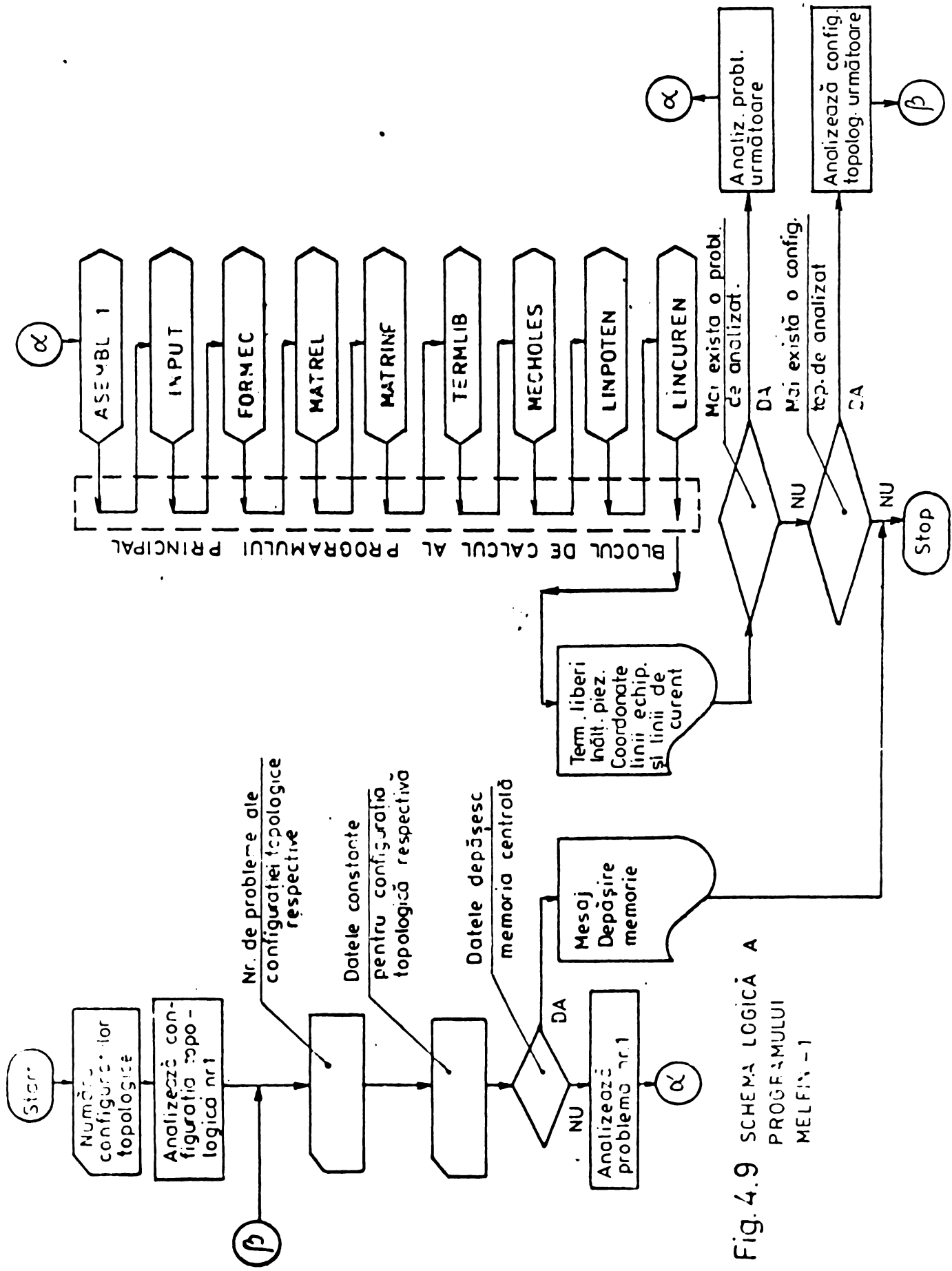
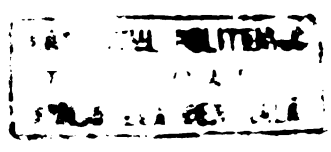


Fig. 4.9 SCHEMA LOGICĂ A PROGRAMULUI MELFIV - 1



program principal care apelează 9 subrutine. Subrutinele sînt apelate în ordinea arătată în fig.4.9. Programul principal PRINC citește numărul variantelor de configurație topologică de rezolvat. Pentru varianta respectivă citește numărul elementelor, numărul nodurilor și numărul nodurilor a unui element, lățimea matricii bandă alocată în memoria centrală, tipul mediului poros (izotrop, anizotrop, ortotrop, sau neomogen) În cadrul unei variante topologice aceste date rămîn constante de asemenea rămîn constante, poziția limitrofă a elementelor în jurul nodurilor și transmisivitatea elementelor.

O configurație topologică însă permite mai multe variante de probleme de rezolvat. Trecînd la o altă variantă de problemă dar în cadrul aceleiași variante de configurație topologică, se pot schimba, debitele distribuite pe elemente, debitele concentrate în noduri, înălțimea piezometrică pe nodurile de contur, coordonatele nodurilor sub aspectul că poziția limitrofă reciprocă a elementelor rămîne aceeași, în fine se mai pot schimba condițiile de margine pentru nodurile situate pe frontieră.

Programul tipărește datele citite și niște informații ca: locațiile rezervate în memoria centrală pentru numărul de noduri, număr de elemente, lățimea maximă rezervată pentru matricia bandă, tipul mediului poros, codul condițiilor de margine. Apoi se verifică dacă datele nu depășesc locațiile rezervate. În caz că depășesc tipărește un mesaj și oprește programul, în caz de nedepășire continuă programul prin apelaarea consecutivă a 9 subrutine care se descriu în cele ce urmează. Ținînd seama de necesarul de memorie pentru subrutine programul poate rezolva sisteme cu cca. 200 de ecuații (adică 200 de noduri) cu 200 necunoscute avînd interconectate 300 de elemente.

ASSEMBL 1 citește numărul nodurilor pentru fiecare element. Citirea se face în sens antiorar. De asemenea pentru fiecare element citește și valoarea debitului distribuit pe element și un cod care semnalează că la reluarea analizei prob-

lemei (problema 2 ș.s.m.d) valoarea, debitului distribuit se schimbă sau nu. Dacă nu se schimbă, acest cod este zero și la problema următoare nu se mai citește valoarea debitului distribuit pentru elementul respectiv pentru economie de timp. În caz contrar codul este 1 și se citesc datele numai pentru elementul respectiv unde s-a modificat valoarea debitului distribuit. Altfel ar trebui citite din nou toate datele ce este însă foarte neeconomic.

Tot în această subrutină se face și o prelucrare și anume asamblarea elementelor în jurul nodului. Se tipărește rezultatul sub formă unui tabel și anume în jurul unui nod ce elemente se află. Tabelul conține toate nodurile domeniului studiat. Datele se depun într-o zonă de locații special rezervate pentru a le regăsi în prelucrările ce vor urma.

Deoarece configurația topologică a rețelei de noduri nu se schimbă în problemele următoare asamblarea se face numai în cadrul problemei nr.1 pentru a scurta timpul de calcul. La sfârșitul subrutinei se mai tipărește și numărul curent al problemei.

INPUT - subrutină cu care se introduc o serie de date prin citirea valorilor nodale pentru

- coordonatele nodurilor
- codul condițiilor de margine
- înălțimile piezometrice cunoscute pentru nodurile aflate pe contur
- debitele concentrate în noduri
- codul care semnalează că la reluarea studiului problemei (problema a 2-a ș.s.m.d) în ce anume noduri au intervenit schimbări. Procedura este identică ca și cea descrisă la ASSEMBL 1 pentru debitele distribuite pe element.

În cazul subrutinei se tipăresc apoi datele nodale ale problemei.

FORMEC are rolul de a calcula lățimea necesară a matricei bandă, tipărește acest rezultat și verifică dacă această lățime este mai mică sau egală cu lățimea rezervată în memorie.

Dacă e depășită atunci tipărește un mesaj și oprește programul.

MATREL - subrutină în care se citesc transmisivitățile elementelor de pe cartele de date, informații care se depun în locațiile rezervate în memorie unde se vor regăsi pentru subrutinele următoare.

Apoi se calculează matricea fiecărui element finit. Această matrice depinde de coordonatele nodurilor elementului și de proprietățile fizice ale elementului respectiv.

În continuare tipărește o serie de date și anume: nr. elementului, nr. nodurilor elementului respectiv în sens anterior (Aceste două grupuri de date au fost citite în subrutina **ASSEMBL-1**), transmisivitatea elementului, debitul distribuit pe element și codul citit în subrutina **ASSEMBL-1** cu privire la schimbarea valorii debitului distribuit la problema următoare.

MATRINF - calculează matricea de influență și o depune în memorie în matricea bandă.

TERMLIB - calculează termeni liberi, ține seama și de condițiile de margine (nodurile cu datele cunoscute de pe frontiera domeniului), apoi tipărește termeni liberi.

MECHOLES - rezolvă sistemul de ecuații prin metoda Cholesky. Tipărește rezultatele, adică înălțimile piezometrice în noduri.

LINPOTEN - calculează coordonatele liniilor echipotențiale și tipărește coordonatele punctelor pentru fiecare linie.

LINCUREN - calculează coordonatele liniilor de curent și tipărește coordonatele punctelor liniilor respective.

Listingul programului **MELFIN-1** pentru un caz concret se prezintă în anexa nr.1, iar în anexa 2 liniile echipotențiale și liniile de curent pentru acest caz.

4.8. Căi de utilizare eficientă a calculatorului [158]

Formularea matriceală a metodei elementelor finite conduce la un algoritm de calcul simplu de programat și cu un grad avansat de generalitate. Aceste avantaje rezultă însă prin sporirea substanțială a numărului de necunoscute care intervin în rezolvare. La rețele mai complicate, se ajunge ușor la depășirea

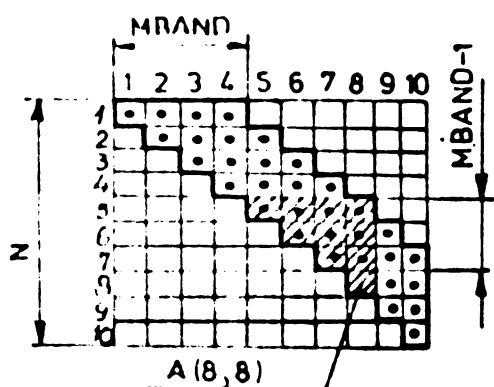
memoriei interne a calculatorului.

În vederea rezolvării automatizate a rețelelor de mai mare complexitate, păstrînd caracterul general al formulării metodei de calcul se poate proceda în două moduri:

O primă posibilitate constă în efectuarea întregii rezolvări în memoria internă a calculatorului, adoptînd măsuri adecvate pentru utilizarea optimă a spațiului limitat de care se dispune. De asemenea, se recurge frecvent la segmentarea programului, pentru efectuarea într-o anumită succesiune a unor faze distincte ale rezolvării.

O a doua posibilitate constă în folosirea memoriilor externe ale calculatorului. De data aceasta, problema esențială constă în adoptarea unor măsuri pentru reducerea timpului de transfer a datelor între memoria internă și memoriile externe.

Prima posibilitate folosește o particularitate și totodată un avantaj al soluționării sistemelor de ecuații cu matrice bandă prin metoda Cholesky și anume că în fiecare etapă intervin numai un număr limitat de $m-1$ ecuații anterioare aceleia pe care se operează, m fiind lățimea (nr. de coloane) a matricei bandă (vezi exemplificarea pentru $A(8,8)$ din fig. 4.10)



Elemente ce intervin la calculul descompunerii lui $A(8,8)$

Fig. 4.10 MATRICEA TIP BANDĂ

Descompunerea prin substituție

înainte a matricei bandă inițiale se face pe linii, simultan și cu termenul liber (notat cu F în (4.40) respectiv cu

P în (4.44). Un alt avantaj al metodei discutate este că se pot soluționa și alte cazuri privind

valoarea debitelor de alimentare sau de prelevare în noduri. Pentru fiecare caz nou se necesită depunerea numai pe o nouă coloană res-

pectivă a datelor cu termeni liberi,

matricea bandă $[A]$ din ec. (4.44) rămînînd valabilă și nu mai necesită noi înregistrări sau locații în memoria calculatorului.

Dacă notăm cu n_c numărul de cazuri privind termenul liber va trebui să existe în memoria centrală a calculatorului;

- o memorie pe care se lucrează, de dimensiunea $(m+n_c)$ coloane x $(m-1)$ linii și

- o memorie de aceeași dimensiune care cuprinde elementele necesare acestei prelucrări.

Este evident că o memorie de $2(m+n_c)(m-1)$ este suficientă pentru calculul efectiv, dar cum operația de trecere a elementelor necesare din memoria externă (banda sau disc) în cea internă a calculatorului și invers sînt operații ce necesită un timp prețios, este suficient ca dimensiunea memoriei să fie și mai mare decît $2(m+n_c)(m-1)$ și să cuprindă un număr de n_e ecuații (linii). Acest bloc de memorie se determină în raport cu cea alocată în memoria centrală, notată cu M_s , după următoarele două condiții:

$$M_s = 2 n_e (m + n_c) \quad (4.67)$$

$$\text{și evident } M_s \geq 2 (m + n_c) (m - 1) \quad (4.68)$$

Numărul de ecuații dintr-un bloc se determină cu

$$n_e = \frac{M}{2(m+n_c)} \quad (4.69)$$

cu restricția

$$n_e \geq (m-1) \quad (4.70)$$

Schea algoritmului, pe baza căruia se va desfășura rezolvarea sistemului de ecuații, este extrem de simplă

După prelucrarea blocurilor 1 și 2 prin descompunere înșirte aduse în memoria centrală din suportul extern unde fuseseră depozitate, blocul unu se trimite înapoi pe bandă sau disc locul său fiind luate în memoria centrală de blocul doi, iar a acestuia de blocul trei, adus din memoria externă și care urmează a fi prelucrat. Apoi blocul doi se trece pe bandă; blocul trei îi ia locul, iar pe al acestuia îl ia blocul patru ș.a.m.d. Ultimul bloc nu se mai trece pe suport extern ci, după prelucrare, se folosește la începerea operației de descompunere (substituția) înapoi, care se

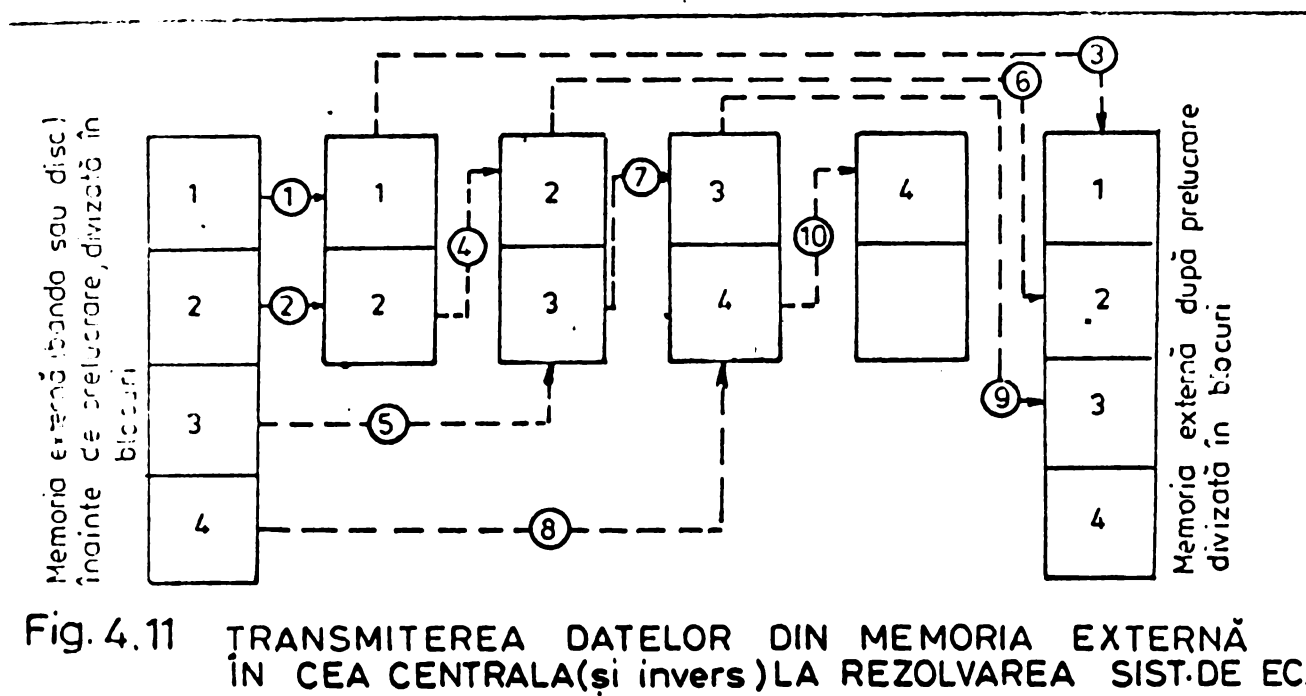


Fig. 4.11 TRANSMITEREA DATELOR DIN MEMORIA EXTERNĂ ÎN CEA CENTRALĂ(și invers) LA REZOLVAREA SIST.DE EC.

efectuează exact în același mod dar cu derularea benzii în sens invers (sau vehicularea corespunzătoare a datelor de pe un disc de manevră din nou în memoria centrală)

Dacă timpul necesar pentru calcul este mai redus decât cel necesar pentru introducere/extragere a datelor primare atunci programul este limitat ca introducere/extragere. Pentru astfel de programe este caracteristic că un anumit timp se consumă prin așteptarea vehiculării datelor și numai după terminarea acestuia programul poate fi rulat în continuare. În alte situații programul poate fi limitat ca timp de calcul, dacă acesta este mai mare decât cel pentru introducere/ extragere. În cadrul procesului de descompunere a matricii necunoscutelor și de rezolvare a sistemului de ecuații la diverse faze de vehiculare a datelor din blocurile 1 și 2 în memoria centrală, respectiv în cea externă, programul va fi limitat fie ca introducere/ extragere fie ca timp de calcul.

Se menționează posibilitatea calculatoarelor de a lucra în regim de multiprogramare. Prin acesta calculatorul poate executa concomitent operația de introducere / extragere a datelor cu cea de calcul folosind mai multe memorii tampon (buffer).

De ex.prin folosirea a două zone de memorie tampon după citirea și depunerea datelor din blocul 1 în zona 1 începe prelucrarea prin descompunere. În acest timp de prelucrare a blocului 1, se depun datele blocului 2 în zona tampon 2 (vezi fig.4.12.b). Când s-a terminat prelucrarea datelor blocului 1, începe prelucrarea datelor blocului 2. Concomitent se citesc și se depun datele blocului 3 în zona tampon 1.

În procesul reprezentat în fig.4.12 s-a presupus că fiecare operație necesită o durată egală ca și introducerea datelor. În mod practic, acestea nu corespund totdeauna și atunci se adoptă durata maximă a unei operații păstrând principiul multiprogramării. Avantajul regimului de lucru în multiprogramare este evident, se obține un timp de rulare mai redus.

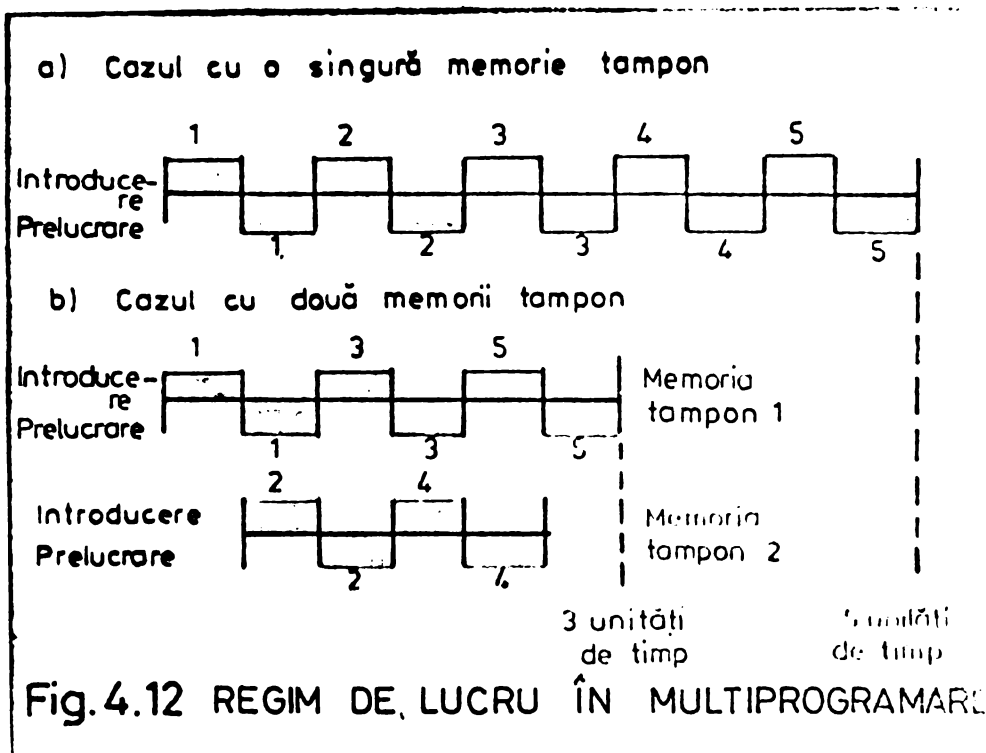


Fig.4.12 REGIM DE LUCRU ÎN MULTIPROGRAMARE

Avantajul regimului de lucru în multiprogramare este evident, se obține un timp de rulare mai redus.

Deoarece trasarea liniilor echipotențiale și a liniilor de curent prin transpunerea manuală a coordonatelor calculate este destul de dificilă, se propune folosirea unei unități periferice de ieșire a calculatorului electronic. Aceasta este traserul de curbe denumită și masa de desen-plotter.

Folosirea mesei de desen -plotter permite obținerea automată și rapidă a spectrului hidrodinamic al mișcării.

4.9. Propuneri pentru perfecționarea tehnicii de calcul.

În analiza cu metoda elementelor finite a problemă

esențială este pregătirea datelor primare, introducerea lor în calculator și controlul prin testare a corectitudinii valorilor. În general aceste operații reclană un timp și un volum de muncă mult mai mare decât însăși calculele propriu zise. Tehnica modernă de calcul numeric se poate îmbunătăți prin folosirea unor metode mai perfecționate de generare și de manipulare a datelor primare. În cele ce urmează se prezintă succint o propunere în acest sens [150].

După conceperea geometriei de discretizare a domeniului studiat adică numerotarea nodurilor, a elementelor, precizarea condițiilor de limită, introducerea coordonatelor nodurilor se poate efectua cu un coordonatograf de precizie. Acesta servește la cartarea punctelor în sistemul de coordonate ortogonale, eroarea medie de coordonate $\pm 0,03$ mm (la tipul KL 900x1200). Se poate cupla cu un coordimetru și să lucreze pe bază de înregistrări automate informațiile fiind stocate pe un suport extern (bandă perforată, bandă magnetică sau disc, cartele perforate sau imprimantă). De pe acest suport

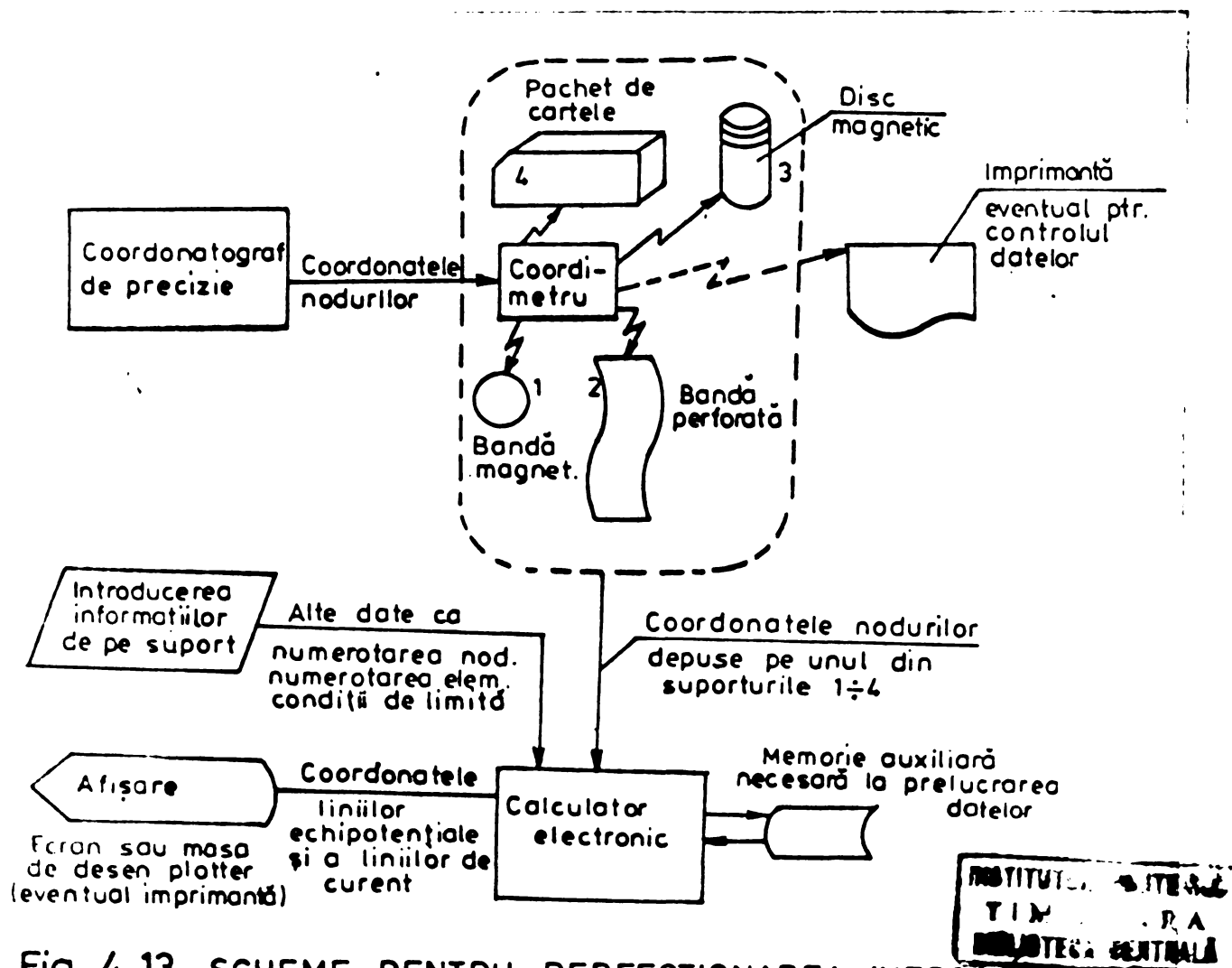
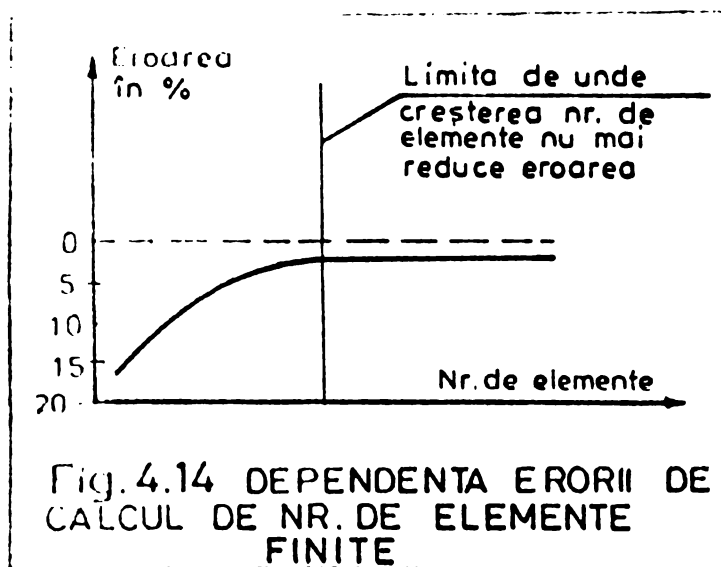


Fig. 4.13 SCHEME PENTRU PERFECTIONAREA INTRODUCERII ȘI EXTRAGERII DATELOR

datele se pot introduce în calculator (fig.4.13).

Pentru a stabili mai exact alura spectrului hidrodinamic se aplică procedeul îndesării locale a elementelor finite. Aceasta este indicată în special pentru zonele cu gradient ridicat. Inșă o discretizare mai fină are dezavantajul sporirii volumului de date inițiale ce trebuiesc furnizate pentru aplicarea programului de calcul. Deși o discretizare mai fină duce la o precizie mai mare se poate constata că de la un anumit număr de elemente rezultatele nu mai pot fi îmbunătățite simțitor prin creșterea numărului acestora (fig.4.14).



Pentru structuri cu un grad ridicat de complexitate și cu dimensiuni mari este indicat generarea automată a topologiei și a coordonatelor nodurilor, reducând prin aceasta substanțial efortul depus cu manipularea datelor inițiale.

4.10. Concluzii parțiale

Metoda elementelor finite se conturează ca o metodă

cu caracter general prezentând față de celelalte metode numerice de rezolvare o precizie sporită care rezultă din contextul ei energetic pe care este fundamentată metoda. Precizia este sporită și datorită faptului că se face o rezolvare exactă iar aproximația este fizică spre deosebire de toate celelalte metode numerice unde aproximația este fizică și matematică.

Metoda elementelor finite permite pe de altă parte subdiviziuni în elemente neregulate care urmăresc contururi de formă complexă, lucru de asemenea dificil pentru celelalte metode numerice.

Un avantaj al metodei este larga ei posibilitate de a modela medii neomogene, anizotrope foarte neregulate din punct de vedere al proprietăților și al geometriei, medii care practic nici nu pot fi studiate pe alte căi sau metode,

decît prin aproximații grosiere care de multe ori sînt inadmisibile.

Metoda are particularitatea cã utilizează calculatorul electronic și de aici rezultă implicit și avantajele pe care le prezintă acesta din urmă: timp de rezolvare scurt, precizie sporită și controlată, introducere și scoaterea datelor comodă.

Contribuția autorului la folosirea acestei metode pentru rezolvarea unor probleme legate de mișcarea apei prin medii poroase se rezumă la :

- elaborarea programului de calcul MELFIN -1 prin care se obțin: înălțimile piezometrice în noduri, coordonatele liniilor echipotențiale și de curent , cu alte cuvinte spectrul hidrodinamic al mișcării.

- introducerea folosirii metodei Cholesky la rezolvarea sistemului de ecuații prin care se reduce numărul operațiilor aritmetice cu de 3,5-4 ori față de alte metode de rezolvare.

- rezolvarea tratării automate prin calcul al condițiilor de margine

- propuneri pentru utilizarea eficientă a calculatorului și perfecționarea tehnicii de calcul.

Autorul susține ideea cã o discretizare mai fină să se facă numai în zonele cu gradient ridicat. Orice alt efort pentru a mări finețea discretizării și în alte zone ar fi inutilă deoarece nu aduce un aport substanțial la precizia rezultatelor, în schimb mărește timpul și costul folosirii calculatorului electronic.

C A P I T O L U L V

CONTRIBUTII CU PRIVIRE LA STUDIUL EXFILTRATIEI

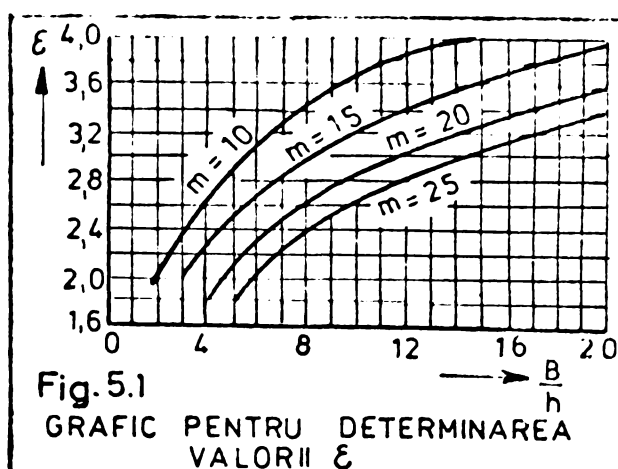
DIN CANALE

5.1. Unele aspecte privind fenomenul exfiltratiei neuniforme din canale în zone subterană.

În soluția dată de Vedernikov [41] , [149] pentru infiltrația dintr-un canal avînd o secțiune transversală trapezoidală, se ajunge la următoarea expresie a debitului real total infiltrat.

$$Q_1 = k (B + \varepsilon \cdot h) \quad (5.1)$$

în care: Q_1 reprezintă debitul infiltrat pe metru liniar de canal; B - lățimea canalului la suprafața apei; h - adâncimea apei în canal; k - coeficientul de permeabilitate; ε - o anumită funcție de coeficientul unghiular m al taluzului și de raportul B/h , funcție ale cărei valori sînt indicate în graficul din fig.5.1.



Se observă că debitul filtrat depinde de caracteristicile geometrice ale canalului, de caracteristica terenului unde este proiectat canalul și de înălțimea apei. Dacă primele două la un canal de infiltrație de o lungime oarecare

sînt constante, a treia caracteristică, înălțimea apei, variază după o lege de-a lungul canalului, deoarece mișcarea este neuniformă.

Canalul de infiltrație nu funcționează decît în secțiunea de la început la plin, în restul lungimii, datorită pierderilor prin infiltrații, scade și adâncimea h ; aceasta însă implică și scăderea valorii debitului infiltrat pe măsură ce se consideră o secțiune mai depărtată de la originea canalului.

Se poate scrie următoarea ecuație integrală, care reprezintă bilanțul debitelor:

$$Q_p - \int Q_1 dl = Q_h \quad (5.2)$$

unde: Q_p reprezintă debitul transportat prin canal în secțiunea de la început, la plin; Q_1 - debitul infiltrat într-o secțiune la distanța de la începutul canalului pe unitatea de lungime; Q_h - debitul transportat prin canal în secțiunea situată la distanța l de la începutul canalului.

Folosind notațiile din fig.5.2 unde valoarea $\mu = h/H$ este gradul de umplere, relația (5.1) devine:

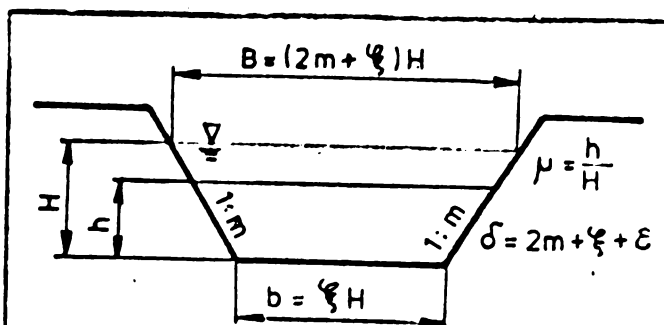


Fig.5.2 NOTAȚIILE FOLOSITE

$$Q_1 = k \delta h = kH \delta \mu \quad (5.3)$$

Adoptînd pentru coeficientul C din formula lui Chézy relația lui Manning, indicată în STAS 3051-68, și utilizînd formulele stabilite în lucrarea [80] de Giurconiu, Mirel, Păcurariu și Pops, se poate

scrie că rapoartele debitelor și vitezelor la o adîncime oarecare față de respectivele valori la plin sînt funcții de gradul de umplere la o distanță l de la începutul canalului:

$$\frac{Q_l}{Q_p} = f[\mu(l)] \quad (5.4) \quad \text{și} \quad \frac{v_l}{v_p} = g[\mu(l)] \quad (5.5)$$

în care $\mu(l)$ este o funcție de lungimea canalului, deocamdată necunoscută, iar f și g sînt funcții de asemenea dependente de lungimea canalului prin intermediul funcției $\mu(l)$.

Folosind (5.4) și (5.3), relația (5.2) devine:

$$Q_p - kH \delta \int_0^l \mu(l) dl = Q_p \cdot f[\mu(l)] \quad (5.6)$$

$$\text{Se definește } \lambda = l/L \quad (5.7)$$

o variabilă adimensională denumită în cele ce urmează „lungimea redusă a canalului”. Efectuînd schimbarea de variabilă (5.7) în ecuația (5.6), știind că $dl = Ld\lambda$ și introducînd constanta

$$C_0 = \frac{kH \delta L}{Q_p} \quad (5.8)$$

denumită în cele ce urmează „constanta de infiltrație a canalului” și dacă se notează:

$$\mu(\lambda L) = \chi(\lambda) \quad (5.9)$$

care nu este altceva decît gradul de umplere a canalului în funcție de lungimea redusă a canalului, relația (5.6) după efectuarea calculelor devine:

$$1 - c_0 \int_0^\lambda \chi d\lambda = f(\chi) \quad (5.10)$$

din care va trebui determinată funcția care depinde de lungimea redusă λ .

Pentru rezolvarea ecuației (5.10) se va folosi metoda graficoanalitică. Prin regruparea lui 5.10 se obține

$$1 - f(\chi) = c_0 \int_0^\lambda \chi d\lambda \quad (5.11)$$

sau

$$F(\chi) = c_0 \int_0^\lambda \chi d\lambda \quad (5.12)$$

prin notația $F(\chi) = 1 - f(\chi)$ (5.13)

Deoarece se cunoaște expresia algebrică de definire a funcției $f(\chi)$ din (5.4) și din formulele prezentate în [80] se pot calcula valorile lui $F(\chi)$ dacă se dau lui valori cunoscute de la 0 la 1.

Condițiile de margine sînt: pentru un grad de umplere $\chi = 0$ avem $f(0) = 0$, atunci $F(0) = 1$, iar cînd $\chi = 1$ avem $f(1) = 1$ și $F(1) = 0$. Alura funcției F arată că în fig.5.3.

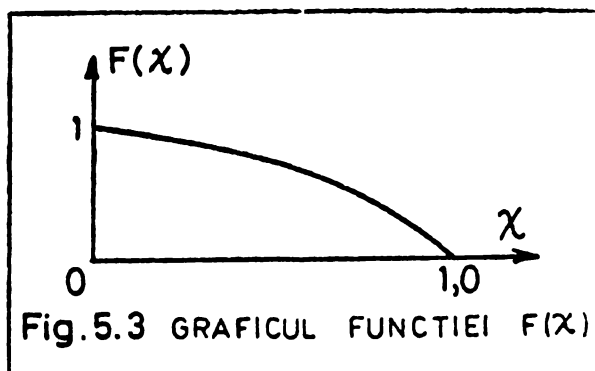
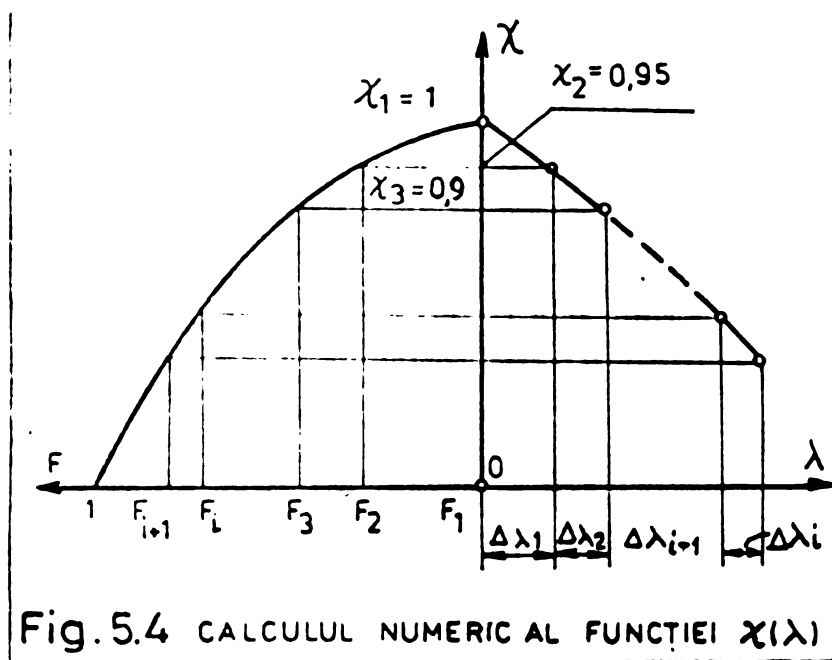


Fig.5.3 GRAFICUL FUNCȚIEI $F(\chi)$

În acest moment se cunosc valorile membrului stîng din relația (5.12) pentru diferite χ ; nu se cunoaște însă funcția $\chi = \chi(\lambda)$ și prin aceeași mică integrală din membrul drept al relației (5.12).

Se presupune că între două puncte vecine de abscisă λ_i și λ_{i+1} funcția $\chi(\lambda)$ variază

liniar. Aceasta înseamnă că alura curbei continue $\chi(\lambda)$ este înlocuită printr-o linie poligonală; cu cît va fi mai mare numărul de laturi, cu atîta curbă reală va fi mai bine aproximată. Pentru calculul numeric al membrului drept din (5.12) se va utiliza metoda trapezelor [31] care aproximează integrala prin suma ariilor mai multor trapeze. Este una dintre cele mai simple metode pentru integrarea numerică.



Rotind figura 5.3 cu 90° spre stînga, atunci χ este figurat pe ordonate. În dreapta se atașează pe abscise variabila independentă λ . Impunîndu-se un χ va trebui găsită valoarea pe abscisă pentru care relația (5.12) este adevărată. Se procedează din aproape în aproape începînd cu $\chi = 1,00$ descrescător cu un pas

de ex. de 0,05 (vezi fig.5.4).

Pentru primul trapez se poate scrie (5.12) în felul următor:

$$F_2 = C_0 \frac{1}{2} \cdot (\chi_1 + \chi_2) \cdot \Delta \lambda_1 \quad (5.14)$$

în care necunoscuta este $\Delta \lambda_1$. Evident că $\chi_1 = 1,00$ pentru care avem $F_1 = 0$, așa după cum s-a menționat anterior. Din (5.14) se află $\Delta \lambda_1$:

$$\Delta \lambda_1 = \frac{2}{C_0} \cdot \frac{F_2}{\chi_1 + \chi_2} \quad (5.15)$$

în care $\chi_1 = 1,00$, $\chi_2 = 0,95$ iar F_2 este valoarea funcției F pentru $\chi = 0,95$.

Astfel s-a aflat al doilea punct din funcția $\chi(\lambda)$ avînd perechea de coordonate $\lambda = \Delta \lambda_1$ și χ_2 . Primul punct are evident coordonatele $\lambda = 0$ și $\chi_1 = 1,00$, deoarece în secțiunea de la originea canalului gradul de umplere este 1,00, canalul funcționînd din plin.

Procedînd în continuare după cum s-a arătat, pentru al doilea trapez și în continuare din aproape în aproape, generalizînd, se obține:

$$\Delta\lambda_i = \frac{2}{C_0} \frac{F_{i+1} - F_i}{\chi_i + \chi_{i+1}} \quad (5.16)$$

prin care se determină un punct al (i+1)-lea al curbei $\chi(\lambda)$ avind coordonatele :

$$\text{abscisa } \lambda_{i+1} = \sum_1^{i+1} \Delta\lambda_i \quad (5.17)$$

$$\text{ordonata } \chi_{i+1} = 1 - i \cdot \Delta\chi$$

Operația de calcul din aproape în aproape se termină cînd $\chi_{i+1} = 0$ și pentru care $F_{i+1} = 1$.

Pentru a găsi o cît mai bună aproximație a liniei poligonale cu alura curbei continue va trebui sădit pasul $\Delta\chi$ (eventual diferit de 0,05) care dă o eroare sub un ecart stabilit. Aceasta se va face prin iterații.

Iterația $n = 1$ cu pasul $\Delta\chi_1 = 1$ pentru care în punctul $i = 0$ avem $F_1 = 0$ și $\chi_1 = 1,00$ iar în punctul $i+1=1$ avem $F_{i+1} = 1$ și $\chi_{i+1} = 0$. Din (5.16) și (5.17) rezultă că $\lambda_1 = 2/C_0$ și $\chi_1 = 0$, adică curba $\chi(\lambda)$ este deocamdată aproximată cu o dreaptă care trece prin punctele $\lambda_0 = 0$, $\chi_0 = 1$ și $\lambda_1 = 2/C_0$, $\chi_1 = 0$.

Iterația $n = 2$ cu pasul $\Delta\chi_2 = 1/2 \Delta\chi_1$ adică cu pasul înjumătățit din iterația anterioară. În sferă de punctul inițial se mai determină coordonatele a două puncte $i = 1$ și $i = 2$ în baza relațiilor (5.16) și (5.17). Deci curba $\chi(\lambda)$ se va aproxima cu o linie poligonală compusă din două linii drepte care trec prin punctul inițial ($\lambda_0 = 0$ și $\chi_0 = 1$), prin punctul de frîntură (λ_1 și $\chi_1 = 0,5$) și prin punctul final (λ_2 și $\chi_2 = 0$)

Iterația a n-a are pasul $\Delta\chi_n = \Delta\chi_{n-1}/2 = 1/2^{n-1}$.

Corelațiile (5.16) și (5.17) se determină mulțimea coordonatelor punctelor $i = 1$ pînă la n . Se calculează diferențele în valoare absolută

$$d_e \approx |\lambda_{i,n-1} - \lambda_{i,n}| \quad (5.18)$$

unde primul indice se referă la punct iar al doilea la iterație. Se menționează că valorile $\lambda_{i,n-1}$ se deduc din iterația anterioară și trebuie calculate la jumătatea porțiunii liniei drepte cuprinsă între punctele i și $i+1$. Iterația se oprește când cele n valori d_e după (5.18) sînt sub o limită stabilită. În acest moment s-a găsit pasul $\Delta\lambda$ cu care se aproximează curba $\chi(\lambda)$ printr-o linie poligonală compusă din 2^{n-1} frînturi.

Pentru exemplificarea celor de mai sus se prezintă o exemplificare numerică a unei îmbogățiri studiate, într-un nisip fin avînd coef. de permeabilitate $k = 1,41106 \times 10^{-3}$ m/sec, coef. unghiular $m = 2$, adîncimea inițială $H = 0,70$ m, debitul în secț. inițială $Q = 0,350$ m³/sec, lățimea la fund cu $\xi = 0,5$ $b = 0,5$ $H = 0,35$ m, lățimea la suprafață $B = (2m + \xi)h = (2 \times 2 + 0,5)H = 4,5$ H. Pentru $m = 2$ și $B/H = 4,5$ din fig. 5.1 $\varepsilon = 2\phi$. Valoarea $\varepsilon = 2m + \xi + \varepsilon = 2 \times 2 + 0,5 + 2 = 6,5$ conform celor prezentate în fig. 5.2. Lungimea canalului $L = 100$ m. Constanta de infiltrație a canalului după relația (5.8)

$$C_0 = \frac{kH \delta L}{Q_p} = \frac{1,41106 \times 10^{-3} \times 0,7 \times 6,5 \times 100}{0,35} = 1,83438$$

S-au efectuat iterațiile mai sus prezentate, calculele conducîndu-se tabelar. În tabele au fost cuprinse următoarele coloane: Nr. curent al punctului i , valoarea χ , $f(\chi)$, $F = 1 - f(\chi)$, $\Delta\lambda_i$, λ_{i+1} după (5.17), λ_{i+1}

din iterația anterioară, eroarea d_e după (5.18). Pentru d_e s-a fixat ca limită $0,004$, și care a fost atinsă la iterația a 5-a, deci curba este aproximată cu o linie poligonală din $2^{5-1} = 16$ frînturi cu pasul $\Delta\lambda = 1/16 = 0,0625$

Pentru acest caz studiat curba $\chi = \chi(\lambda)$ se prezintă în fig. 5.5 în care s-a figurat și prima iterație pentru a putea observa diferența dintre prima și iterația finală.

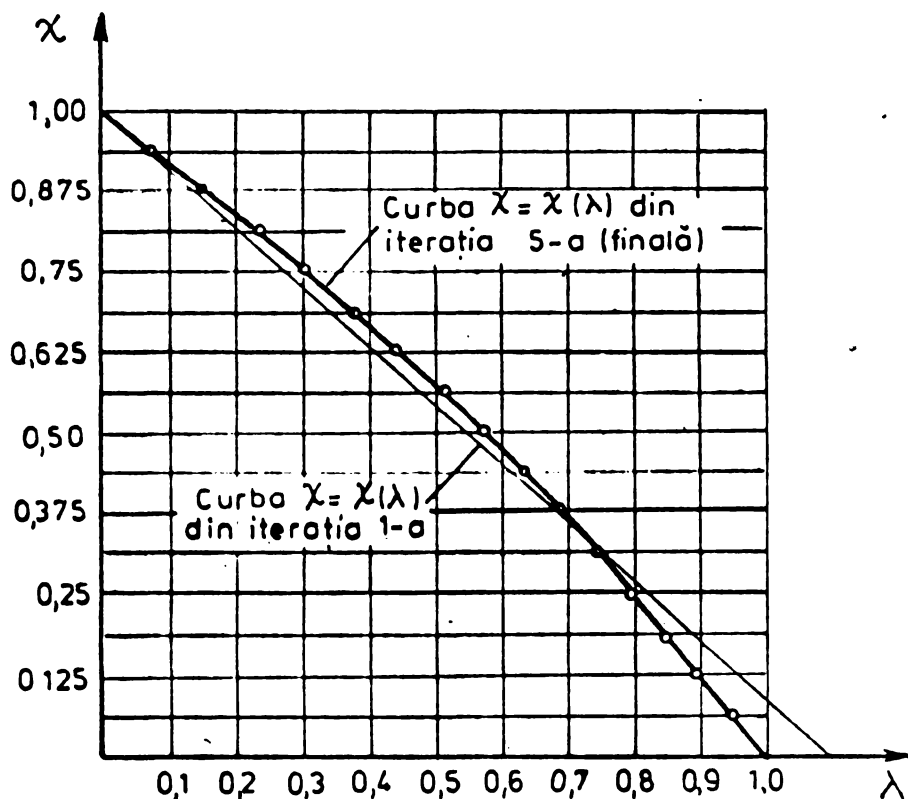


Fig. 5.5 GRAFICUL FUNCȚIEI $\chi(\lambda)$

Se introduce notația λ_f denumită lungimea redusă finală și care este valoarea lui λ pentru care gradul de umplere χ devine zero.

Pentru o constantă de infiltrație a canalului C_0 precizat în (5.8) se poate deci trasa curba $\chi = \chi(\lambda)$ și care are forma ca în figura

5.6. pornind totdeauna din punctul $\chi = 1$ pentru $\lambda = 0$. În funcție de valoarea lui C_0 se pot întîlni următoarele 5 situații [157]

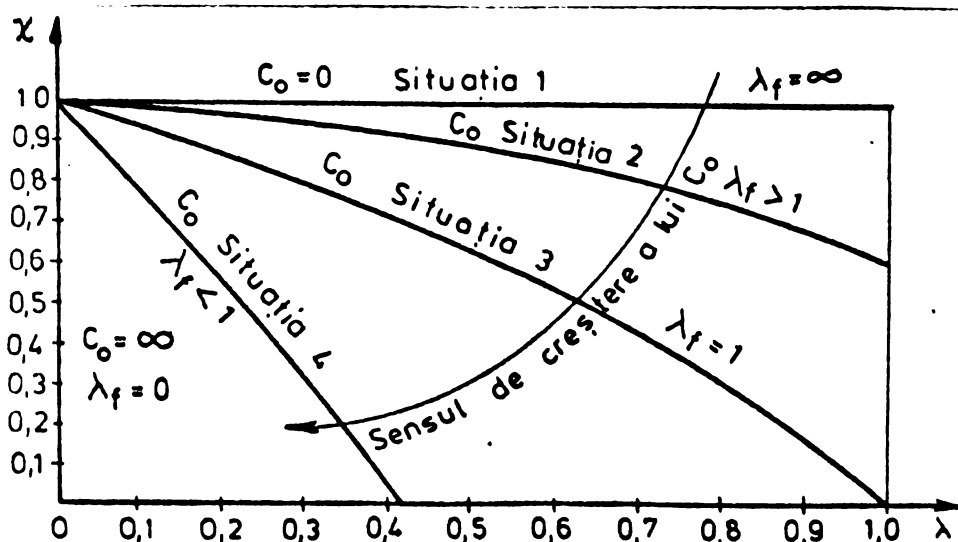


Fig. 5.6 CAZURILE POSIBILE ALE GRAFICULUI FUNCȚIEI $\chi(\lambda)$

1. Valoarea lui $C_0 = 0$ și $\lambda_f = \infty$; aceasta se întîmplă cînd $k=0$, adică la un canal absolut impermeabil. În acest caz curba $\chi = \chi(\lambda)$ este paralelă cu axa absciselor, adică gradul de umplere este constant de-a lungul

întregului traseu al canalului. Ne avînd nici o pierdere prin infiltrație, adîncimea este aceeași cu cea de la începutul canalului. Acest caz este o idealizare și este imposibil de a se realiza

în practică.

2. Valoarea lui C_0 a rezultat astfel din (5.8) încît curba $\chi = \chi(\lambda)$ intersectează verticala ridicată din $\lambda = 1$ la o ordonată oarecare χ . Aceasta înseamnă că la capătul canalului există un grad de umplere și deci o adîncime oarecare de apă. În acest caz $\lambda_f > 1$.

3. Asemănător cazului anterior însă intersecția are loc în punctul $\lambda = 1$ și $\chi = 0$, deci adîncimea este zero la capătul canalului adică debitul cu care s-a alimentat secțiunea de la început s-a infiltrat total pe întreaga lungime a canalului. Evident că $\lambda_f = 1$.

4. O dată cu creșterea lui C_0 , aceasta are loc fie cînd k crește sau lungimea canalului este foarte mare, sau alegînd parametrii din (5.8) ca valoarea lui C_0 să crească; de ex. se poate micșora și Q_p , astfel încît curba $\chi = \chi(\lambda)$ să intersecteze axa absciselor la o lungime redusă λ oarecare. Aceasta înseamnă că întregul debit cu care a fost alimentat canalul a fost infiltrat înainte de a se ajunge la capătul canalului și de la o secțiune oarecare precizată ca poziție prin valoarea λ nu există apă în canal. Pentru acest caz $\lambda_f < 1$.

5. Pentru cazul $C_0 = \infty$, cînd k este foarte mare și Q_p foarte mic, teren complet permeabil și debit alimentat redus, curba $\chi = \chi(\lambda)$ este verticală și se confundă cu axa ordonatelor. În acest caz întregul debit alimentat se pierde prin infiltrație chiar la începutul canalului, în rest nu există curgere pe canal, adică $\lambda_f = 0$. Ca și situația 1, și acest caz este o idealizare, fiind imposibil de a-l realiza în practică.

Printr-o justă alegere a parametrilor din (5.8) se poate regla infiltrația astfel ca să se atingă cazul 3, cel mai recomandat pentru practica curentă.

O primă concluzie din cele prezentate este că debitul infiltrat de-a lungul traseului canalului nu este constant ci proporțional cu funcția $\chi(\lambda)$. Din (5.3) se obține [157]

$$Q_i = k H \delta \chi(\lambda) \quad (5.19)$$

Cunoscînd din acest moment valoare gradului de umplere în fiecare punct al traseului canalului, se poate determina:

- adâncimea apei după formula:

$$h = \chi(\lambda) H \quad (5.20)$$

- debitul transportat; din (5.4) reiese:

$$Q_h = f[\chi(\lambda)] Q_p \quad (5.21)$$

viteza medie a apei; din (5.5) reiese:

$$v_h = g[\chi(\lambda)] v_p \quad (5.22)$$

Viteza v_p la secțiunea de la începutul canalului, la plin, se calculează cu formula lui Chézy, în care pentru coeficientul C se va folosi relația lui Manning, iar pentru raza hidraulică formula propusă în lucrarea [80], și anume $R = \beta H$, unde β este un coeficient adimensional care caracterizează forma secțiunii din punct de vedere hidraulic, iar H adâncimea apei la plin.

Viteza medie într-un punct oarecare, după efectuarea calculelor din (5.22), are expresia

$$v_h = \frac{1}{n} (\beta H)^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot g[\chi(\lambda)] \quad (5.23)$$

și se observă că nu este constantă de-a lungul canalului.

Viteza medie în secțiune obținută astfel trebuie verificată la două condiții importante limitative și antagoniste privind stabilitatea canalului, și anume:

v_h să fie mai mic decât viteza de neeroziune și mai mare decât viteza de înămolire

$$v_{ne} > v_h > v_{in} \quad (5.24)$$

în care: v_{ne} este viteza de neeroziune ;

v_{in} - viteza de înămolire.

Condițiile de stabilitate a albiilor și canalelor a preocupat pe mulți cercetători. Există multe idei și propuneri pentru proiectarea canalelor stabile, care nu se expun aici deoarece există o literatură de specialitate bogată [44], [108],

[127], [207] și prezentarea lor ar depăși tematica acestei lucrări. Alegînd una dintre metodele cunoscute se poate determina

deci mărimea v_{ne} .

Cele afirmate sînt valabile și pentru viteza de înămolire v_{in} . Pentru determinarea acestei viteze există numeroase formule citate în literatura de specialitate 44 .

Valoarea v_h nu este constantă de-a lungul traseului canalului și variază după gradul de umplere conform relației (5.23) ; în anumite zone ale traseului condiția (5.24) poate să fie nesatisfăcută ; în acest caz vor apărea deficiențe în funcționarea canalului.

Pentru îmbunătățirea proprietăților hidraulice ale canalului se propune variația pantei canalului de-a lungul traseului.

Din (5.23) rezultă că panta este:

$$I = \frac{n^2}{(\beta H)^{4/3}} \left(\frac{v_h}{g(\mu)} \right)^2 \quad (5.25)$$

în care v_h se ia fie v_{ne} , fie v_{in} . Dacă pantele sînt mai mari respectiv mai mici decît cele rezultate, avem eroziune sau respectiv depuneri. Situația se arată în figura 5.7.

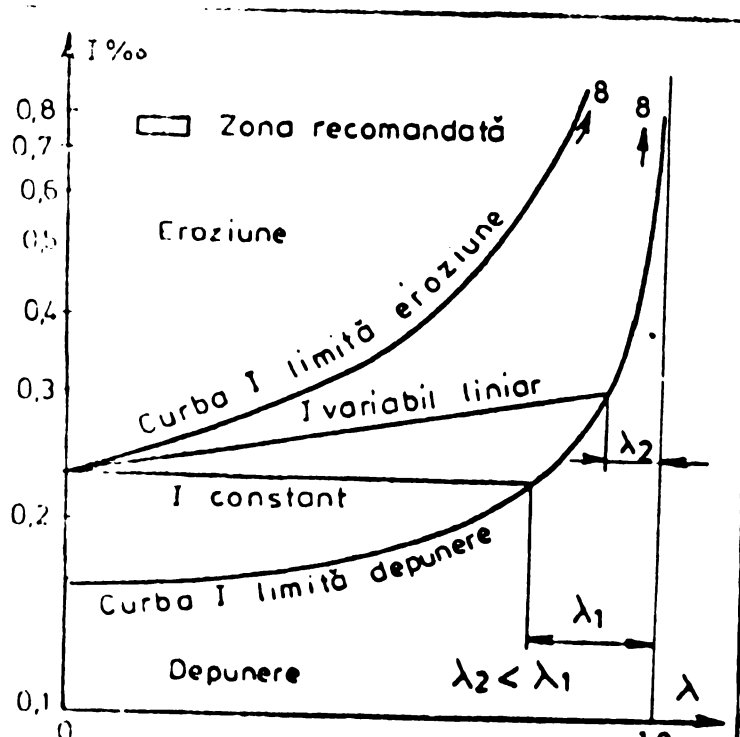


Fig. 5.7 VARIATIA PANTEI SI DOMENIUL DE FUNCIONARE RECOMANDAT

Pentru un anumit λ la care gradul de umplere devine zero, valoarea lui $g(\mu)$ este zero conform relației (5.5). Din (5.25) rezultă că valoarea pantei canalului la acest λ trebuie să devină infinită; este cazul cînd în (5.25) v_h are valoarea vitezei de neeroziune v_{ne} . În cazul cînd în (5.25) v_h are valoarea lui v_{in} , a vitezei de neînămolire, apare o nedeterminare pentru cazul cînd $g(\mu) \rightarrow 0$. Aplicînd regula lui Hospital se deduce că și în acest caz panta tinde spre ∞ .

Pentru cazul practic se propune ca panta canalului să crească liniar și numai pentru o porțiune mică nu este satisfăcută condiția (5.24) unde vor apărea depunerii (vezi fig. 5.7).

Variația liniară a pantei înseamnă că fundul canalului este o parabolă de gradul 2.

Este de dorit ca parabola care definește cota fundului să fie cât mai alungită pentru a evita diferențele prea mari de cote și volumul suplimentar de săpătură. Din acest motiv se recomandă o creștere lentă a pantei de 0,1-0,2

După cum s-a precizat pe o porțiune spre capătul canalului va exista o zonă unde va apărea procesul de colmatare, deoarece sedimentarea aluviunilor în suspensie devine predominantă. Principiul neajuns al colmatării îl constituie realizarea unui strat cu permeabilitate mult mai mică care implică reducerea mărimii debitului infiltrat din canal. Îndepărtarea depunerilor de pe fund și taluze va solicita periodic și un efort financiar suplimentar din partea unității care exploatează canalul.

Lămurirea aspectului cantitativ al mecanismului colmatării se bazează pe descrierea fizică și matematică a procesului de filtrare, deoarece este un fenomen caracteristic al acestor procese.

Filtrarea este un proces complex, care decurge în regim nestaționar și depinde de un număr mare de factori ceea ce și explică faptul că pînă în prezent nu există o teorie complet justificată a acestui proces. Majoritatea cercetărilor au încercat să stabilească ecuații cât mai complete pentru definirea pierderilor de sarcină și a debitului care trece prin stratul filtrant [95], [201].

În baza considerațiilor din [120] formarea stratului colmatat se desfășoară în două faze:

- Faza I de năvălire a suspensiilor, în care perioadă suspensiile pătrund în porii mediului filtrant. Pe durata acestei faze viteza de filtrare este [95], [120] vezi fig.5.8.

$$v_1 = v_0 e^{-\alpha t} \quad (5.26)$$

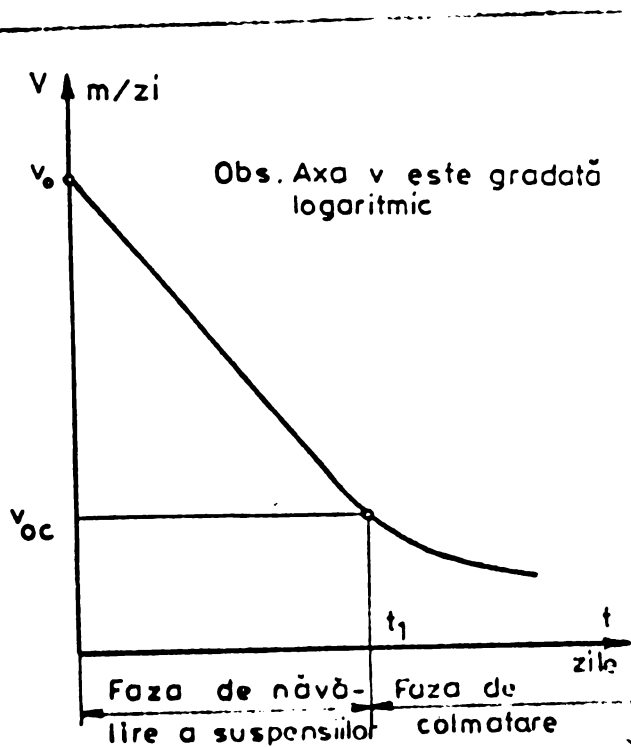


Fig. 5.8 GRAFICUL VARIĂȚIEI VITEZEI DE FILTRARE ÎN FUNCȚIE DE TIMP

unde: v_0 este viteza inițială de filtrare; t - timpul avînd ca valoare maximă la sfîrșitul fazei valoarea t_1 ; α - constantă care se determină experimental în laborator și are dimensiunea de sec^{-1} .

Faza II-e colmatarea. Dacă faza anterioară este avansată prin blocarea porilor, atunci pătrunderea suspensiilor încetează și începe formarea unei membrane superficiale. Porozitatea și permeabilitatea se micșorează, atrăgînd și reducerea debitului infiltrat. În această fază viteza este [120] :

$$v_1 = \frac{v_{0c}}{\sqrt{1 + \alpha_1 t}} \quad (5.27)$$

unde v_{0c} reprezintă viteza de filtrare în momentul începerii fazei de colmatare; α_1 - constanta care se determină de asemenea experimental în laborator și are dimensiunea de sec^{-1} ; t - timpul.

În zona capslului, unde se admite că va apărea colmatarea, relația (5.1) nu mai este aplicabilă. În locul ei se propune:

$$Q_1 = v_1 P \text{ în m}^3/\text{ml} \quad (5.28)$$

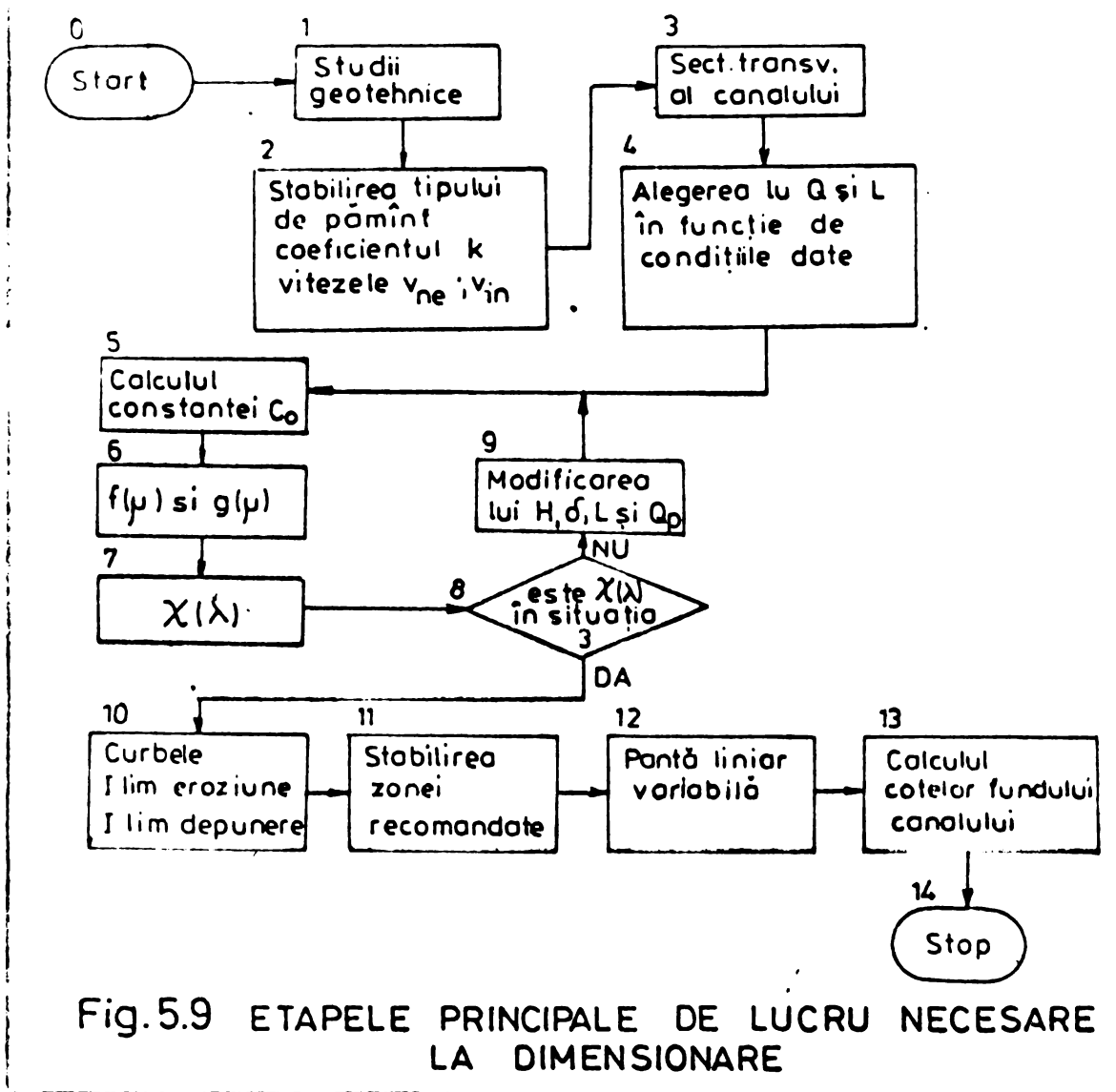
unde P este perimetrul udat, iar restul notațiilor sînt conform cu cele din relațiile (5.1) și (5.26) sau (5.27) după faza în care se află procesul.

Se recomandă ca în exploatare să se intervină la timpul oportun, pentru a nu permite ca procesul să se desfășoare și în faza a II-e, cînd randamentul este foarte neeconomic. Durata fazei I se deduce din (5.26).

$$t_1 = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{v}{v_0} \quad (5.29)$$

Dacă t_1 este mic, ceea ce înseamnă că trebuie intervenit deseori pentru îndepărtarea depunerilor, atunci se va analiza printr-un calcul tehnico-economic dacă nu este mai avantajos să se prevadă un bazin de deznisipare la admiterea apei în canalul de infiltrare.

Ca încheiere a acestui subpunct în figura 5.9. se prezintă succesiunea etapelor principale de lucruri necesare la dimensionarea unui canal de infiltrație pentru îmbogățirea straturilor acvifere [157] .



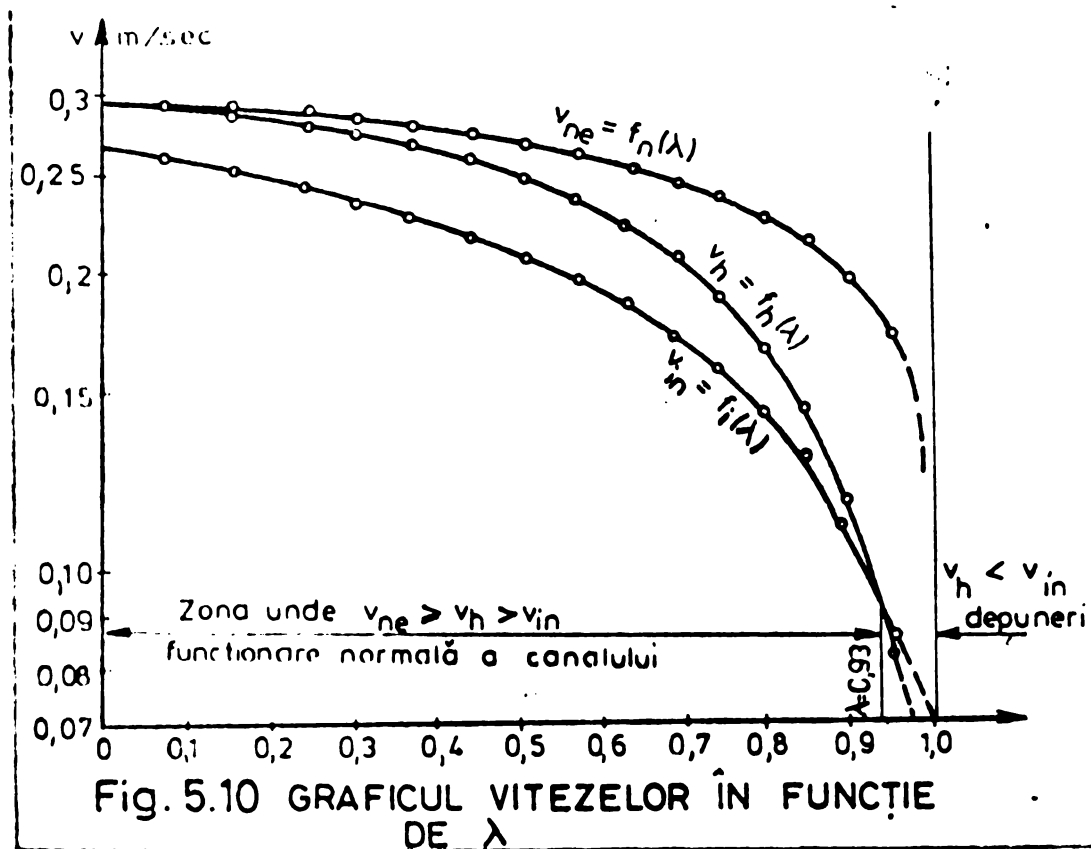
5.2. Exemplificare numerică

Pentru cazul studiat de la 5.1, canal de îmbogățire de $L = 100$ m practicat într-un teren cu nisipuri fine se prezintă în continuare unele aspecte.

Curba $\chi = \chi(\lambda)$ determinată prin iterații și reprezentată grafic în fig.5.5 se află în cazul 3 din fig.5.6 cu

$$\lambda_f = 1.$$

Viteza de neeroziune s-a calculat după formula $v_{ne} = v_{ol} h^{0,2}$ specificată în literatura de specialitate în care: v_{ol} - este viteza critică pentru o adâncime de 1,00 m și are valoarea de 0,32 m/sec pentru nisipul fin. Curba $v_{ne} = f_n(\lambda)$ este reprezentată în fig.5.10.

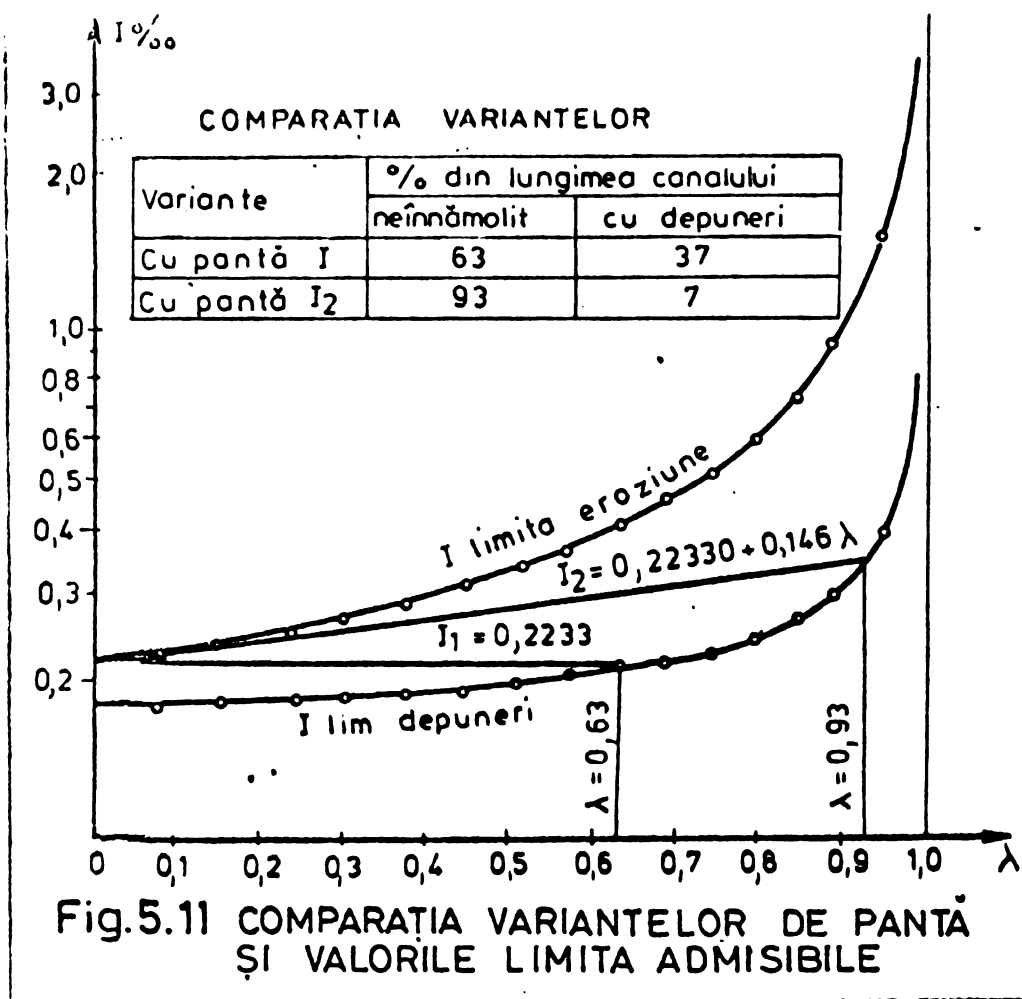


Viteza de înămolire s-a calculat după formula $v_{in} = A Q_h^{0,2}$ unde A este un coeficient și are valoarea 0,33 pentru aluviuni a căror mărime hidraulică este mai mică de λ 1,50 mm/sec. Dar Q_h este o funcție de prin (5.21), deci $v_{in} =$

$$= 0,33 [Q_p f(\chi)]^{0,2} \text{ și se prezintă în fig.5.10.}$$

Valorile limită ale pantei de eroziune respectiv de depunere au fost determinate după (5.25) cu un coeficient de rugozitate $n = 0,025$. Reprezentarea grafică se prezintă în fig.5.11.

Alegându-se o pantă liniar variabilă în domeniul recomandat (fig.5.11) în așa fel ca panta adoptată să fie tangentă la curba I lim eroziune în punctul $\lambda = 0$, rezultă relația $I = 0,2233 + 0,146 \lambda$. Se observă din fig.5.11 că neînămolirea



este îndeplinită pe 0,93 din lungimea canalului, iar pe 7% din lungime la capăt vor apare depuneri în funcționare. În acest caz profilul în lung al canalului are forma unei parabole.

Dacă s-ar fi menținut panta constantă, adică cu profilul longitudinal liniar $I = 0,2233$, atunci neînămolirea era îndeplinită doar pe 0,63 din lungime iar zona depunerilor se manifestă pe o distanță mult mai mare adică pe 37% din lungimea canalului.

Cu formule (5.23) și în ipoteza că panta canalului este liniar variabilă s-a calculat viteza v_h (reprezentată în fig. 5.10). Se observă că valoarea v_h se înscrie în condiția (5.24) de la începutul canalului pînă la $\lambda = 0,93$. De aici începînd pînă la capăt vor apare depuneri, rezultat găsit și reprezentat în fig.5.11.

În continuare s-a calculat debitul infiltrat cu formula (5.19) reprezentată grafic în fig.5.12.

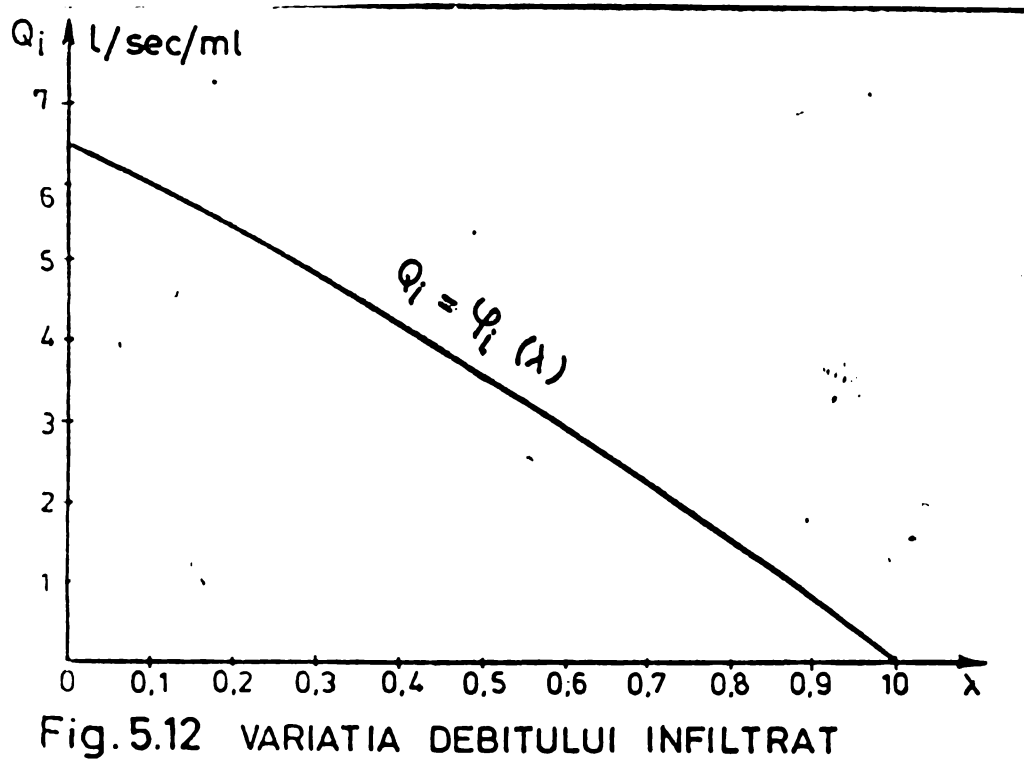


Fig.5.12 VARIATIA DEBITULUI INFILTRAT

5.3. Aproximarea analitică a funcției $\chi(\lambda)$

Așa cum s-a prezentat la 5.1 curba funcției χ este aproximată printr-o linie poligonală, între două abscise vecine variația funcției este liniară. Funcția χ a rezultat sub formă unei tabele în care fiecărui λ_i îi corespunde valoarea χ_i a funcției respective. Dar, în foarte multe cazuri, cercetarea corelației dintre x_i și y_i ne poate conduce la concluzii importante asupra unor trăsături caracteristice ale fenomenului respectiv. În astfel de situații, reprezentarea funcției printr-o formulă ne poate scuti de efectuarea unui mare volum calcule pentru iterații.

Formulele analitice obținute trebuie să satisfacă o serie de condiții: să fie singure, să aibă formă simplă pentru a putea fi aplicate cu ușurință iar structura lor să fie în concordanță cu existența fizică corespunzătoare a fenomenului respectiv.

În practică, construirea formulei analitice comportă următoarele două etape:

- alegerea formei generale a expresiei analitice cu care se aproximează funcția,

- determinarea celei mai bune valori ale parametrilor expresiei alese.

Până în prezent nu se dispune de o regulă generală în baza căreia se alege cea mai potrivită formă a expresiei unei funcții. Alegerea celei mai potrivite forme depinde de experiența și iscusința cercetătorului. De un real folos poate fi reprezentarea grafică a tuturor punctelor, folosind în acest scop sistemul de coordonate cartezian, sau un alt sistem special de coordonate (semilogaritmice, logaritmice etc). După aspectul general al reprezentării grafice din fig.5.5 se propune următoarea formulă :

$$\chi = 1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_f} \right)^\alpha \quad (5.30)$$

Se observă că formula (5.30) prin structură sa satisface valorile marginale și anume

$$\begin{array}{ll} \text{pentru } \lambda = 0 & \text{avem } \chi = 1 \text{ și} \\ \text{pentru } \lambda = \lambda_f & \text{avem } \chi = 0 \end{array}$$

În continuare va trebui determinat valoarea parametrului α . Pentru acesta se folosește principiul lui Legendre ca suma pătratelor diferențelor dintre valorile reale și cele date de formulă să fie minime [194].

Această condiție devine

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \chi_i - \left[1 - \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right)^\alpha \right] \right\}^2 = \min \quad (5.31)$$

sau (5.31) dezvoltat

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \chi_i^2 - 2\chi_i + 2\chi_i \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right)^\alpha + 1 - 2 \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right)^\alpha + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right)^{2\alpha} \right\} \quad (5.32)$$

Pentru aflarea lui α la care (5.32) devine minim se calculează $\frac{\partial \Sigma}{\partial \alpha} = 0$ (5.33)

După efectuarea derivării și gruparea termenilor (5.33) devine

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right)^\alpha \ln \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right) \left[\chi_{i-1} + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_f} \right)^\alpha \right] = 0 \quad (5.34)$$

de unde se poate afla valoarea lui α .

Rezolvarea ecuației (5.34) este dificilă de aceea se va proceda prin încercări dând lui α diferite valori și reprezentând grafic perechile de valori găsite Σ ; α . După câteva încercări se poate afla valoarea lui α pentru care suma (5.54) devine nulă

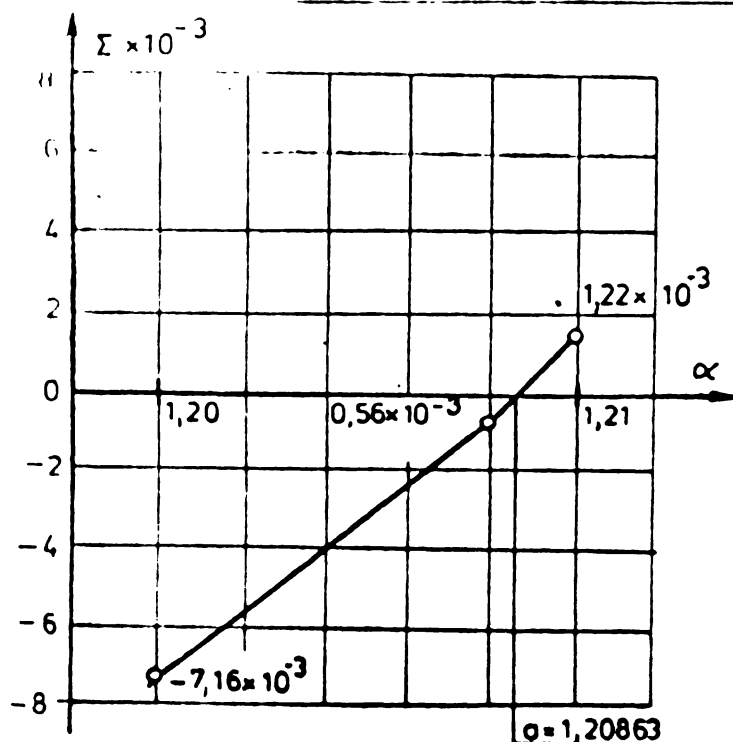
Pentru a delimita plaja de variație a lui α observăm că diagrama din fig.5.5 are concavitatea spre valorile negative ale lui λ , adică derivata a doua este negativă. Această condiție pusă pentru formula (5.30)

$$\chi'' = - \frac{\alpha(\alpha-1)}{\lambda_f^\alpha} \lambda^{\alpha-2} < 0 \quad (5.35)$$

de unde se deduce că $\alpha > 1$ sau $\alpha < 0$

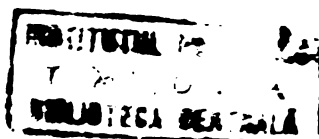
Observație : La rezolvarea ecuației (5.54) sumarea nu se aplică pentru $\lambda_1 = 0,0000$ și $\lambda_1 = 1,0000$ deoarece pentru primul caz termenul de sumat devine $-\infty$ iar în al doilea caz devine 0 ; aceste două valori se pot elimina și pentru motivul că indiferent de α valorile marginale verifică formula (5.30)

Pentru cazul studiat din § 5.1. și §5.2 se prezintă în fig.5.13 determinarea parametrului α .



Se încearcă cu $\alpha = 1,20$ pentru care suma (5.34) este negativă. La o a doua încercare cu $\alpha = 1,21$ suma reziduală își schimbă semnul în plus, înseamnă că α e cuprins între 1,20 și 1,21. La fel prin restrângere se află că α e cuprins între 1,208 și 1,21 datorită alternării semnului sumei (5.34). Prin interpolare se află că $\alpha = 1,20863$.

Fig. 5.13 DETERMINAREA PARAMETRULUI α



5.4. Modelul mișcării potențiale

Considerând că mișcarea în domeniul situat în zona limitrofă a canalului de infiltrație se datorește unor surse distribuite continuu plasate pe axa longitudinală a acestui canal se poate construi spectrul liniilor echipotențiale și a celor de curenți.

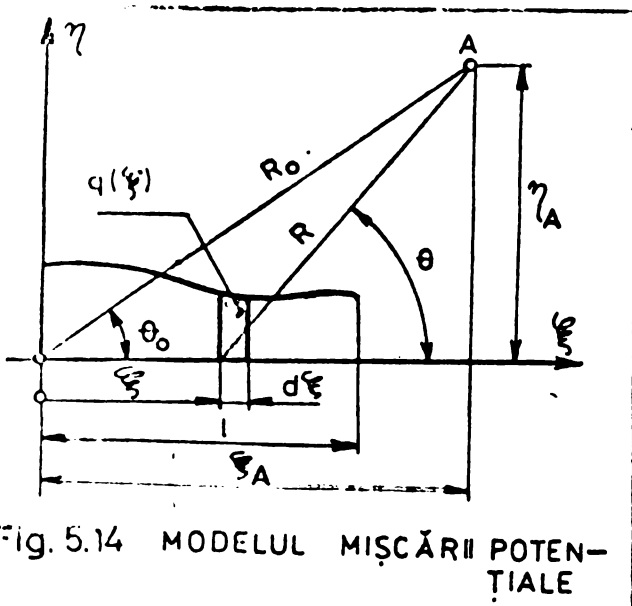


Fig. 5.14 MODELUL MIȘCĂRII POTENȚIALE

Înlocuind variabilele adimensionale ξ, η, l , în punctul $A (\xi_A, \eta_A)$, o sursă situată la abscisă ξ de origine și de intensitate $q(\xi)d\xi$, va produce potențialul

$$\psi = - \frac{q(\xi)d\xi}{2\pi} \ln R \quad (5.36)$$

unde

$$R = [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2]^{1/2}$$

(5.37)

Întregul șir de surse (izvoare) situat de la origine pînă la abscisă l , va produce în punctul A potențialul

$$\psi_A = \frac{-1}{2\pi} \int_0^l q(\xi) \times \ln [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2]^{1/2} d\xi \quad (5.38)$$

sau

$$\psi_A = \frac{-1}{4\pi} \int_0^l q(\xi) \times \ln [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2] d\xi \quad (5.39)$$

De asemenea în punctul A , datorită sursei în punctul de abscisă se poate scrie că funcția de curenți este

$$\psi = \frac{q(\xi)d\xi}{2\pi} \quad (5.40)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\eta_A}{\xi_A - \xi} \quad (\text{radiani}) \quad (5.41)$$

Pentru întregul șir de surse (izvoare) se poate scrie că funcția de curenți pentru punctul A este

$$\psi_A = \frac{1}{2\pi} \int_0^l q(\xi) \operatorname{arctg} \frac{\eta_A}{\xi_A - \xi} d\xi \quad (5.42)$$

Viteze în punctul A produsă de surse din punctul

$$v = \frac{q(\xi) d\xi}{2\pi R} \quad (5.43)$$

avînd componentele

$$v_x = \frac{q(\xi) \cos\theta}{2\pi R} d\xi \text{ și } v_y = \frac{q(\xi) \sin\theta}{2\pi R} d\xi \quad (5.44)$$

unde

$$\cos\theta = (\xi_A - \xi) [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2]^{-1/2} \quad (5.45)$$

$$\sin\theta = \eta_A [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2]^{-1/2} \quad (5.46)$$

Sîrul întreg de surse va avea componentele vitezei în punctul A

$$v_{\xi_A} = \frac{1}{2\pi} \int_0^l q(\xi) (\xi_A - \xi) [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2]^{-1/2} d\xi \quad (5.47)$$

$$v_{\eta_A} = \frac{1}{2\pi} \int_0^l q(\xi) \eta_A [(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2]^{-1/2} d\xi \quad (5.48)$$

Iar modulul și direcția vitezei definite prin

$$|v_A| = \sqrt{v_{\xi_A}^2 + v_{\eta_A}^2} \quad (5.49)$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_{\eta_A}}{v_{\xi_A}} \quad (5.50)$$

unde α este unghiul dintre direcția pozitivă a axei Ox și vectorul vitezei v_A măsurat în sens antiorar.

Funcția după care variază distribuția intensității surselor $q(\xi)$ este după ce a precizată la § 5.1 și anume după formula (5.19)

$$q(\xi) = k H \delta\chi(\xi) \quad (5.51)$$

sau în baza notațiilor (5.8) se poate scrie

$$q(\xi) = \frac{C Q P}{L} \chi(\xi) \quad (5.52)$$

Cu notația $C_1 = \frac{C_{0Qp}}{L}$ (5.53)

și care are dimensiune de $m^3/sec/m$

avem $q(\xi) = C_1 \chi(\xi)$ (5.54)

iar în baza celor precizate la § 5.1 funcția $\chi = \chi(\xi)$ se poate calcula pentru un canal oarecare cu datele inițiale cunoscute.

Observăm că $q(\xi)$ depinde de variabila adimensională ξ definită prin relația (5.7) iar dimensional valoarea $q(\xi)$ se măsoară în $m^3/sec/m$ adică în dimensiunea lui C_1

Introducând notațiile:

$$I_1 = \int_0^l \left[1 - \left(\frac{\xi}{l} \right)^a \right] \ln \left[(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2 \right] d\xi \quad (5.55)$$

$$I_2 = \int_0^l \left[1 - \left(\frac{\xi}{l} \right)^a \right] \operatorname{arctg} \frac{\eta_A}{\xi_A - \xi} d\xi \quad (5.56)$$

$$I_3 = \int_0^l \left[1 - \left(\frac{\xi}{l} \right)^a \right] (\xi_A - \xi) \left[(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2 \right]^{-1/2} d\xi \quad (5.57)$$

$$I_4 = \int_0^l \left[1 - \left(\frac{\xi}{l} \right)^a \right] \eta_A \left[(\xi_A - \xi)^2 + \eta_A^2 \right]^{-1/2} d\xi \quad (5.58)$$

potențialul, funcția de curent și componentele vitezei au expresia

$$\varphi_A = \frac{-C_1}{4\pi} I_1, \quad \psi_A = \frac{C_1}{2\pi} I_2, \quad v_{\xi A} = \frac{C_1}{2\pi} I_3, \quad v_{\eta A} = \frac{C_1}{2\pi} I_4 \quad (5.59) - 5.62)$$

Determinarea valorii integralelor $I_1 - I_4$ nu poate fi efectuată prin aplicarea unor relații explicite. În această situație în care calculul integralei nu poate fi efectuat direct, se apelează la metode numerice.

Pentru evaluarea integralelor de mai sus s-a folosit metoda Legendre-Gauss. Această metodă constă în evaluarea integralei

$$\int_a^b f(x) dx \quad (5.63)$$

printr-o schimbare de variabilă

$$x = \frac{b+a}{2} + \frac{b-a}{2} u \quad (5.64)$$

astfel (5.63) devine

$$\frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 f\left(\frac{b+a}{2} + \frac{b-a}{2} u\right) du \quad (5.65)$$

Aplicând formula cvadraturii lui Gauss ultima integrală devine

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{2} \sum_{i=1}^n A_i f(x_i) \quad (5.66)$$

unde x_i sînt rădăcinile polinomului Legendre de gradul n , iar A_i ponderile, valori ce se găsesc intabulate în manuale [17] [31]. Autorul acestei teze a elaborat programul IFGA prin care se calculează cu tehnica modernă valorile φ , ψ , v_x , v_y , θ și v folosind metoda Gauss-Legendre cu 8 puncte (vezi Anexa 3), iar în Anexa 4 se prezintă rețeaua liniilor echipotențiale și de curent obținut pentru cazul canalului studiat de la § 5.1 și § 5.2.

5.5. Concluzii parțiale

Debitul exfiltrat în subteran și viteza medie de curgere a apei în canal variază de-a lungul canalului după funcțiile precizate în prezenta lucrare.

În decursul exploatării unui canal destinat îmbogățirii artificiale a straturilor acvifere pot apărea aspectele semnalate.

Pentru ca procesul de îmbogățire să se desfășoare optim din punct de vedere tehnico-economic și pentru înlăturarea dezavantajelor în funcționare se recomandă:

- Să se aleagă în așa fel constante de infiltrare a canalului încît funcția după care variază debitul infiltrat să fie în situația 3 din fig.5.6; aceasta se obține prin modificarea corespunzătoare a parametrilor din relația de definire a constantei de infiltrare;

- Situațiile 2 și 4 din figura 5,6 trebuie evitate, ne fiind optime din punct de vedere funcțional și nici ca aspect economic;

- Viteza medie de curgere a apei în canal trebuie să fie mai mică decât viteza de neeroziune și mai mare decât viteza de înămolire; pentru a respecta această condiție panta fundului canalului nu este constantă și se propune o variație a pantei; practic această variație trebuie să fie liniară;

În profil longitudinal, parabola care definește cotele fundului canalului să fie cât mai alungită;

Panta infinită la capătul canalului, după cum e rezultat din această lucrare, este tehnic imposibilă, pentru care motiv se admite că pe o porțiune de 5-10% din lungimea redusă a canalului la capăt condiția de neînămolire să nu fie respectată; numai pe această porțiune vor apare depuneri în timpul funcționării.

Valoric viteza apei în canal să nu coboare sub 0,3 m/sec.

Contribuția autorului la studiul exfiltrăției din canale se referă la :

- găsirea funcției $\chi(\lambda)$ și a expresiei analitice a acesteia,
- discuția celor cinci cazuri de îmbogățire, funcționare a unui canal de îmbogățire,
- recomandarea pantei liniar variabile
- modelul mișcării potențiale
- elaborarea programului IFGA.

C A P I T O L U L VI

CONTRIBUTII LA STUDIUL ANALOGIC AL INFILTRATIEI DIN CANALE DN STRATURI ACVIFERE ALIMENTATE TEHNIC

6.1. Generalități

Așa cum s-a menționat la § 2.6 o a doua modalitate de a soluționa problemele mișcării apei prin medii poroase este analogia. Analogia se bazează pe legăturile care există între mărimile fizice. Mărimile care intervin în desfășurarea unui fenomen satisfac relații matematice care defi-

nesc modelul matematic. Totalitatea fenomenelor caracterizate de același model matematic alcătuiesc o clasă de fenomene. Dacă fenomenele unei clase aparțin aceluiași domeniu al fizicii, fenomenele sînt similare, iar dacă ele fac parte din domenii diferite sînt fenomene analoge. În cele ce urmează se analizează posibilitatea soluționării problemelor mișcării apei prin medii poroase folosind modelele similare sau cele analogice.

6.2. Modelele similare

Acestea sînt alcătuite dintr-un mediu permeabil care reprezintă la scară redusă domeniul de cercetat în condiții de limită asemenea cu fenomenul din natură, denumit în cele ce urmează model hidraulic.

Chiar dacă în aparență metoda modelului hidraulic pare foarte simplă totuși la utilizarea ei apar complicații de ordin practic. Astfel Trofin E. [198] atenționează asupra modificării în timp a coeficientului de permeabilitate de pe model sub influența diferenței de temperatură a apei și a mediului solid, a degajării bulelor de aer în interiorul modelului, a tasării modelului, colmatării etc. O parte din aer se poate degaja la suprafața modelului reducînd permeabilitatea în timp.

Fenomenul poate fi și invers, o apă lipsită de aer poate dizolva o parte din aerul aflat în mediul poros, rezultînd în felul acesta o creștere temporară a permeabilității.

La folosirea modelării similare Mateescu Cr. [127] atenționează asupra unei dificultăți și spune că mărimile proporționale cu k (viteze, debite, etc.) se obțin cu aproximație grosolană, dat fiind că este imposibil de a modela permeabilitatea, mărime extrem de variabilă în natură. În lucrarea [130] se arată că nu se poate asigura similitudinea dintre terenul natural și materialul folosit la modelare, deoarece egalitatea diametrelor granulelor dintre model și teren nu asigură și îndeplinirea concomitentă a condiției de egalitate a coeficienților de permeabilitate. Tot în [130] se arată că deoarece diferențele de presiuni la model în general sînt de ordinul de cm sau dm, iar la procesele din natură de ordinul metrilor, folosind același tip de teren, se ajunge la concluzia că nu există nici o

asemănare între model și natură.

Datorită dificultăților și a contradicțiilor seamănate, cercetătorii au abandonat soluționările bazate pe modele similare și au dezvoltat cele analogice.

Autorul prezentei teze critică folosirea modelelor similare și s-a orientat la folosirea analogiei pentru studierea infiltrației din canale în straturi scvifere alimentate tehnic.

6.3. Modele analogice

În completarea celor prezentate la § 2.6 se menționează că modelele analogice utilizate în mod curent în hidraulica subterană se pot clasifica pe baza fluxului care străbate mediul analogic [87] în modele cu flux hidraulic, termic, magnetic și electric.

Modelele cu flux hidraulic denumite și analizori de rețele hidraulice se bazează pe teoria rețelelor electrice. În locul rezistențelor electrice aici există rețele hidraulice liniare fie neliniare.

În cazul particular al unei mișcări unidimensionale, modelul în literatură de specialitate este cunoscut sub denumirea de integrator hidraulic Lukianov [87]. Cu ajutorul integratorului hidraulic, Kaltagova M.G și Korenev V.M au determinat pierderile de apă prin infiltrație din canale [96].

Cu toate că principiul de funcționare al analizorilor hidraulici este destul de simplă totuși construcția și în cele din urmă exploatarea acestora provoacă unele dificultăți, de exemplu executarea unui număr mare de elemente hidraulice care să prezinte proprietăți identice este destul de greoie.

Un tip special de model cu flux hidraulic este și modelul analogic Darcy-Poiseuille (analogia Hele-Shaw) care folosește curgerea unui fluid viscos într-un strat foarte subțire între două plăci paralele [127], [87], [88], [107].

La modelele cu flux termic se poate afirma că deși realizarea lor este relativ simplă, sînt foarte puțin utilizate din cauza complexității și dificultății măsurărilor termice.

Și modelele cu flux magnetic prezintă dificultăți mari în procesul de măsurare a cîmpului magnetic. O altă dificultate este aceea că se pot realiza un grup restrîns de condiții de margine. Din aceste cauze acest tip de model are un cîmp redus de aplicație în hidraulica subterană, fiind utilizat mai des în aerodinamică.

Modelele cu flux electric constituie tipul cel mai larg utilizat în hidraulica subterană. Se pot subdiviza în principal pe două tipuri: modele cu mediu conductor continuu și modele în rețea.

Din prima categorie fac parte analogiile bazate pe curgerea curentului electric printr-un domeniu bun conducător de electricitate (analogia electro-hidrodinamică Pavlovski). Ca și medii continue se folosesc cuvele electrolitice sau hîrtia electroconductoare.

Modelele electrice din a doua categorie înlocuiesc mediul conductor continuu într-o mulțime de celule conductoare cu caracteristici proprii. Din această categorie fac parte rețelele din rezistențe electrice, rețele din rezistențe și capacități electrice, precum și analizoarele cu rețele din rezistențe capacități și inductanțe.

Departate de a fi cristalizat tipul de analogie electrică este în permanență în curs de perfecționare.

6.4. Modelarea prin analogia cu încovoiera plăcilor plane subțiri

Plăcile plane subțiri sînt considerate construcțiile definite printr-o suprafață mediană plană avînd grosime mică în raport cu dimensiunile suprafeței (sub 1/10 din dimensiunea minimă în planul median). Deformațiile sînt mici, prin deformare, dreptele perpendiculare pe suprafața mediană înainte de deformare rămîn drepte perpendiculare pe suprafața mediană și după deformare. Se definește modulul de rigiditate cilindrică la încovoiere a plăcii valoarea :

$$D = \frac{E \delta^3}{12(1-\mu^2)} \quad [daNm] \quad (6.1)$$

unde: E este modulul de elasticitate,

δ - grosimea plăcii,

μ - coeficientul lui Poisson, și introducând invari-
tul momentelor încovoietoare cu dimensiunea $[daNm/m] = [daN]$

$$M = \frac{M_x + M_y}{1 + \mu} \quad (6.2)$$

rezultă următoarele relații diferențiale de tip Poisson

$$\Delta \omega = - \frac{M}{D} \quad [1/m] \quad (6.3)$$

$$\Delta M = - p \quad [daN/m^2] \quad (6.4)$$

sau și mai concentrat

$$\Delta \Delta \omega = \frac{p}{D} \quad [1/m^3] \quad (6.5)$$

în care: ω este săgeata plăcii, $p = p(x,y)$ încărcarea plăcii și Δ este operatorul Laplace.

Analogia matematică între formulele (6.3), (6.4) și (3.27) pune în evidență identitatea formală a ecuațiilor de tip Poisson între mărimile fizice ale fenomenului hidraulic cu cele ale fenomenului elastic. În cele ce urmează se propune studierea analogiei fenomenului mișcării apei în medii poroase cu încovoierea plăcilor plane subțiri. Corespondența între mărimile fizice ale fenomenului elastic cu cele ale fenomenului din hidraulica subterană se prezintă în tabelul 6.1.

Pentru a putea modela analogic cele două fenomene trebuie respectate unele principii teoretice care pot fi sintetizate în următoarele:

1. Modelul analogic trebuie să fie similitudine geometric cu modelul din natură.

2. Caracteristicile fizice ale modelului analogic trebuie să fie proporționale cu caracteristicile fizice ale domeniului natural.

3. Condițiile de margine, pe modelul analogic trebuie să fie similare cu condițiile de margine din domeniul de definiție a funcției de cercetat, respectiv a ecuației pe care o verifică această funcție.

Tabelul 6.1

Natură		Model	
Mișcarea apei subterane		Încovoierea plăcii plane subțiri	
Ecuația Poisson(Laplace)		Formulele (6.3) și (6.4)	
Simbol	Mărimea	Simbol	Mărimea
=====		=====	
x , y	Coordonate	x, y	Coordonate
H	Potențial hidraulic	M	Invariantul momentelor
T	Transmisivitatea	D	Rigiditatea cilindrică
q	Debit distribuit	p	Încărcarea distribuită
Q	Componentele vitezei	$\frac{\partial M}{\partial x}$, $\frac{\partial M}{\partial y}$	Derivatele invariantului momentelor

Îndeplinind aceste reguli, valorile funcției căutate se obțin prin măsurători într-o mulțime de puncte pe modelul analogic.

Din cele expuse, rezultă posibilitatea modelării fenomenelor din domeniul hidraulicii subterane, analog cu încovoierea plăcilor plane subțiri. În ambele domenii problemele sînt guvernate de ecuații cu derivate parțiale cu condiții de frontieră date. Elaboratorul prezentei teze consideră că analogia semnalată mai sus nu a fost utilizată vreodată pe tărîm național sau chiar de specialiștii din alte țări; deoarece nu a fost semnalată pînă în prezent în literatura de specialitate [158]. Introducerea și utilizarea ei este o propunere a elaboratorului și care se expune în cele ce urmează.

6.5. Tipurile de analogii posibile

Ecuațiile (6.3) și (6.4) scot în evidență două tipuri de analogii [158].

Analogia de tip 1 care constă în măsurarea săgeților w în diverse puncte ale unei plăci plane subțiri încărcate cu invariantul momentelor împărțit la rigiditatea cilindrică, respectînd condițiile de margine.

Analogia de tip 2 constă în măsurarea invariantului momentelor în diverse puncte ale plăcii încărcate cu sarcina p distribuită pe unitatea de suprafață, având condițiile de margine satisfăcute.

Luată separat nici una dintre analogiile 1 sau 2 nu este aplicabilă practic din cauza unor dificultăți. Astfel în analogia de tip 1 deși există tehnici foarte perfecționate de măsurare a săgeților, este aproape imposibil de a realiza încărcarea cu momente înainte cunoscute în diverse puncte. În analogia de tip 2 se pot realiza încărcări p distribuite, dar nu se pot măsura momentele. Eliminarea acestor dificultăți conduce la o schemă de analogie indirectă.

Se folosește relația cu derivate parțiale (6.5) și anume se încarcă placa cu sarcinile distribuite sau concentrate dinainte cunoscute și se măsoară în diverse puncte mărimea săgeților. Cunoscând săgețile și aplicând operatorul Laplace în punctele cu săgețile cunoscute, din relația (6.3) putem afla valoarea invariantului momentelor M în punctele respective. Prin unirea punctelor de aceeași valoare M se obțin liniile echipotențiale.

6.6. Condițiile de margine și corespondența lor cu modelul analog.

Margine încastrată, săgeata de-a lungul acestei margini este egală cu zero, iar planul tangent la suprafața deformată a plăcii de-a lungul acestei rezemări va coincide cu poziția inițială a planului median. Luând ca axe de coordonate tangente la contur s și normale n , rezultă

$$(w)_s = 0 \quad \text{și} \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (6.6)$$

În diferențe finite de-a lungul marginii condițiile (6.6) devin (vezi fig.6.1)

$$w_{i,j} = 0$$

$$w_{i+1,j} = w_{i-1,j}$$

unde $j = 0, 1, 2, \dots$

$$(6.7) \quad \text{și} \quad (6.7')$$

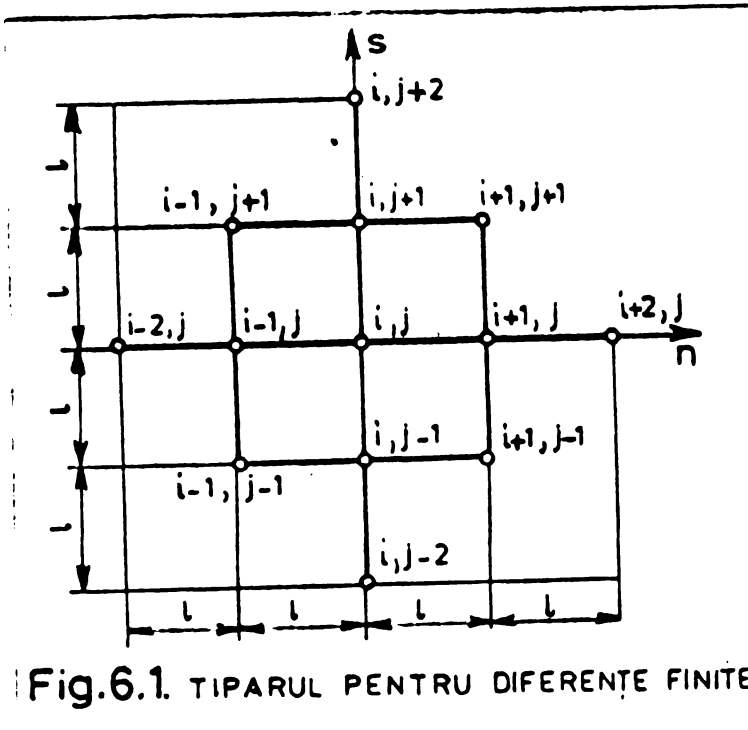


Fig.6.1. TIPARUL PENTRU DIFERENȚE FINITE

Folosind ec.(6.3) se va căuta valoarea M/ds . Deoarece ordinea de derivare este indiferentă se poate scrie:

$$\frac{\partial^3 \omega}{\partial s \partial n^2} + \frac{\partial^3 \omega}{\partial s^3} = - \frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial s} \quad (6.8)$$

Partea stângă din (6.8) în diferențe finite utilizând relațiile cunoscute pentru derivate parțiale și tiparul cu notațiile din fig.6.1 este

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 \omega}{\partial s \partial n^2} = \frac{1}{2l^3} & \left[(\omega_{i-1,j+1} - 2\omega_{i,j+1} + \omega_{i+1,j+1}) - \right. \\ & \left. - (\omega_{i-1,j-1} - 2\omega_{i,j-1} + \omega_{i+1,j-1}) \right] \quad (6.9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 \omega}{\partial s^3} = \frac{1}{2h^3} & \left[(\omega_{i,j+2} - 2\omega_{i,j+1} + \omega_{i,j}) - \right. \\ & \left. - (\omega_{i,j} - 2\omega_{i,j-1} + \omega_{i,j-2}) \right] \quad (6.10) \end{aligned}$$

și care din cauza condițiilor (6.7) sînt egale cu zero, deci și $\partial M / \partial s = 0$. De asemenea de-a lungul marginii încastrate invariantul M este totdeauna diferit de zero. Condiției $M \neq 0$ corespunde o sarcină piezometrică H , iar la condiția $\partial M / \partial s = 0$ corespunde situația că viteza este dirijată pe normala frontierei (componenta tangențială a vitezei $\partial H / \partial s = 0$), adică marginea încastrată modelează analog o frontieră de alimentare.

Margine liberă, de-a lungul ei nu vor fi momente încovoitoare, nici momente de răsucire și nici forțe tăietoare verticale

$$M_n = 0, \quad M_{ns} = 0, \quad Q_n = 0 \quad (6.11)$$

Sub această formă condițiile de margine au fost studiate de către Poisson. Mai târziu Kirchhoff a arătat că sînt suficiente numai două dintre cele trei condiții pentru determinarea săgeților .

Correspondența condițiilor de margine Tabelul 6.2

Natură	Model
Mișcarea apei subterane	Incovoierea plăcii plane subțiri
<u>Frontieră de alimentare</u> Cota piezometrică H impusă și $\frac{\partial H}{\partial s} = 0$, Componenta vitezei pe direcția frontierei $v_s = 0$	<u>Margine incastrată</u> Invariantul momentelor $M \neq 0$ și $\frac{\partial M}{\partial s} = 0$
<u>Frontieră impermeabilă</u> Viteza are direcția tangentei la frontieră $\frac{\partial H}{\partial n} = 0$	<u>Margine liberă</u> $\frac{\partial M}{\partial n} = 0$

Prima condiție din (6.11) devine

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial s^2} = 0 \quad (6.12)$$

și a doua după Kirchhoff este

$$-D \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial s^2} \right) = 0 \quad (6.13)$$

În continuare se va căuta valoarea $\frac{\partial M}{\partial n}$. Se precizează că invariantul momentelor în sistemul de coordonate s, n este $M = M_n + M_s$. Din (6.3) se obține că

$$\frac{\partial M}{\partial n} = -D \cdot \frac{\partial}{\partial n} (\Delta \omega) = -D \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial n^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial s^2} \right)$$

iar conform (6.13) acesta este zero. Valoarea $\partial H / \partial n = 0$ corespunde la $\partial H / \partial n = 0$ sau componenta vitezei după normală este zero, adică frontiera este o linie de curent deci o frontieră impermeabilă.

Correspondența condițiilor de margine se rezumază în tabelul 6.2.

6.7. Considerații de analiză dimensională și de analogie

Deoarece ecuația fenomenului analog cu mișcarea subterană are alte mărimi fizice, la interpretarea rezultatelor obținute pe modelul analog și trecerea la fenomenul din natură vor interveni anumite aspecte de analiză dimensională și de analogie. Legile similitudinii se aplică sub aceeași formă și în analogie, ca și la fenomene similare.

În cele ce urmează vom nota cu indicele "n" mărimile pentru fenomenul din natură și cu indicele "s" mărimile pentru fenomenul din modelul analog.

Pentru realizarea analogiei prezentate în acest capitol, se vor respecta următoarele:

- Similitudinea geometrică, modelul analog va reproduce la o scară notată cu α_l domeniul și contururile din natură

$$\alpha_l = \frac{l_n}{l_s} = \frac{x_n}{x_s} = \frac{y_n}{y_s} \quad (6.14)$$

- Similitudinea condițiilor de margine a fost prezentată la § 6.6 și în tabelul 6.2.

- Similitudinea fizică. Identitatea ecuațiilor (3.27) și respectiv (6.3) și (6.4) este evidentă și a fost prezentată la § 6.4. Pe lângă acestea se fac precizările de mai jos

Pentru cazul 1 când nu există surse interioare ecuația (3.26) corespunde ecuației lui Laplace, iar pentru fenomenul analog (6.4) este

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x_s^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y_s^2} = 0 \quad (6.15)$$

Pe lângă scara α_l mai definim și scara α_M și știind că M_a are dimensiunea de $[daN]$ (vezi rel. (6.2))

$$\alpha_M = \frac{H}{M_a} \left[\frac{m}{daN} \right] \quad (6.16)$$

Inlocuind în (6.16) mărimile x_a, y_a și ω_a pentru modelul analog și ținând cont de scările definite prin (6.14) și (6.16) obținem

$$\frac{\alpha_l^2}{\alpha_M} \frac{\partial^2 H}{\partial x_a^2} + \frac{\alpha_l^2}{\alpha_M} \frac{\partial^2 H}{\partial y_a^2} = 0 \quad (6.17)$$

Că ec.(6.17) să fie identică cu (3.26) va trebui ca

$$\frac{\alpha_l^2}{\alpha_M} \neq 0 \left[\frac{daN}{m} \right] \quad (6.18)$$

sau $\alpha_l \neq 0$ și $\alpha_M \neq 0$ (6.19)

condiții care se pot realiza totdeauna.

Se observă că valoarea lui (6.18) poate lua orice valori (afară de zero) în funcție de condițiile alese ale încercării, deci (6.18) nu are totdeauna valoarea 1. Aceasta înseamnă că nu există un număr sau criteriu de similitudine. Astfel de sisteme la care lipsesc criteriile de similitudine se numesc analogii automodelatoare. În [190] se semnalează că fenomenele fizice ale câmpurilor care satisfac ecuația lui Laplace sînt automodelatoare. Rezultă deci că scara α_M se poate lua arbitrar, singura condiție este similitudinea geometrică a domeniului din natura nu cel al modelului analog.

Folosind ec.(6.13) pentru modelul analog și în baza lui (6.16)

$$\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_a^2} + \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial y_a^2} = -\frac{M_a}{D_a} = -\frac{H}{\alpha_M D_a} \quad (6.20)$$

$$H_n = -D_a \alpha_M \left(\frac{\partial^2 \omega_a}{\partial x_a^2} + \frac{\partial^2 \omega_a}{\partial y_a^2} \right) \quad (6.20')$$

avînd dimensiunea de $[m] = [daNm] \times \frac{m}{daN} \times \frac{1}{m}$

În baza scării (6.14) putem scrie că (6.20')

$$H_n = -D_s \alpha_M \alpha_l^2 \left(\frac{\partial^2 w_s}{\partial x_n^2} + \frac{\partial^2 w_s}{\partial y_n^2} \right) \quad (6.21)$$

Săgeata într-un punct al plăcii se poate deduce cu ajutorul unui transductor inductiv, care transformă deformația într-o mărime electrică. Această mărime se citește cu ajutorul unei punți tensometrice ca aparat de măsură. Dacă notăm

$$C_{ap} = \text{constanța aparatului cu } \frac{m\mu}{\text{diviziune}} \quad \text{sau } \frac{m}{\text{diviz}}$$

$C_{ini\bar{t}}$ = Citirea inițială de referință cu placă nedeformată

C_{final} = idem în situația deformată

$C_m = C_{final} - C_{ini\bar{t}}$, atunci

$$w_s = C_m \times C_{ap} \quad (6.22)$$

Cu acestea (6.21) se poate exprima în diferențe finite într-o rețea cu pasul l (din situația în natură)

$$H_{no} = - \frac{D_s \alpha_M \alpha_l^2 C_{ap}}{l^2} (C_{m1} + C_{m2} + C_{m3} + C_{m4} - 4C_{m0}) \quad (6.23)$$

unde paranteza este alcătuită după tiparul din fig.6.1 și are dimensiune de [diviziune] fiind leplecianul exprimat în diferențe finite.

$$\text{Expresia } C_1 = \frac{D_s \alpha_M \alpha_l^2 C_{ap}}{l^2} \quad (6.24)$$

se va denumi constanta modelării și are dimensiunea

$$d_s N_m \times \frac{m}{daN} \times \frac{1}{m^2} \times \frac{m}{\text{diviz}} = \frac{m}{\text{diviz}}$$

Atunci (6.23) devine

$$H_{no} = -C_1 (C_{m1} + C_{m2} + C_{m3} + C_{m4} - C_{m0}) \quad (6.25)$$

formula cu care se pot calcula valorile înălțimii piezometrice în nodurile interioare ale rețelei.

Pentru cazul II când există surse interioare ecuația

$$\frac{\partial^2 H_n}{\partial x_n^2} + \frac{\partial^2 H_n}{\partial y_n^2} = - \frac{q_n}{T_n} \quad (6.26)$$

corespunde pentru fenomenul analog cu

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x_s^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y_s^2} = - p_s \quad (6.27)$$

Pe lângă scările α_l și α_H se mai introduce și scara încărcărilor

$$\alpha_p = \frac{q_n}{T_n} \cdot \frac{l}{p_s} \quad \text{în} \quad \left[\frac{m^3}{\text{sec} \cdot m^2} \cdot \frac{\text{sec}}{m^2} \cdot \frac{m^2}{\text{daN}} \right] = \left[\frac{m}{\text{daN}} \right] \quad (6.28)$$

acesta este valabil pentru debit, respectiv încărcare distribuită pe unitatea de suprafață.

Pentru debit Q_n , respectiv încărcare concentrată punctual P_s :

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \frac{Q_n}{S_n} \cdot \frac{l}{T_n} \times \left(1 : \frac{P_s}{S_s} \right) = \frac{Q_n}{T_n} \cdot \frac{l}{P_s} \cdot \frac{S_s}{S_n} = \\ &= \frac{Q_n}{T_n} \cdot \frac{l}{P_s} \cdot \frac{l}{\alpha_l} \quad \left[\frac{m}{\text{daN}} \right] \quad (6.29) \end{aligned}$$

unde S_n respectiv S_s sînt niște suprafețe pe care se repartizează de fapt debitul, respectiv încărcarea concentrată, suprafețe care la limită tind spre zero.

Pentru un debit q_l , respectiv o încărcare distribuită pe unitatea de lungime p_l :

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \frac{q_l}{l_n} \cdot \frac{l}{T_n} \times \left(1 : \frac{p_l}{l_s} \right) = \frac{q_l}{T_n} \cdot \frac{l}{p_l} \cdot \frac{l_s}{l_n} = \\ &= \frac{q_l}{T_n} \cdot \frac{l}{p_l} \cdot \frac{l}{\alpha_l} \quad \left[\frac{m}{\text{daN}} \right] \quad (6.30) \end{aligned}$$

Inlocuind în (6.27) mărimile x_n , y_n , M_n și p_n pe baza scării definite se obține pentru încărcare distribuită pe unitatea de suprafață

$$\frac{\alpha_l^2}{\alpha_M} \frac{\partial^2 H_n}{\partial x_n^2} + \frac{\alpha_l^2}{\alpha_M} \frac{\partial^2 H_n}{\partial y_n^2} = - \frac{1}{\alpha_p} \frac{q_n}{T_n} \quad (6.31)$$

Ca aceasta să fie identică cu ecuația (6.26) va trebui ca să existe relația criterială

$$\frac{\alpha_l^2}{\alpha_M} \alpha_p = 1 \quad (6.32)$$

sau modelarea analogă a plăcii va trebui să respecte numărul N_{rp} definit din (6.32)

$$N_{rp} = \frac{x_n^2 q_n}{H_n T_n} = \frac{x_p^2 p_n}{M_n} \quad (6.33)$$

Folosind raționamentul folosit la identificarea ec. (6.31) cu (6.26) și pentru încărcarea (respectiv debit concentrat) sau încărcarea (respectiv debit) liniar distribuit, se obține de asemenea ecuația criterială (6.32). Dar în schimb numărul N_{rp} are expresia

- pentru încărcarea (debit) concentrat

$$N_{rp} = \frac{Q_n}{H_n T_n} = \frac{P}{M_n} \quad (6.34)$$

- pentru încărcarea (debit) liniar distribuit

$$N_{rp} = \frac{x_n q_l}{H_n T_n} = \frac{x_p p_l}{M_n} \quad (6.35)$$

Din (6.32) și (6.16) se obține

$$M_n = \frac{H_n}{\alpha_l^2 \alpha_p} \quad (6.36)$$

Folosind ecuația (6.3) pentru modelul analog

$$\frac{\partial^2 w_n}{\partial x_n^2} + \frac{\partial^2 w_n}{\partial y_n^2} = - \frac{H_n}{\alpha_l^2 \alpha_p} \frac{1}{D_n} \quad (6.37)$$

și în baza scării (6.14) se obține

$$H_n = -D_a \alpha_l^4 \alpha_p \left(\frac{\partial^2 w_a}{\partial x_n^2} + \frac{\partial^2 w_a}{\partial y_n^2} \right) \quad (6.38)$$

Procedînd la fel ca și la cazul anterior expus cînd nu există surse interioare se poate scrie:

$$H_n = -C_2 (C_{a1} + C_{a2} + C_{a3} + C_{a4} - 4C_{a0}) \quad (6.39)$$

unde constanta modelării C_2 este

$$C_2 = \frac{1}{l^2} (D_a \alpha_l^4 \alpha_p Cap) \quad (6.40)$$

și se poate observa că în baza ecuației criteriale (6.32) se poate scrie egalitatea

$$C_1 = C_2 \quad (6.41)$$

Rezumînd cele prezentate la acest subpunct rezultă că pentru cazul I cînd nu există surse interioare, constanta modelării se poate alege chiar 1 (analogia automodelatoare amintită).

Pentru cazul II cînd există surse interioare valoarea lui C_2 va trebui determinată după formule (6.40). În situația cînd există o singură încărcare (debit) se va determina α_p după una din formulele (6.29), (6.30) sau (6.31) după caz aplicînd pe placă o încărcare avînd sensul debitului din situația naturală (alimentare sau prelevare). În situația cînd există două sau mai multe încărcări (debite), atunci una se alege ca valoare de referință determinînd α_p . Celelalte încărcări (distribuite pe suprafață, concentrate sau liniare), se determină păs-trînd același α_p pentru modelare folosînd (6.29), (6.30) sau (6.31).

6.8. Realizarea modelului ca structură

În condițiile de analogie mai sus prezentate, problema determinării spectrului liniilor echipotențiale într-un domeniu plan se reduce la realizarea unei plăci subțiri flexibile modelate pentru a reproduce la scară domeniul studiat. Placa se încarcă la margini cu valorile corespondente analog din tabelul (6.2)

Iar cînd există surse interioare se aplică încărcările după cele menționate la 6.7. Se măsoară într-o rețea de puncte valoarea săgeților w și se aplică apoi procedeul menționat la subpunctul 6.5.

Pentru margine se necesită unele considerații menționate mai jos.

Frontiera de alimentare sau marginea incastrată în modelarea analoagă se poate trata ca și un punct interior. Se poate calcula laplacianul din (6.7'). Astfel se poate determina valoarea M , respectiv analog H pentru această frontieră. Deoarece H este o condiție cunoscută pe frontieră înainte de modelare va trebui să aplicăm aceasta pe modelul analog și care se prezintă astfel:

Din teoria încovoierii plăcilor plane subțiri se poate scrie

$$M_n = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right) \quad (6.42)$$

$$M_s = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial n^2} \right) \quad (6.43)$$

unde n este normala și s tangenta la contur.

Pentru marginea incastrată din condiția (6.6) $\frac{\partial w}{\partial n} = 0$ printr-o nouă derivare parțială după n se obține că $\frac{\partial^2 w}{\partial n^2} = 0$. Introducînd aceasta în (6.42) și (6.43) se obține

$$\begin{aligned} M_n &= -D \mu \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \\ M_s &= -D \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \end{aligned} \quad (6.44)$$

Cu aceste valori se va exprima acum valoarea invariantului momentelor pe o margine incastrată, folosind (6.2) avem

$$M = \frac{M_n + M_s}{1 + \mu} = \frac{-D}{1 + \mu} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \right) = -D \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \quad (6.45)$$

sau pentru modelarea analoagă

$$M_s = -D_s \frac{\partial^2 w_a}{\partial s_a^2} \quad (6.46)$$

Folosind scările (6.14) și (6.16) se obține

$$H_n = -D_s \alpha_M \alpha_l^2 \frac{\partial^2 w_a}{\partial s^2} \quad (6.47)$$

Stiind că w_a are definiția după (6.22) și exprimând derivate parțială în diferențe finite după tiparul din fig.6.1 unde l este pasul rețelei în saturația din natură se obține:

$$H_n = -C_1 [C_{m(i-1)} - 2C_{m(i)} + C_{m(i+1)}] \quad (6.48)$$

formula cu care se pot calcula înălțimile piezometrice de-a lungul frontierei de alimentare modelată analogic.

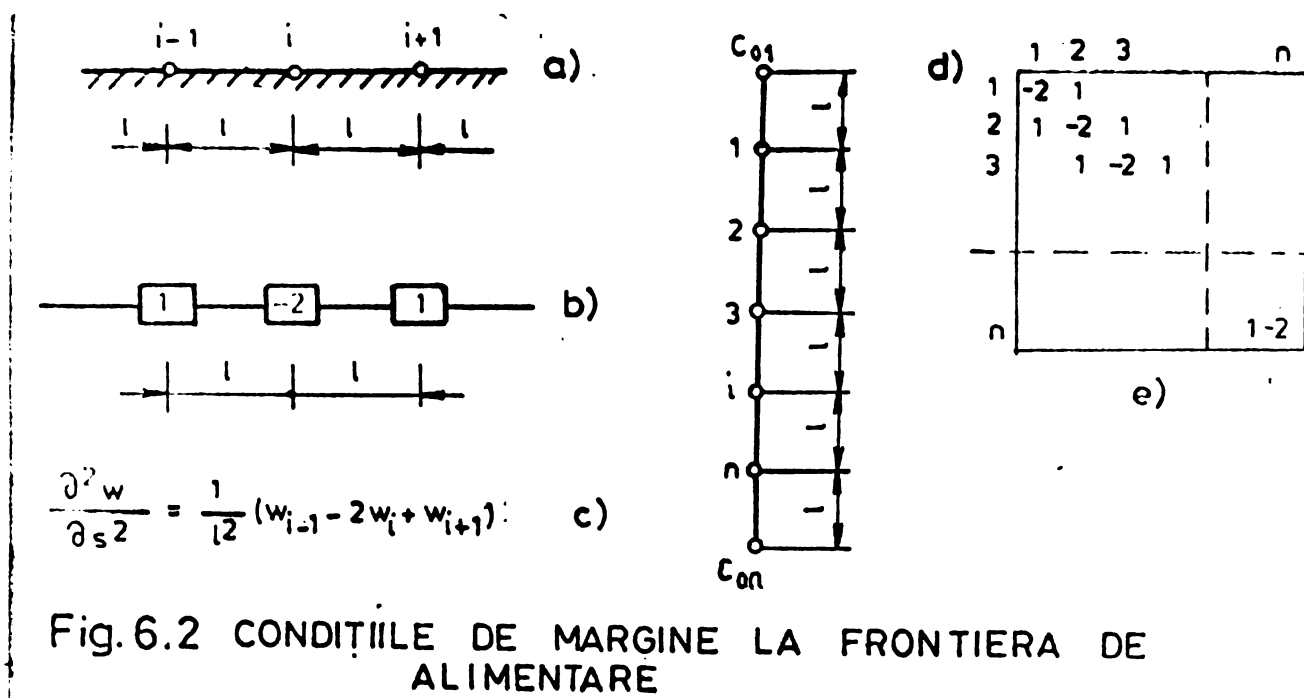


Fig. 6.2 CONDITIILE DE MARGINE LA FRONTIERA DE ALIMENTARE

De fapt înălțimile piezometrice sînt cunoscute pe frontiera de alimentare (condițiile de margine date la modelul din natură) și trebuie determinate valorile C_{mi} . Pentru marginea din fig.6.2 se pot scrie n ecuații de tipul (6.48) în cele n puncte unde citirile C_i nu sînt cunoscute. Citirile C_{01} și C_{on} se presupun cunoscute. Se obține următorul sistem liniar de ecuații :

$$\begin{aligned} -2C_{m1} + C_{m2} &= -\frac{1}{C_1} H_1 - C_{01} \\ C_{m1} = 2C_{m2} + C_{m3} &= -\frac{1}{C_1} H_2 \end{aligned} \quad (6.49)$$

$$C_{m(m-1)} - 2C_{m(m)} + C_{m(m+1)} = -\frac{1}{C_1} H_1$$

$$C_{m(m-1)} - 2C_{m(m)} = -\frac{1}{C_1} H_n - C_{mn}$$

Se observă că sistemul (6.49) este de tipul Jacobi (matrice bandă) cu coeficienți simetrici față de diagonala principală și care simplifică mult calculul.

Deoarece este aproape imposibil practic să potrivim ca la modelare să obținem chiar citirile C_m din (6.49) va trebui să ținem modelul în prealabil. Aceasta se face aplicând frontierei de elicitare o deformare tehnic realizabilă unde se obțin citirile notate cu C_{mi}^* . Pentru a ajunge în situația finală necesară se va aplica o corectură δC_1 pe această margine

$$\delta C_1 = C_{mi} - C_{mi}^* \quad (6.50)$$

Aplicând principiul independenței secțiunilor și suprapunerii efectelor relația (6.50) se poate interpreta fizic în sensul că deformația finală necesară a plăcii este egală cu deformația tehnic posibilă însumată cu cea din corectura de tasare.

Frontiere impermeabilă sau marginea liberă în modelarea analogă, folosind analogia 1, respectiv 2 se modifică conjugat.

Cele de mai sus de fapt corespund formei cu metoda Mohr pentru determinarea liniei elastice a grinzilor (metoda grinzii conjugate).

În domeniul bidimensional pentru placă, trecerea de la rezonanțele cazului real la cele ale cazului conjugat se face pe baza conjugării rezonanțelor prezentate în tabelul 6.3.

Corelații dintre condițiile de rezonanță

Tabelul 6.3

Placă reală	Placă conjugată
Margine liberă	Incastrare
Incastrare	Margine liberă

efectuarea studiului analitic se face după următoarele etape:

1. Alegerea unei rețele de puncte care acoperă domeniul studiat de asemenea și valoarea scării și a constantei de nodulare.

2. Citirea valorilor $C_{\text{inițial}}$ în punctele rețelei cu placă nedeformată.

3. Alegerea rezistențelor pentru placă reală

4. Aplicarea deformației tehnice posibile asupra marginii care corespunde la frontiera de alimentare

5. Cu placă astfel deformată se citesc valorile C_{final} în punctele rețelei

6. Se calculează valorile $C_{\text{ai}} = C_{\text{final}} = C_{\text{inițial}}$ în punctele rețelei reprezentând citirile din deformarea plăcii

7. Se calculează laplacionul în diferențe finite pentru fiecare punct folosind tabelul din fig.6.1 după ecuația(6.3)

de fapt se obțin valorile $-\frac{1}{D}$

8. Se face conjugarea rezistențelor după tabelul 6.3 obținând placă conjugată

9. Se încarcă placă conjugată cu valorile $\frac{1}{D}$ și se calculează

la fel laplacionul în diferențe finite după ecuația(6.4) se obțin valorile $-p$

10. Se verifică dacă valorile $-p$ sînt zero în punctele neîncărcate și dacă corespund încărcării în punctele unde apare o solicitare.

11. În caz de necorespondență, valorile calculate la punctul 9 se compensează prin relaxare pînă se îndeplinește condiția de la punctul 10. Valorile se notează $[C_0]$.

12. Pentru punctele situate numai pe frontiera de alimentare se calculează corecturile δC_1 după (6.50)

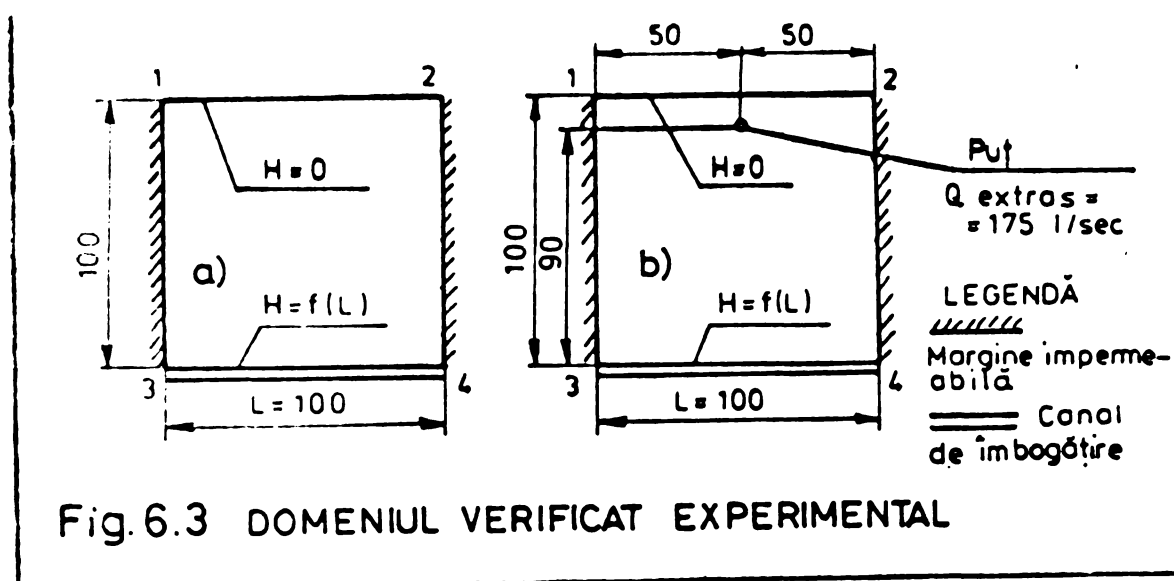
13. Se încarcă placă conjugată pe frontiera de alimentare cu δC_1 și se determină valorile corecturilor și în punctele interioare ale domeniului. Aceasta se face rezolvînd un sistem de ecuații în care se pune condiția că laplacionul în diferențe finite este zero pentru punctele interioare, adică de fapt corectura este un moment cunoscut aplicat pe marginea plăcii și în interiorul domeniului nu există încărcări. Se obțin valorile $[\delta C_1]$.

14. Se calculează înălțimile piezometrice după (6.39) unde valorile C_s (din paranteza rotundă) se introduc cu valorile corectate după operația de la pct.13, adică

$$C_s = [C_s] + [C] \quad (6.51)$$

6.9. Cercetări experimentale prin analogie elastico-hidraulică

Autorul prezentei teze și-a propus verificarea pe calea experimentală a cazului studiat, prin metoda elementelor finite (Anexa 1 și 2), de asemenea descris și la subpunctul 5.2 (fig.6.3)



Cazurile a și b au aceleași condiții de margine, diferă doar prin faptul că în situația b există un puț de prelevare. Funcția $H = f(l)$ a fost discutată și prezentată la cap.V. Se consideră că debitul de $0,35 \text{ m}^3/\text{sec}$ (exemplul de la 5.2) se infiltrează simetric pe ambele părți ale canalului 3-4. Transmisivitatea terenului $T = 0,0423318 \text{ m}^2/\text{sec}$, debitul extras în situația b $Q = 175 \text{ l}/\text{sec}$.

Aceste domenii au fost modelate printr-o placă sintetică de $0,5 \text{ m}$ grosime de dimensiune de $25 \times 25 \text{ cm}$. Marginile 1-3 și 2-4 în situația naturală fiind impermeabile s-a modelat

analog ca margini libere, iar laturile 1-2 și 3-4 ca frontiere de alimentare s-au modelat ca și încastrări, placa fiind prinsă între două corniere cu șripi egale de 30x30x3 strinse cu șuruburi. Latura 1-2 a rămas orizontală nedeformată, iar laturii 3-4 li s-a dat o deformare liniară ridicându-se coltul 3.

Puțul prin care se extrage debitul $Q = 175 \text{ l/sec}$ în punctul de coordonatele $x = 50$; $y = 90$ s-a modelat aplicând în punctul respectiv o greutate de 1,865 daN. Practic acest lucru s-a făcut prin găurirea plăcii în punctul de aplicare cu un tereț de 2 mm. Prin gaură s-a trecut o vergea filetată care se rezămă prin intermediul unei șaibe și piulițe pe placă. Sarcina de 1,865 daN s-a prins de această vergea sub placă (vezi Foto nr.4).

De fapt este foarte dificil de a modela analog o forță care să se aplice concentrat punctual. Aceasta se face prin încărcarea pe o suprafață foarte mică dar totuși finită ca mărime. Dar și în cazul real nu se poate vorbi de un debit concentrat punctual în sensul strict, aceasta există numai teoretic deoarece la un puț chiar și forat cu un diametru foarte mic debitul se aplică pe o arie circulară de mărime finită.

Studiul experimental se bazează pe măsurarea săgeților într-o rețea de puncte a plăcii deformată. Placa se prinde pe un stand metalic format din corniere. Câmpul de studiu are mărimea de 65x65 cm (vezi Foto nr.1). Pe acest stand se mișcă o punte în direcția „x” iar pe această punte se poate deplasa un cărucior în direcția „y”. Mișcarea punții și a căruciorului se fac cu ajutorul unor rulmenți care sînt ghidați într-un șanț rabotat în piesa metalică a standului respectiv a punții. Mărimea șanțului: lățimea 5 mm iar adîncimea 3 mm. Pe cărucior se află un traductor inductiv de tip Wlo Hottinger Baldwin Messtechnik, un sc de palpate și un ghidaj care permite mișcarea de translație pe verticală a acestora (vezi Foto nr.3).

Traductorul Wlo Hottinger Baldwin Messtechnik are următoarele caracteristici:

- domeniul nominal de măsurare 20 mm (± 10 mm), dome-

niul maxim de lucru 24 mm, eroarea de neliniaritate sub $\pm 0,2\%$ în domeniul de măsurare, sensibilitatea la temperatură $\pm 0,2\%$ la 10°C , temperatura de lucru între -200 și până la $+100^{\circ}\text{C}$, masa corpului bobinelor 65 g, iar a miezului feromagnetic 5g.

Principiul de măsurare

În corpul cilindric al bobinelor se află o bobină de șoc diferențială formată din două înfășurări egale. Acestea se leagă pe jumătatea unei punți Wheastone, iar cealaltă jumătate o formează două rezistențe de precizie de mărime egală. Miezul feromagnetic se poate mișca în cavitatea cilindrică a bobinelor prin care se mărește inductivitatea unei bobine iar a celeilalte se diminuează de același ordin de mărime. Puntea Wheastone anterior echilibrată în acest mod se dezechilibrează. Pentru reechilibrare va trebui să se alimenteze puntea cu o tensiune adițională. Mărimea acesteia este proporțională cu deplasarea miezului feromagnetic și este pozitivă sau negativă după sensul deplasării. Deci tensiunea este o măsură a drumului parcurs de acul palpator legat solidar de miezul feromagnetic. Există o relație liniară între deplasare și tensiune dar numai în domeniul nominal de lucru. Mărimea tensiunilor s-a citit pe cadranul indicator al unei punți electronice UM 111 produs de RFT-V&B . Funkwerke Dresda (vezi Foto 2). Acesta este un instrument universal pentru măsurarea mărimilor mecanice pe cale electrică. Poate prelua semnalele electrice primite de la traductori rezistivi sau inductivi montați în punte.

Scările folosite

$$\alpha_p = \frac{10000}{25} = 400 \quad \text{după rel. (6.14),}$$

iar după rel. (6.29) avem

$$\alpha_p = \frac{0,175}{0,0423318} \cdot \frac{1}{1,865} \cdot \frac{1}{400^2} = 1,36539 \times 10^{-5} \quad \text{m/daN}$$

Din (6.32) rezultă $\alpha_M = 2,21662 \quad \text{m/daN}$

ca relația criterială să fie 1. Constanta aparatului $C_{ap} = 0,110344827 \text{ mm/diviz}$ și care s-a determinat prin etalonare

și măsurarea unei plăci de grosime cunoscută cu un micrometru.

Constanta modelării pentru cazul a) din fig.6.3 s-a ales în conforma celor prezentate la subpunctul 6.7 iar pentru cazul b) se va calcula după (6.40). În prealabil se va afla rigiditatea cilindrică după (6.1)

$$D_{\text{c}} = \frac{2,1 \times 10^6 \text{ daN/cm}^2 \times (0,05 \text{ cm})^3}{12 (1 - 0,3^2)} = 24,03846 \text{ daN cm}$$

și se alege pasul rețelei de puncte unde se va măsura săgeata plăcii. Aceasta este $l = 10,00 \text{ m}$ (de fapt săgeata se măsoară din locuri unde $d_e = 2,5 \text{ cm}$ dar rel.(6.21) și (6.23) s-au dedus astfel că se introduce lungimea pasului corespunzător situației din natură)

$$C_1 = \frac{1}{(10 \text{ m})^2} (0,24038 \text{ daN} \times 400^4 \times 1,385 \times 10^{-5} \text{ m/daN} \times 0,1103 \times 10^{-3} \text{ m/div}) = 0,094 \text{ m/diviz.}$$

Operațiile propriu zise ale cercetării au constat din: conceperea ștandului experimental, alegerea aparatului de măsură, încălearea modelului analog, cuplarea transductorului, alegerea tensiunii de alimentare a punții, echilibrarea preliminară a punții, reglarea fazei, calibrarea, măsurarea, prelucrarea datelor obținute conform celor prezentate în subpunctele 6.7 și 6.8

Rezultatele cercetărilor experimentale se prezintă în anexele 5-12.

6.10 Concluzii parțiale

Metoda analogiei elastico-hidraulice, propusă, poate fi utilizată cu succes la studiul mișcării apelor subterane, la infiltrația din canale în straturi scvifere alimentate tehnic. Față de alte metode de laborator cunoscute, prezintă avantajul unei modelări ușoare, oferirea rapidă a informațiilor asupra întregului câmp modelat, utilizarea unei aparaturi simple, precizie satisfăcătoare.

C A P I T O L U L VII

CONCLUZII

Îmbogățirea tehnică sau artificială a straturilor acvifere este o ramură relativ tânără a hidrotehnicii. Noțiunea de îmbogățire tehnică a straturilor acvifere include totalitatea procedurilor tehnologice prin care se realizează infiltrarea apei din surse de suprafață în straturile acvifere în scopul măririi artificiale a debitului sau a acumularii apei acestora.

Metodele utilizate, pînă în prezent, pentru alimentarea tehnică a straturilor acvifere, au permis rezolvarea unor probleme concrete de alimentare cu apă potabilă, industrială, de gospodărire a apei, cîștigînd un loc permanent în preocupările specialiștilor care se ocupă de gospodărirea completă a apelor.

Atît pe tărîm mondial cît și pe plan național se arată o tendință de dezvoltare a acestei ramuri. În literatura de specialitate există mai multe păreri referitoare la unele măsuri constructive și de exploatare, însă se cunosc prea puține recomandări cu privire la calculele hidraulice ale acestei tehnologii. Nu se poate vorbi astăzi despre un calcul fundamentat al infiltrării apei, previziunile teoretice ale debitului făcute de diverși autori fiind aleatorii.

Problema îmbogățirii artificiale a fost inclusă și în tematica unor congrese de specialitate (Stockholm 1964, Budapesta 1970, New-York 1972, Varna 1973, Mar del Plata 1977). Ultima manifestare internațională a alimentărilor cu apă și printre numeroase recomandări, a formulat ca „ să se promoveze cu prioritate cercetarea științifică și în domeniul îmbogățirii stratelor subterane”.

În țara noastră această tehnologie este la început fiind puțin cunoscută. Se pot exemplifica puține orașe unde ea a fost folosită (Agnita, Luduș, Suceava, Cluj-Napoca, Oradea).

Rezolvarea problemelor de îmbogățire a straturilor acvifere reclamă studii și cercetări complexe. Pentru rezol-

varea unor viitoare lucrări de alimentare cu apă a centrelor urbane sau industriale, prin îmbogățire, prin lucrarea de față elaboratorul și-a propus aprofundarea unor aspecte teoretice și practice și anume:

- prezentarea sistematică a metodelor și a posibilităților actuale privind alimentarea straturilor acvifere cu apă din surse de suprafață,

- studierea și aprofundarea calculului hidraulic al construcțiilor liniare de infiltrare,

- formularea unor recomandări cu privire la aspectele constructive în exploatare a amenajărilor de îmbogățire tehnică a straturilor acvifere prin construcții liniare,

- verificarea experimentală a studiului teoretic.

La elaborarea lucrării de față s-a bazat pe :

1. Valabilitatea legii liniare a lui Darcy

2. Folosirea metodelor numerice la determinarea spectrului hidrodinamic al mișcării.

3. Critica metodei diferențelor finite (ca metodă numerică expusă în cap.III) și utilizarea metodei elementelor finite ca metodă de lucru.

4. În cadrul metodei elementelor finite acceptarea că :

- tensorul permeabilităților este constant în interiorul unui element finit

- alegerea direcțiilor principale x, y ale sistemului de coordonate în coincidență cu direcțiile principale ale tensorului mediului poros.

- înălțimile piezometrice variază liniar în interiorul unui element finit

- constanta vitezei de curgere a apei în interiorul unui element finit

- discretizarea domeniului se face în elemente de formă triunghiulară

- linia poligonală obținută pentru liniile echipotențiale și respectiv de curent, aproximează cu o anumită precizie traseul real curbiliniu ale acestora.

5. Debitul exfiltrat de-a lungul traseului canalului

nu este constant și depinde de distanță, de lungimea totală, de coeficientul de permeabilitate și de dimensiunile geometrice în secțiune transversală ale canalului.

6. Colmatarea la capătul canalului este inevitabilă însă prin măsurile constructive se poate reduce lungimea unde se manifestă acest fenomen.

7. Inadmisibilitatea folosirii modelării prin similitudine la scară redusă datorită dificultăților și a contradicțiilor semnalate în cap.VI.

Se consideră cele de mai jos drept contribuții originale ale autorului, unele fiind semnalate pe parcursul elaborării în anii anteriori în literatura de specialitate [157], [158]

1. Elaborarea programului de calcul MELFIN-1 cu care se pot rezolva numeric problemele legate de mișcarea apei prin medii poroase.

Autozul prezentei lucrări susține că programul MELFIN-1 prezintă următoarele avantaje: posibilitatea de a cerceta simultan mai multe probleme printr-o singură rulare (fig.4.9 și cap. IV punctul 4.7), introducerea și extragerea datelor hidraulice nu mai necesită alte calcule sau transformări preliminare.

2. Obținerea prin calcul automat al coordonatelor liniilor echipotențiale și de curent (cap.IV, punctele 4.5 și 4.6)

3. Rezolvarea tratării automate prin calcul și condițiilor de margine, (cap.IV, punctul 4.4.2)

4. Folosirea proprietății matricii de influență (simetrie față de diagonala principală și multe elemente nule) pentru a reduce la minim spațiul necesar pentru memorizare (cap.IV punctul 4.3).

5. Introducerea folosirii metodei Cholesky la rezolvarea sistemului de ecuații și reducerea astfel a operațiilor aritmetice cu de 3,5-4 ori (cap.IV punctul 4.4.1).

6. Sugerarea și preconizarea dezvoltării viitoare ale utilizării programului de calcul MELFIN-1 prin folosirea mai eficientă a calculatorului și perfecționarea tehnicii de calcul (Cap.IV punctul 4.8 și 4.9).

7. Determinarea legii de mișcare neuniforme a apei într-un canal de infiltrare, găsirea funcției $\chi(\lambda)$ și a expresiei

analitice a acestora [157] , cap. V punctul 5.1

8. Discuția cazurilor posibile de funcționare a unui canal de îmbogățire [157] , cap.V punctul 5.1 și fig.5.6)

9. Recomandarea folosirii pantei liniar variabile pentru reducerea lungimii unde apare colmatarea (cap.V).

10. Stabilirea duratei de funcționare a canalului între îndepărtarea depunerilor (ec.5.29) și dacă este necesară prevederea unei pretratări la admiterea apei în canal (cap.V)

11. Cercetarea și determinarea modelului mișcării potențiale generat de un canal de îmbogățire, considerat ca o serie de surse distribuite continuu pe axa longitudinală a acestui canal (cap.V punctul 5.4)

12. Elaborarea programului de calcul IFGA cu care se pot trasa liniile echipotențiale și de curent din mișcarea potențială generat de un canal de îmbogățire (cap.V.punctul 5.4)

13. Stabilirea teoretică a analogiei elastico-hidraulică, a posibilității modelării fenomenelor din domeniul hidraulicii subterane analog cu încovoiera plăcilor plane subțiri, deducerea corespondenței condițiilor de margine și considerații de analiză dimensională (cap.IV subpunctele 6.4, 6.5, 6.6).

14. Concepția, proiectarea și realizarea unui stand experimental(cap.VI subpunctele 6.8, 6.9 și Fotografiiile nr.1-4)

15. Cercetări experimentale prin analogie elastico-hidraulică (cap.VI subpunctul 6-9).

Ca încheiere autorul menționează că a căutat să aducă contribuții, care ori cât de modeste ar fi ca valoare, să prezinte un caracter de noutate și de seriozitate. În privința aplicabilității rezultatelor obținute, elaboratorul apreciază că în anii următori vor apărea numeroase probleme la proiectarea și executarea captărilor din surse subterane îmbogățite artificial unde se vor putea valorifica rezultatele teoretice și practice ale tezei.

177/1

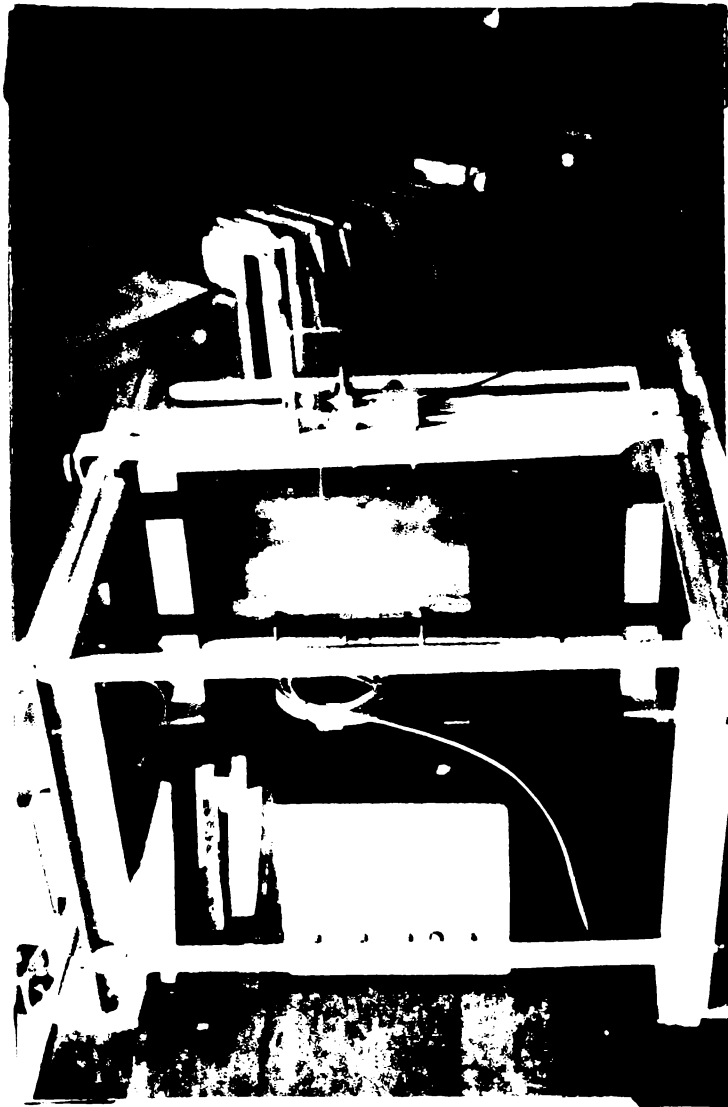


Foto.1 Ansamblul general al şandului

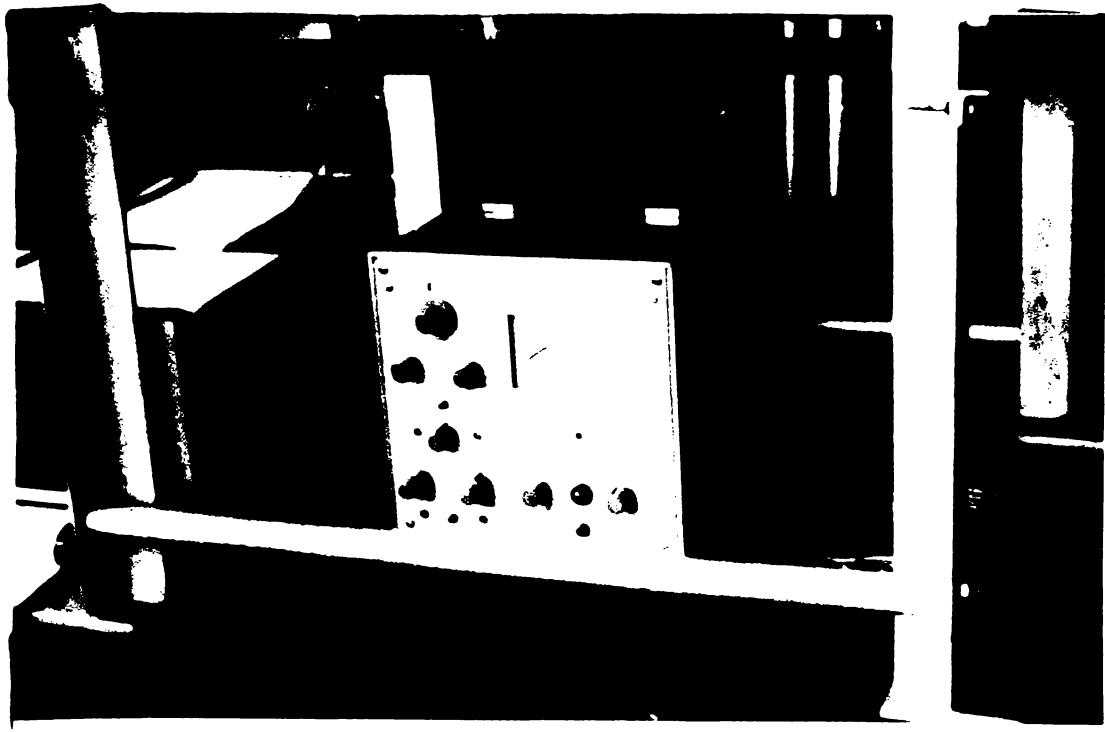


Foto.2 Puntea electronică UM-111

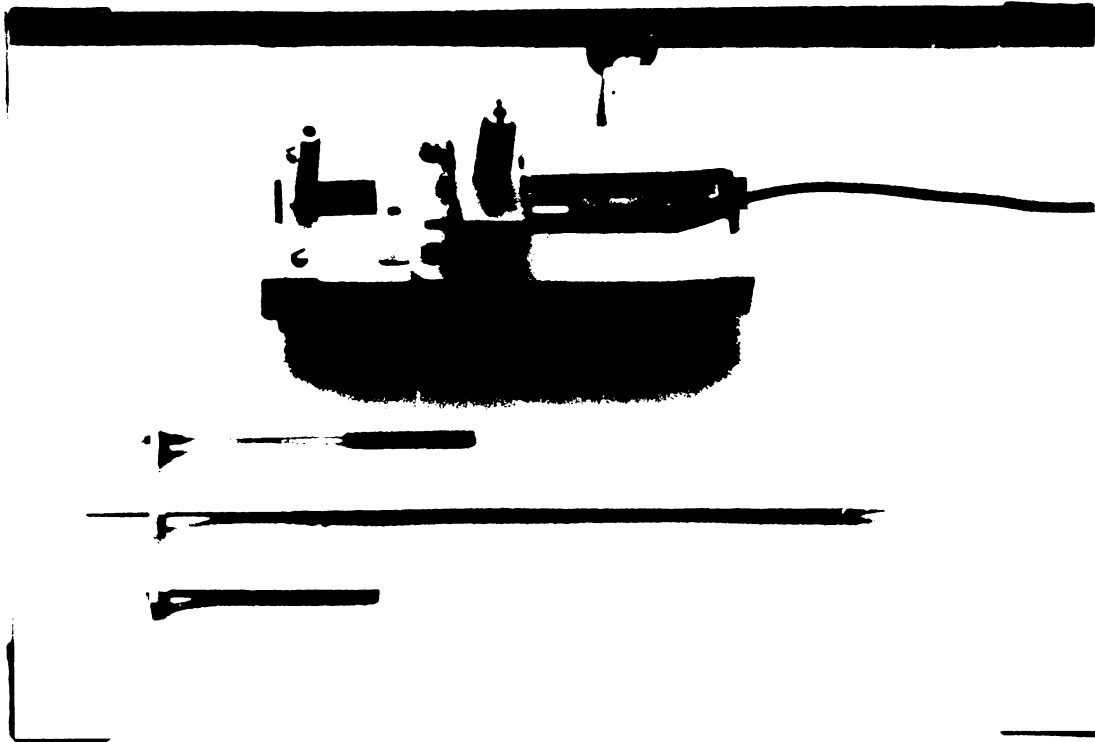


Foto.3 Căruciorul și grupul acul palpator, miezul feromagnetic cu ghidajul

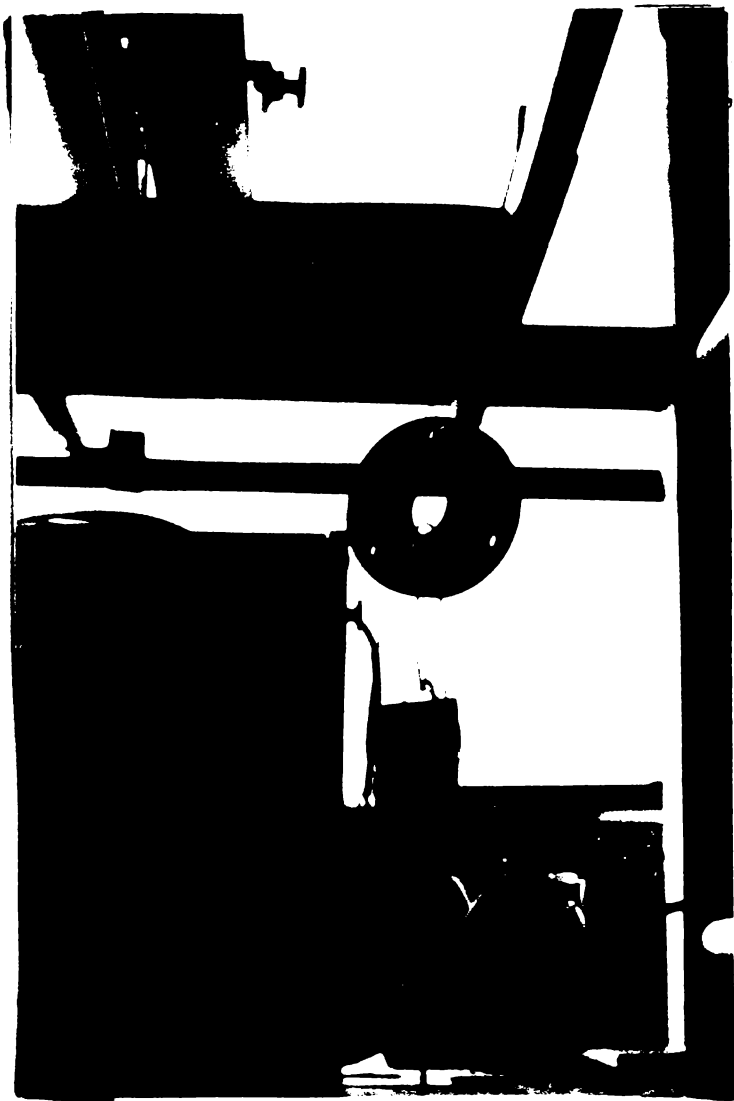


Foto.4 Incărcarea cu o forță concentrată

C A P I T O L U L VIII
SUBLINIAREA UNOR ASPECTE SPECIFICE PRIVIND
CALCULUL HIDROGEOLOGIC UTILIZIND METODA
ELEMENTELOR DE FRONTIERA

In 1975 la Congresul IARH din Sao-Paulo Bischoff [217] prezintă metoda elementelor de frontieră. Această se bazează pe o metodă cunoscută încă din 1962 folosită în electrotehnica și magnetism. În esență metoda se bazează pe încărcarea frontierelor domeniului studiat cu surse și vîrtejuri deocamdată necunoscute. Insumînd dealungul frontierei potențialele generate de aceste surse și vîrtejuri se poate calcula potențialul unui punct din interiorul domeniului. În final se obține un sistem de ecuații liniare cu atîtea necunoscute în cîte elemente a fost divizată frontiera. Rezolvarea acestui sistem nu prezintă dificultate folosind tehnica modernă de calcul.

In perioada după 1975 însăși Bischoff și alți cercetători reiau această metodă și ajung la o serie de rezultate interesante. Astfel Bischoff [219] în 1977 generalizează metoda în domeniul plan și pentru problemele mixte de frontieră.

Tot în 1977 Dr. ing. David I. [218] dezvoltă metoda echivalențelor locale și soluționează mișcarea tridimensională la un puț cu drenuri radiale. Dr. ing. David I. descompune mișcarea într-un model cu o curgere echivalentă în plan vertical și orizontal. Modelul este astfel conceput că permite nu numai o apreciere globală a întregului debit, dar și calculul unor aspecte locale ca de exemplu distribuția debitelor dealungul drenului. Pentru a aprecia fenomenele locale ale mișcării tridimensionale Dr. ing. David I. însumează pierderile datorită curgerii în plan orizontal și în cel vertical astfel ca să fie îndeplinite condițiile de pe frontieră în fiecare punct al drenurilor. În prealabil se fac unele considerații privind pierderile și distribuția potențialului dealungul unui dren.

In 1982 Söhngen, Bischoff și Lacher [221] calculează debitul unui sistem de drenuri spațiale amplasate într-un strat acvifer extins pe orizontal pe baza metodei elementelor de frontieră efectiv pentru situația tridimensională.

Gerdes și însăși Lacher reia metoda Dr.ing.David I. în lucrarea [220] pentru calculul mișcării apei subterane în spațiul tridimensional. La compararea rezultatelor obținute autorii apreciază că metoda Dr.ing.David I. este mai simplă de aplicat și duce la rezultate cu precizie mai mare.

Aceste considerente permit orientarea calculelor de îmbogățirea tehnică a acviferelor, cu sublinierea unor caracteristici hidrogeologice, coroborate conform bibliografiei suplimentare [217÷221].

În prezenta lucrare în programele de calcul care aplică metoda elementelor finite există posibilitatea de a se lua în considerare atât un mediu poros omogen uniform și izotrop cât și posibilitatea de a se considera că terenul are permeabilitate neuniformă.

Intrucât aplicarea metodei elastico-hidraulice este mai simplă în cazul terenului uniform s-a luat în considerare această situație și rezultatele obținute experimental confirmă în cea mai mare măsură valabilitatea ipotezelor acceptate în modelul matematic.

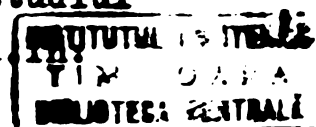
Considerarea mediului poros neuniform și neomogen și ținând seama de metoda elementelor de frontieră se creează o posibilitate de generalizare a procedeelelor aplicate în lucrare pentru rezolvarea unor probleme concrete de mai mare complexitate care pot interveni în practică.

B I B L I O G R A F I E

1. Albring, W., *Angewandte Strömungslehre*. Verlag Theodor Sternkopf, Dresden, 1970.
2. Albu, M., *Mecanica apelor subterane*. Ed. Tehnică, Buc. 1981.
3. Albu, M., *Despre precizia exprimărilor analitice ale mișcărilor nivelurilor piezometrice la apele subterane*. In: *Hidrotehnica*, vol.16, nr.5, București, 1971.
4. Albu, M., *Despre oscilațiile nivelurilor apelor subterane*. In: *Hidrotehnica*, vol.16, nr.7, București, 1971.
5. Albu, M., *Contribuții la determinarea capacității de înmagazinare a apei în medii poroase*. In: *Hidrotehnica*, nr.8, 1971.
6. Albu, M., *Considerații privind calculul rezervelor naturale de apă subterană din stratele acvifere cu nivel liber*. In: *Hidrotehnica*, vol.17, nr.4, București, 1972.
7. Albu, M., *Interpretarea datelor pompărilor experimentale pentru curgerea în regim tranzitoriu către un puț prin care se pompează un strat acvifer realimentat*. In: *Probleme de hidrometrie ape subterane 3*, IMH București, 1/1973.
8. Alexandru, Gh., *Prelucrarea și sinteza datelor hidrogeologice*. Editura Tehnică, București, 1973.
9. *Alimentation artificielle des nappes souterraines. Inventaire international des installations existentes*. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Belgia, 1970.
10. Andrae, H., *Neue Hydrometrische Verfahren*, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1963.
11. Aravin, V.I., Numerov, S.N., *Filtraționnie rascioti gidrotehniceskikh sooruzeni*. Leningrad, 1955.
12. Aravin, V.I., *Rasciota i modelirovanie planovoi filtrații*, Moscova, 1963.
13. Bardelli, V., *Nilul și Padul, fluvii cu delta în evoluție*. In: *Genio rurale*, nr.11, 1961, Italia, p.809-831.
14. Bauer, M., *Talajvízdúsítás Hollandiában alkalmazott módszere erösen szennyezett felszíni vizek tisztítására*. In: *Hidrológiai Közlöny* nr.8, Budapest, 1973, p.364-369.
15. Bear, J., *Scales of Viscous Analogy Models for Groundwater Studies*. *Journal of the Hydr. Div, Proc. ASCE*, vol.86, HY2, 1960.

16. Bear, J., Braester, J., Flow from infiltration basin to drain and wells. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings. ASCE, No. HY5, 1966, PP4911, p115-134.
17. Beckenbach, E., P., Modern Mathematics for the engineer. Mc Graw Hill Book Company 1956, New-York, Toronto, London.
18. Becker, E., Eine Einführung in die Grundlagen der technischen Anwendung der Störungsmechanik, 1970, Stuttgart.
19. Bettaque, R., Studien zur künstlichen Grundwasseranreicherung. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Hannover TH. Heft 2/1958.
20. BĂLĂ, M., Construcții hidrotehnice vol. I-IV, ed. II. Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1980.
21. Bjarsch, B., Ziele und Möglichkeiten der Wasserregelung in Flachlandgebieten. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, an. 24, 1974, nr. 7, p 223-227.
22. Blitz, E., Progrese realizate în RSR în alimentări cu apă, canalizări în ultimile două decenii. In: Buletinul Stiințific al Inst. Constr. București, 1965/14B pag 9-10.
23. Bogoliubov, V., M., Grigoriev, V., S., Experiența îmbogățirii artificiale a rezervelor de ape subterane. In: Ghidrotehnika i meliorația, nr. 10, 1972. pag 75-80.
24. Bosold, H., Internationale Konferenz "Technischer Fortschritt in der Wasserversorgung" von 4-8 Mai 1973 in der VR Bulgarien In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, an. 23, 1974, nr. 8, p 286-289.
25. Botzan, T., Botzan, D., A., Citeva aspecte privind posibilitatea valorificării resurselor de apă subterană. In: Hidrotehnica, vol 26, nr. 3, București, 1981, p 80-81.
26. Bouwer, H., Theoretical Aspects of Seepage from open Channels. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings ASCE, vol. 91, No. HY3, 4321 May 1965 pp 37-59.
27. Böttger, H., Quast, J., Kaden, St., Numerische Berechnung von Hydroisohypsenplänen und deren Konstruktion mit universellen Digitalrechnern. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, an. 23, 1973, nr. 1, p 13-14 și p 23-26 și nr. 2, p 61-62.
28. Braun, E., Mécaniques des fluides, Dunod, Paris, 1968.
29. Brix, H., Die Wasserversorgung, Wien, 1963.
30. Brown, R., F., Signor, D., C., Alimentarea artificială a apei subterane. In: Water Resources Bulletin SUA, 8, nr. 1, febr, 1972, p132-149.

31. Bucur, C.M., Metode numerice. Editura Facla Timișoara, 1976.
32. Cădere, R., Serbănescu, J., Considerații preliminare asupra posibilităților de alimentare artificială a straturilor acvifere. In: Studii de hidrologie, vol. II/64, ISCH București.
33. Cădere, R., Căi de impurificare a apelor subterane și combaterea ei. In: Hidrotehnica, vol. 17, nr. 10, București, 1972, pag. 531-534.
34. Căpriță, D., Danchiv, A., Probleme de potențial rezolvate prin metoda elementului finit. In: Studii de geotehnică, fundații și construcții hidrotehnice, vol. XVII, București, 1972.
35. Căpriță, D., Constantinescu, A., Problemes de la distribution des champs potentiels résolus par la méthode des éléments finis. In: Rev. roum. géol. géogr. et géophys. - Série de géophysique, vol. 17, nr. 1, București, 1973.
36. Caquot, A., Kerisel, J., Traité de mécanique des sols. Editura Tehnică, București, 1968.
37. Casati, A., Anreichern und Speichern von Grundwasser. In: Gas und Wasserfach, Wasser, Abwasser, vol. 107, nr. 36/1966, pag. 1022.
38. Castany, G., Prospekțiunea și exploatarea apelor subterane. Editura Tehnică, București, 1972.
39. Casacu, E., Unele date privind variația nivelului apei freatice pe terenurile amenajate pentru irigații. In: Hidrotehnica, vol. 17, nr. 6, București, 1972, pag. 299-303.
40. Cernat, M., Metode privind captările de apă de suprafață și subterane. Studii de sinteză. CIDH, București, 1972.
41. Certousov, N.D., Hidraulica curs special. Editura Tehnică, București, 1966.
42. Chiselev, P.G., Indreptar pentru calcule hidraulice. Editura energetică de stat, București, 1953.
43. Cioc, D., Mecanica fluidelor. Ed. didactică, București, 1967.
44. Cioc, D., Hidraulică. Ed. didactică și pedagogică, București, 1975.
45. Cioc, D., ș.a., Hidraulică culegere de probleme. Ed. didactică și pedagogică, București, 1973.
46. Ciocîrdel, R., Hidrogeologie. Edit. Tehnică, București, 1957.
47. Collatz, L., The numerical treatment of differential equations. Springer, Berlin, 1960.
48. Constantinescu, Gh.P., Popescu, M., Contribuții la studiul unei captări de apă subterană infiltrată prin mal



- Hidrotehnica, vol. 8, nr. 1, București, 1963, pag. 1-6.
49. Constantinescu, Gh. P., Studiile hidrogeologice și captările de ape subterane în RPR. In: Hidrotehnica, Gospod. apelor, Meteorologia, vol. 10, nr. 5, București, 1965, pag. 225-226.
50. Constantinescu, Gh. P., Orientări noi în rezolvarea problemelor de alimentări cu apă. In: Hidrotehnica, vol. 23, nr. 3, București, 1978, pag. 57-58. și pag. 63-64.
51. Constantinescu, Gh. P., Captările de ape subterane din România. Editura Tehnică, București, 1980.
52. Constantinescu, Gh. P., Imbogățirea acviferelor. In: Hidrotehnica, vol. 26, nr. 1, București, 1981, pag. 15-17.
53. Cosma, Gh., Cu privire la similitudinea în mișcarea filtra-tă. In: Hidrotehnica, vol. 1, nr. 3, București, 1956.
54. Crețu, Gh., Optimizarea sistemelor de gospodărire a apelor. Editura Facla, Timișoara, 1980.
55. Crețu, J., Modelarea numerică a mișcării fluidelor în medii poroase. Editura Tehnică, București, 1980.
56. Cristea, N., Hidraulica subterană, vol. I. Ed. Tehnică, Buc. 1958.
57. David, I., Metoda diferențelor finite cu pas variabil în problemele de filtrație. In: Bul. științific și tehnic al IPT "Traian Vuia" Timișoara Seria Constr. Tom 23/37/, fasc. 2-1978. pag. 216-225.
58. David, I., Calculul hidraulic al drenurilor ecranate, de lungime finită, dispuse în curentul subteran. In: Hidrotehnică, vol. 16, nr. 7, București, 1971, pag. 358-364.
59. David, I., Contribuții la studiul unor mișcări prin medii poroase cu aplicații la calculul hidraulic al captărilor subterane. Teză de doctorat. Inst. Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1973, cond. științific Prof. em. ing. Gheorghiu, V.,
60. Déri, J., Talajvízdúsítás, In: Vizügyi Közlemények, nr. 3, Budapest, 1975, pag. 335-384.
61. Diersch, H. J., Die Berechnung stationärer zweidimensionaler und rotationssymmetrischer Potentialströmungen mit Hilfe der Finit-Element Methode. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden. Separatdruck Bau und Wasserwesen. Reihe 7, nr. 32, Jahrgang, 24, Heft 3/4, 1975.
62. Directivele Congresului al XII-lea al PCR cu privire la dezvoltarea economico-socială a României în cincinalul

- 1981-1985 și orientările de perspectivă pînă în 1990.
Editura Politică, București, 1979.
63. Documentele Congresului Consiliilor populare județene și al Președințiilor Consiliilor populare municipale, orășenești și comunale. Cuvîntarea tov. Iorgulescu Florin Președintele Consiliului Național al Apelor 4-6 febr. 1976. In: România Liberă nr. 9730/1976.
64. Dogaru, L., Anafitesei, R., Pietraru, V., Utilizarea calculatoarelor electronice la studiul infiltrațiilor. In: Studii de Geotehnică, Fundații și Construcții hidrotehnice. Vol. VIII, ISCH, 1964, București, pag. 21-39.
65. Dracos, T., Ebene nichtstationäre Grundwasserabflüsse mit freier Oberfläche. Zürich, Dissertationsdruckerei Lehmann, 1963.
66. Ene, H., Gogonea, S., Probleme în teoria filtrației. Editura Academiei RSR, București, 1973.
67. Enea, I., Imbogățirea și recondiționarea stratelor acvifere subterane freatice. In: Hidrotehnica, Gospodărirea Apelor, Meteorologia, vol. 9, nr. 1, București, 1964, pag. 34-39.
68. Fázold, A., Pelszíni víztisztítás talajvízdúsítással. In: Hidrológiai Közlöny, nr. 6, Budapest, 1968, pag. 264-271.
69. Fliskowski, I., Knapik, K., Luckner, L., Nilbert, P., Wiczysky, A., Vergleichende untersuchungen zur analogen und digitalen Simulation regionaler Grundwasserströmungsfelder. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 25, 1976, nr. 4, pag. 129-130.
70. Franke, O., Die Strömungsvorgänge bei unvollkommenen Brunnen. Dissertation, 1964.
71. Furon, R., Problema apei în lume. Editura Științifică, 1967.
72. Galli, L., Talajvizsgálatok a víz-és mélyépitésben. In: Hidrológiai Közlöny nr. 12, 1974, pag. 549-554 și nr. 1, 1975, pag. 8-14, Budapest.
73. Gaspar, E., Oncescu, M., Introducere în radiohidrologie. Editura Academiei RSR, București, 1967.
74. Garg, S. P., Chwala, A. S., Seepage from trapezoidal Channels. In: Journal of Hydraulics Division, Proceedings ASCE, HY6, 1970, PP 7335, pag. 1261-1282.
75. Gărdaru, A., Kellner, P., Dragomir, G., Exfiltrațiile dintr-un canal de aducțiune pentru irigații și implicațiile acestuia.

- In: Studii de Geotehnică, Fundații și Constr. Hidrotehnice, vol XVIII, 1974, ISCH, București, Pag. 197-211.
76. Gieck, G., Die Grundwasseranreicherung in der Letslingen Heide. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 1961/8, pag. 397-403.
77. Gheorghiuță, St., Capitole din teoria mișcărilor în medii poroase. Editura Tehnică, București, 1957.
78. Gheorghiuță, St., Metode matematice în hidrogazodinamica subterană. Editura Academiei, București, 1966.
79. Gheorghiuță, St., Introducere în hidrodinamica corpurilor poroase. Editura Academiei, București, 1969.
80. Giurconiu, M., Mirel, I., Păcurariu, M., Popa, Gh., Diagrame și tabele pentru calculul lucrărilor hidroedilitare. Editura Facla, Timișoara, 1977.
81. Hackeschmidt, M., Strömungstechnik, Ähnlichkeit-Analogie-Modell. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1972.
82. Häfner, Fr., Heeg, W., Indirekte hydrodynamische Erkundung geologischer Strukturen. Lösungsmöglichkeiten des hydrodynamischen Umkehrproblems. In: Neue Bergbautechnik, nr. 9, 1974, pag. 695-698.
83. Holló, I., Hunyady, D., Nagy, L., D., Beszámoló az 1964 évi Stockholm-i vízellátási Kongresszusról és tanulmányútról. É.M. Mélyépítési Tervező Vállalat, Budapest, 1964.
84. Huisman, L., Realimentation artificielle. Congres international des distributions d'eau, Stockholm, 1964.
85. Hunt, B. W., Seepage from Shallow open Channels. In: Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE, nr. HY 5, 1972, pag. 779-786.
86. Ivan, C., Influența bazinelor de infiltrație asupra debitului unei captări de apă. Documentația curentă CIDH, București, seria, E II, nr. 5, 1970, pag. 5-6.
87. Ivan, C., Modele de calcul analogic în hidraulica subterană. Editura Tehnică, București, 1975.
88. Ivicsics, L., Hidromechanikai modellkísérletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
89. Jaeger, Ch., Hydraulique technique. Paris, Dunod, 1954.
90. Jeppson, R. W., Seepage from Ditches—Solution by finite Differences. In: Journal of Hydraulics Division, Proceedings

- ASCE, vol. 94, HY 1, 5763, Jan. 1968. pag. 259-283.
91. Jeppson, R. W., Free Surface Flow through heterogeneous porous media. In: Journal of Hydraulics Division, Proceedings ASCE, HY 1, 1969, PP6364, pag. 363-381.
92. Jura, C., Giurconiu, M., Studiul mișcării apei la îmbogățirea stratelor acvifere cu nivel subpresiune cu aplicare în practica lucrărilor de captare. In: Buletinul Stiințific și Tehnic, IPT, Tom 1/15/, Fasc. 1, Ianuarie-Iunie, 1956, pag. 291-302.
93. Jura, C., Curs de alimentări cu apă, canalizări și instalații hidroedilitare, Institutul Politehnic Timișoara, 1967.
94. Jura, C., Concepții actuale în realizarea lucrărilor hidroedilitare de capacitate mică. In: Hidrotehnica, vol. 13, nr. 10, București, 1968
95. Jura, C., Alimentări cu apă. Capitole speciale. Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1974.
96. Kaltagova, K. G., Korenev, V. M., Determinarea pierderilor de apă prin infiltrație cu ajutorul hidrintegratorului. In: Ghidrotehnika i Meliorația, nr. 1/1963, pag. 22-30.
97. Kaden, St., Luckner, L., Quast, I., Praktische Beispiele der digitalen Berechnung von Grundwasserströmungsproblemen nach der Methode der endlichen Elemente. In: Neue Bergbautechnik, Leipzig, 3 Jahrgang, 1973, Heft 6.
98. Kaden, St., Anwendung der elektronischen Datenverarbeitung in der Geohydraulik. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul, 25, 1975, nr. 9, pag. 311-316.
99. Kellner, P., Ivan, C., Studiul aportului subteran într-o unitate îndiguită din lunca Dunării. In: Hidrotehnica, vol. 16, nr. 5, București, 1971, pag. 236-242.
100. Kellner, P., Citeva probleme de actualitate privind infiltrațiile din canalele de irigații. In: Hidrotehnica, vol. 17, nr. 5, București, 1972, pag. 263-270.
101. Kézdi, A., Markó, I., Erdbauten, Standsicherheit und Entwässerung. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1969.
102. Kepp, I., Die Bestimmung von Grundwasserschutz-zonen. In: Gas, Wasser, Abwasser, vol. 52, nr. 6, 1972, pag. 170-171.
103. Kotczkowsky, St., Spandovska, S., Über Künstliche Grundwasseranreicherung. In: Östreichische-Wasserwirtschaft, 24, nr. 11/12, nov-dec, 1972, pag. 238-246.

104. Kovács, Gy., Caracteristici hidraulice ale infiltrațiilor permanente din canalurile de irigații cu nivel crescut. In: Studii de geotehnică, fundații și construcții hidrotehnice, vol. VII, 1964, ISCH, București.
105. Kovács, Gy., A szivárgók környezetében kialakuló nem permanens vízmozgás jellemzőinek gyakorlati meghatározása. In: Hidrológiai Közlöny, nr. 10, Budapest, 1967, pag. 433-443.
106. Kovács, Gy., Aszivárgási tényező értelmezése és meghatározása, a szivárgást befolyásoló talajfizikai jellemzők. In: Tanulmányok és kutatási eredmények, VITUKI, Budapest, 1972.
107. Kovács, Gy., A szivárgás hidraulikája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972.
108. Kozeny, J., Hidraulik, Springer, Wien, 1953.
109. Lacher, H., Theorie des Freispiegelabflusses durch grobporöse Schüttungen. In: Die Bautechnik, nr. 1, 1975, pag. 22-24.
110. Laczkó, A., A kutak egymásra hatásának meghatározása. In: Vízügyi Közlemények, nr. 1, Budapest, 1974, pag. 128-129.
111. Lateș, M., Idei greșite în hidrologie și urmările lor. In: Hidrotehnica, vol. 15, nr. 10, București, 1970, pag. 546-548.
112. Léczfalvy, S., Partiszűrészű és dúsító víztermelő rendszerek hidraulikai méretezése néhány egyszerűbb esetben. In: Hidrológiai Közlöny, vol. 51, Budapest, 1971, nr. 3, pag. 123-133.
113. Lege pentru adoptarea planului național unic de dezvoltare economico-socială a RSR pe perioada 1976-1980. In: România Liberă, nr. 9857/3 iulie 1976.
114. Levin, A. K., Utilizarea apelor de infiltrație din zona canalelor de irigații pentru alimentarea cu apă potabilă. In: Ghidrotehnica și Meliorația, nr. 1/1962, pag. 41-48.
115. Lin, Ch. L., Digital Simulation of the Boussinesq Equation for a Water Table Aquifer. In: Water Resources Research, vol. 8, nr. 3, 1972, pag. 691-698.
116. Louda, K., Die künstliche Infiltration und deren allgemeine Behandlung. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 12, 1962, nr. 7, pag. 303-304.
117. Löffler, H., Zur Technologie und Wassergütenverbesserung bei der Grundwasseranreicherung. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 17, 1967, nr. 10, pag. 351-354.
118. Löffler, H., Einfluss standortgebundener Faktoren auf die

- Wassergutveränderung bei Grundwasseranreicherung. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 18, 1968, nr. 7, pag. 223-234.
119. Löffler, H., Technologie und Wassergüteverbesserung bei der Grundwasseranreicherung. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 18, 1968, nr. 7, pag. 238-244.
120. Löffler, H., Pietsch, W., Huhn, W., Erhöhung der Grundfonseffektivität durch Grundwasseranreicherung, weitere Ergebnisse zur Einsatz, Technologie und Bemessung. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 23, 1973, nr. 6, p 200-204, și nr. 8, p 267.
121. Lörinczi, E., Boden, H., Cercetări privind epurarea biologică cu plante acvatice superioare a apelor uzate de la spălarea gazelor de furnal. In: Hidrotehnica, vol. 18, nr. 2, București, 1973, pag. 88-94.
122. Luckner, L., Eichorn, D., Bornitz, U., Berechnung von Brunnen-galerien mit Heberleitungen. In: Wasserwirtschaft-Wasser-technik, anul 21, 1971, nr. 10, pag. 351-359.
123. Luckner, L., Peukert, D., Löffler, L., Beitrag zur Berechnung des durch Sickergräben, Brunnenreihen oder Dränleitungen gewinnbare Infiltrats aus Oberflächengewässern. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 19, 1969, nr. 5, pag. 167-174.
124. Lühr, H. P., Zur numerischen Lösung von Grundwasserströmungsproblemen. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 60 Jahrgang, Heft. 7, Sept, 1970, pag. 238-240.
125. Lühr, H. P., Stenzel, U., Zipfel, K., Die Zuströmung zur Senken in diskretisierten Grundwassermodellen. In: Die Wasserwirtschaft, 62 Jahrgang, Heft. 12, Dezember, 1972, pag. 371-374.
126. Mănescu, A., Nimereală, I., Blitz, E., Exploatarea captărilor din ape subterane. Editura Tehnică, București, 1973.
127. Mateescu, Cr., Hidraulica. Ed. didact. și ped. București, 1963.
128. Karotz, G., Possibilități de acumulare a apei în terenul natural. In: Die Wasserwirtschaft, 59, nr. 5, 1969, pag. 127-131.
129. Martin, H. C., Graham, F., Introduction to Finite Element Analysis Theory and Application. Mc Graw-Hill Book Company, New-York, 1973.
130. Melzer, A., A talajvizmozgás vizsgálatával kapcsolatos kisintakísérletek problémái. In: Hidrológiai Közlemény, Budapest, 1958, nr. 5.

131. Milde, G., Mollweide, H., Hydrologische Faktoren bei Grundwasserverunreinigung. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 20, 1970, nr. 7, pag. 234-237.
132. Mocanu, D., Fenomenul moiré și aplicațiile lui în tensometrie. Editura Tehnică, București, 1973.
133. Morușcă, I., Contribuție la studiul îmbogățirii straturilor acvifere prin bazine de infiltrare. Teză de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1978, Conducător științific Prof. Dr. Ing. Jura, C.,
134. Nagy, J. V., Karádi, G., Untersuchungen den Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Darcy. In: Österreichische Wasserwirtschaft, Heft 12, 1961, pag. 281-287.
135. Negulescu, M., Captarea apelor subterane. Editura Tehnică, București, 1960.
136. Negulescu, M., Un procedeu rapid pentru determinarea coeficientului de permeabilitate al straturilor acvifere pe baza rezultatelor obținute în timpul probei de pompare. In: Hidrotehnica, vol. 8, nr. 1, București, 1962, pag. 20-23.
137. Nicoară, Tr., Hidraulică teoretică și aplicată. Indreptar de lucrări de laborator. Inst. Polit. "Tr. Vuia" Timișoara, 1978.
138. Oden, I. T., Somogyi, D., Finite element in an applications in fluid dynamics. In: Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings ASCE, vol. 95, nr. EM3, 6584, 1969, p. 821-826.
139. Ott, R., Gewässerschutz in Schutz-und Schöngelieten. In: Gas, Wasser, Wärme, Wien, aprilie 1971, pag. 7173.
140. Öllös, G., Elektromos és membrán analógia alkalmazása a kutak hidraulikai vizsgálatánál. In: Vízügyi Közlemények, Budapest, 1956, nr. 3, pag. 383-385.
141. Öllös, G., A talajvízdúsítás fokozódó szerepe. In: Vízügyi Közlemények, Budapest, 1970, nr. 1.
142. Pascu, M., Stelea, V., Cercetarea apelor subterane. Editura Tehnică, București, 1968.
143. Párizs, E., A talajvízdúsítás néhány külföldi példája. In: Vízügyi Közlemények, Budapest, nr. 1, 1961, pag. 76-91.
144. Párizs, E., Vízminőségjavítás talajvízdúsítással. "Vízminőségi és víztechnológiai Kongresszus" Budapest, 1970.
145. Perlea, V., Dispozitiv pentru măsurarea pierderilor de apă prin infiltrații din canalurile de irigații. In: Studii de

- Geotehnică, Fundații și Constr. hidrotehnice, ISCH, București, vol VIII, 1964, pag. 137-157.
146. Peter, V., Vergleich von Gleichgewicht- und Ungleichgewichtsmethoden für die Berechnung von Grundwasserschöpfanlagen. In: Das Gas und Wasserfach, 1961, Heft. 48, Pag. 1319-1320.
147. Pietraru, V., Cu privire la infiltrația nepermanentă prin medii permeabile stratificate. In: Studii de Geotehnică, Fundații și Constr. hidroteh. ISCH, București, vol. VIII, 1964.
148. Pietraru, V., Influența neomogenității terenului asupra regimului infiltrației și denivelării apei în puțuri. In: Hidrotehnica, vol. 15, nr. 5, București, 1970, pag. 249-255.
149. Pietraru, V., Calculul infiltrațiilor. /ediția II-a/. Editura Ceres, București, 1977.
150. Pietraru, V., Drobot, R., Aplicații ale modelelor matematice pentru studierea resurselor de apă subterană. In: Hidrotehnica, vol. 24, nr. 4, București, 1979, pag. 73-76.
151. Pietraru, V., Drobot, R., Model matematic pentru evaluarea alimentării naturale a pânzelor de apă freatică. In: Hidrotehnica, vol. 25, nr. 8, București, 1980, pag. 175-178.
152. Pietraru, V., Drobot, R., Determinarea debitului potențial al straturilor acvifere granulare prin programare liniară. In: Hidrotehnica, vol. 25, nr. 12, București, 1980, p. 268.
153. Pislărașu, I., Rotaru, N., Teodorescu, M., Alimentări cu apă. Editura Tehnică, București, 1970.
154. Plenara comună a CC al PCR și a Consiliului Suprem al Dezvoltării Economice și Sociale a României din 21-22 iulie 1975. Editura Politică, București, 1975.
155. Pogány, A., Considerații asupra parametrilor caracteristici a procesului de îmbogățire artificială a straturilor acvifere subterane, Seminarul Național de Hidraulică, Timișoara, 1973.
156. Pogány, A., Considerații asupra unei analogii hidrodinamico-elastice privind studiul mișcării apelor subterane. Referat, 1975, Catedra CHIP IPTV Timișoara.
157. Pogány, A., Unele aspecte privind fenomenul de infiltrație din canale în zona subterană. In: Hidrotehnica, vol. 26, nr. 3, București, 1981, pag. 65-69.
158. Pogány, A., Tendințe și orientări actuale pentru

- rezolvarea problemelor mișcării apei prin medii poroase. In: Hidrotehnica, vol. 27, nr. 5, București, 1982, pag. 149-153.
159. Polubarinova-Kocina, P., Teoria dvijenii gruntovih vod. Gostehizdat, Moscova, 1952.
160. Programul PCR de făurire a societății socialiste multilateral dezvoltate și înaintare a României spre comunism. Editura politică, București, 1974.
161. Programul Directivă de cercetare științifică și dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnic în perioada 1981-1990 și direcțiile principale până în anul 2000. Editura politică, București, 1979.
162. Quast, J., Luckner, L., Beitrag zur indirekten hydrologischen Erkundung durch Simulation des Grundwasserströmungsfeldes. In: Wasserwirtschaft-Wassertechnik, anul 21, 1971/10, p. 342-345.
163. Quast, J., Müller, G., Untersuchungen der regionalen Grundwasserströmung in Orderbruch. WWT, anul 23, 1973/7, p. 235-241.
164. Rechenberg, W., Versuche zur Verbesserung der Qualität von künstlich angereicherten Grundwasser durch Verwendung von Vorfiltern. In: WWT, anul 19, 1969, nr. 9, pag. 326-327.
165. Reinhold, D., Grundwasserbewirtschaftung in der Dresdner Elbtalwanne. In: WWT, anul 25, 1975, nr. 12, pag. 400-403.
166. Remson, J., Hornberger, G. M., Molz, F. J., Numerical methods in subsurface hydrology-With an introduction to the finite element method. Wiley Interscience, New-York, 1971.
167. Roller, B., Nagy, T., György, J., Szivárgási áramképek vizsgálata véges elemek módszerével. In: Hidrológiai Közlöny, Budapest, 1976, nr. 2, pag. 78-81.
168. Rowntree, N., Problema alimentărilor cu apă în viitor. In: Water and Water Engineering, 72, nr. 874, dec 1968, p. 505-510. Prelucrare în Inform. și doc. selectivă IDT București 1969.
169. Rusu, O., Gall, Tr., Probleme moderne ale rezistenței materialelor. Editura Tehnică, București, 1971.
170. Rusu, C., Blaga, O., Filotti, A., Programul național de perspectivă pentru amenajarea basinelor hidrografice, baza politicii de gospodărire a apelor în România. In: Hidrotehnica, vol. 21, nr. 6, București, 1976, pag. 123-125.
171. Salvadori, M., Baron, M., Metode numerice în tehnică. Edit. Tehnică, București, 1972.

172. Samanski, V. E., Cislencoe rešenie zadaci filtrații grunтовih vod na Etm. Kiev, Izd. Naukova dumka, 1969.
173. Scelkacev, V. N., Lapuk, B., Hidraulica subterană / traducere din l. rusă / Editura Tehnică, București, 1953.
174. Scheidegger, A. E., The Physics of Flow Through Porous Media. University of Toronto Press, 1963.
175. Schmassmann, H., Künstliche Grundwasseranreicherung. In: Gas, Wasser, Abwasser, vol. 52, nr. 5, 1972, pag. 125-140.
176. Schneebeil, G., Hydraulique souterraine. Eyrolles, Paris, 1966.
177. Schoeller, H., Les eaux souterraines. Mason, Paris, 1962.
178. Schröter, K., Zur Berechnung des unvollkommenen Brunnens. In: WWT, anul 16, nr. 4, pag. 114-121.
179. Serbănescu, L., Constantinescu, T., Tomescu, G., Roman, Z., Metode de evaluare a resurselor exploatabile de ape subterane. In: Studii de hidrogeolog. vol IV, 1966, ISCH, p133-186.
180. Serbănescu, L., Roman, Z., Alimentarea artificială a straturilor acvifere prin bazine de infiltrație. In: Studii de hidrogeologie, vol. V, 1967, ISCH București, pag. 65-109.
181. Simionescu, N., Serbănescu, L., Determinarea eficienței infiltrațiilor artificiale în zona de captare Luduș și a resurselor de apă subterană din zona conului aluvionar Prahova-Teleajen, prin metoda analogiilor electrohidrodinamice. In: Studii de hidrogeolog. vol. IV, 1966, ISCH, p93-118.
182. Sosnovsku, P., Optimierung der Parameter hydrologischer Modelle. In: WWT, anul 21, 1971, nr. 8, pag. 265-270.
183. Staicu, C. I., Analiza dimensională generală. Editura Tehnică, București, 1976.
184. Stanley, E. N., Recharge characteristic of watercourse aquifer. In: Ground Water SUA, ian-febr, 1971, pag. 30-40.
185. STAS 4621-79. Hidrogeologie. Terminologie.
186. Székely, P., A talajvíz függőleges vízforgalmának és a szivárgási paraméterének meghatározása talajvízésszélelési adatok alapján. In: Hidrológiai Közlöny, Budapest, 1973, nr. 5.
187. Szöllösi, A., Găinaru, I., Szabó, A., Influența îmbogățirii artificiale a apei freatice cu apă de suprafață asupra calității apei la o instalație centrală de alimentare cu apă. In: Hidrotehnica, vol. 17, nr. 8, București, 1972, p431-438.
188. Takács, S., Andrik, P., Talajviszúsítás hatása a kutvizek

- bakteorológiai állapotára. In: Hidrológiai Közlöny, Budapest, 1975, nr. 1, pag. 43-36.
189. Taylor, R. L., Brown, G. B., Darcy flow solutions with a free surface. In: Journal of the Hydraulic Division, Proceedings A SCE, Hy. 2, vol. 93, No. HY 2, mar. 1967, pag. 23-33.
190. Tetelbaum, I. M., Elektrische Analogierechenverfahren, VEB Verlag Technik Berlin, 1963.
191. Tiemer, K., Glugla, G., Müller, G., Penkert, D., Zum stand der Modellierung geohydrologischer Prozesse. In: WWT 1972/9, p. 297-299
192. Tiemer, K., Bamberg, F. H., Beims, U., Standardisierung der Pumpversuchsauswertung. In: WWT 1974 nr. 3, pag. 106-110.
193. Tihonova, K. A., Acumularea de apă subterană regularizată pentru irigații. In: Hidrotehnica și meliorația 1971/5, p. 31-41.
194. Todoran, I., Tratatul matematică a datelor experimentale. Editura Academiei RSR, București, 1976.
195. Trelease, I. I., Bittinger, M. W., Mechanics of a mathematical groundwater model. In: Journal of the Irrigation and Drainage Division. Proceedings ASCE, IR 1, 1963, PP 3461, pag. 51-62.
196. Trofin, E., Pietraru, V., Cu privire la calculul analitic al sistemului de drenaj frontal. In: Studii de geotehnică, fundații și constr. hidr. vol. VII, 1964, ISCH, București, pag. 3-32.
197. Trofin, E., Pietraru, V., Probleme de calcul hidraulic al drenajului frontal cu puțuri în condițiile luncii Dunării. In: Hidroteh. Gosp. Apelor, Met. vol. 10, nr. 3, București, 1965 pag. 113
198. Trofin, E., Hidraulica specială. Inst. Constr. București, 1970.
199. Trofin, P., Mănescu, A., Mărirea gradului de siguranță a debitului la captările de apă infiltrate prin mal. In: Hidrotehnica, Gosp. Apelor, Met. vol. 10, nr. 8, august, București, 1965, p. 403-409
200. Trofin, P., Dezvoltarea alimentărilor cu apă potabilă în România. In: Hidrotehnica, vol. 19, nr. 7, București, 1974, pag. 316-320.
201. Trofin, P., Alimentări cu apă. Ed. Did. și Ped. București, 1974.
202. Truelsen, Ch., Hydrologische Notizen für den Brunnenbau. In: Das Gas und Wasserfach, München, 1961, vol. 46, pag. 1256-1261.
203. Tudor, I., Sandu, G., Albescu, I., Gospodărirea apelor în Israel. In: Hidrotehnica, vol. 16, nr. 7, București, 1971, pag. 387-390.
204. Uhlig, D., Die Sickerlinie im wasserseitigen Stützkörper von Staudämmen bei Stauspiegelsenkung. In: WWT 1962/5, pag. 216-219.
205. Vaida, D., Programarea calculatoarelor electronice. Editura

Academiei RSR, 1967.

206. Voinescu, V., Congresul al IX-lea al Asociației Internaționale de Distribuție a Apei. Comunicare. In: Hidrotehnica, vol. 17, nr. 5, București, 1972, pag. 288.
207. Wechmann, A., Hydraulik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1966.
208. Wehry, A., Desecări. Inst. Politehn. "Tr. Vuia" Timișoara, 1975.
209. Worthing, G., Gefner, G., Prelucrarea datelor experimentale. Editura Tehnică, București, 1959.
210. Zaharescu, E., Căpriță, D., Danchiv, A., Studiu schematic asupra condițiilor de drenaj în depresiunea Rădăuți. In: Hidrotehnica, vol. 19, nr. 6, București, 1974, pag. 262-269.
211. Zbegan, V., Jura, C., Probleme ale utilizării resurselor de ape subterane. Seminarul Național de Hidraulică Timișoara, 1973.
212. Zee, C. H., Peterson, D. F., Bock, R. O., Flow into a well by electric and membrane analogy. In: Journal of the Hydraulic Division, Proceedings ASCE nr. 817, oct. 1955, pag. 1088-1108.
213. Zienkiewicz, O. C., Mayer, P., Cheung, Y. K., Solution of anisotropic seepage by finite elements. In: Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings ASCE, Em 1, 1966, febr., pag. 111-120.
214. Zienkiewicz, O. C., Cheung, Y. K., The finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, Mc. Graw-Hill, Publ. Co., Ltd., London, 1968.
215. Zienkiewicz, O. C., The finite Element Method in Engineering Science. Mc. Graw-Hill, Publ. Co., Ltd., London, 1971.
216. Zienkiewicz, O. C., Introductory lectures on the finite Element Method. Springer Verlag, 1972.

B I B L I O G R A F I E S U P L I M E N T A R A

217. Bischoff, H., Method of charged boundaries. XVI-th Congress of the International Association for Hydraulic Research. Sao-Paulo, Brazil, 1975.
218. David, I., Grundwasserfassungsanlagen mit Filterrohren. Technischer Bericht Nr. 19 an den Institut für Hydraulik und Hydrologie der Technischen Hochschule Darmstadt, 1977.
219. Bischoff, H., Die Berechnung von Potentialfeldern mit der Randintegralmethode dargestellt am Beispiel der ebenen

stationären Grundwasserbewegung. Technischer Bericht Nr.18 an den Institut für Hydraulik und Hydrologie der Technischen Hochschule Darmstadt,1977.

220. Gerdes, H., Lacher, H., Die Berechnung Dreidimensionaler Grundwasserströmung mit mitteln der ebenen Potentialtheorie. Technischer Bericht Nr.29 an den Institut für Hydraulik und Hydrologie der Technischen Hochschule Darmstadt,1982 II-II4.

221. Söhngen, B., Bischoff, H., Lacher, H., Die Berechnung der Ergiebigkeit von Drainagsystemen in Horizontal Ausgedehnten Grundwasserleitern. Technischer Bericht Nr.29 an den Institut für Hydraulik und Hydrologie der Technischen Hochschule Darmstadt,1982 M1-M39.