

# **CONTRIBUȚII LA STUDIUL COMPORTĂRII ÎN EXPLOATARE A BARAJELOR CU ACUMULĂRI NEPERMANENTE ÎN VARIANTA TRANSFORMĂRII ÎN ACUMULĂRI PERMANENTE**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul INGINERIE CIVILA  
de către

**ing. Marius Lucian Botoș**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing Gheorghe Popa  
prof.univ.dr. Dan Stematiu  
conf.univ.dr.ing. Ioana Popescu  
prof.univ.dr. Aurora Mancia

Ziua susținerii tezei: 22.05.2015

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Automatică                               | 10. Știința Calculatoarelor                |
| 2. Chimie                                   | 11. Știința și Ingineria Materialelor      |
| 3. Energetică                               | 12. Ingineria sistemelor                   |
| 4. Ingineria Chimică                        | 13. Inginerie energetică                   |
| 5. Inginerie Civilă                         | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică                      | 15. Ingineria materialelor                 |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management                |
| 8. Inginerie Industrială                    | 17. Arhitectură                            |
| 9. Inginerie Mecanică                       | 18. Inginerie civilă și instalații         |

Universitatea Politehnica din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2015

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Prezenta lucrare a fost elaborată pe parcursul programului de doctorat fără frecvență susținut în Departamentul Hidrotehnica al Facultății de Construcții din cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara. Perioada desfășurării programului doctoral noiembrie 2003- octombrie 2013.

Teza abordează un subiect de maxim interes cu privire la comportarea în exploatare a barajelor cu acumulări nepermanente în condițiile schimbării folosințelor și permanentizării acumulării. Studiul se concentrează pe baraje mici omogene din pământ. Stabilitatea taluzelor este calculată considerând infiltrațiile prin corpul barajelor în regim nepermanent și considerând materialul constituent în stare nesaturată.

Programul de doctorat s-a desfășurat sub conducerea domnului prof. dr. ing. Gheorghe Popa. În calitate de conducător de doctorat, domnul profesor mi-a oferit cu profesionalism sprijin pentru a finaliza lucrarea. Am beneficiat de o îndrumare deosebită în ceea ce privește selectarea literaturii de specialitate adecvată, realizarea referatelor din cadrul doctoratului și parcurgerea etapelor de cercetare care au dus la atingerea scopurilor propuse. Pentru toate acestea îi aduc calde mulțumiri.

Sincere mulțumiri aduc membrilor comisiei pentru modul competent de parcurgere a tezei de doctorat și pentru întocmirea referatelor.

Doresc, de asemenea, să aduc mulțumiri domnului prof. dr. ing Ion Michael, domnului prof. dr. ing. Cosmin Chiorean și domnului conf. dr. ing Dorin Vingan, ale căror sfaturi au contribuit la soluționarea unor problemele apărute pe parcursul elaborării tezei de doctorat.

Mulțumesc conducerii Facultății de Construcții din Universitatea Tehnică din Cluj Napoca pentru facilitarea deplasărilor la conferințe, în vederea susținerii unor lucrări științifice. Le sunt recunoscător colegilor din Departamentul Mecanica construcțiilor pentru sprijinul primit pe parcursul elaborării tezei.

Nu în ultimul rând, recunoștința mea se îndreaptă spre familia mea care a dat dovadă de înțelegere, suport, dragoste și multă răbdare în timpul desfășurării programului doctoral.

Timișoara, mai 2015

ing. Marius Lucian Botos

Familiei.

Botoș, Marius Lucian

**Contribuții la studiul comportării în exploatare a barajelor cu acumulări nepermanente în varianta transformării în acumulări permanente**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 133, Editura Politehnica, 2015, 197 pagini, 100 figuri, 87 tabele.

Cuvinte cheie: baraje mici, infiltrații nepermanente, pământuri nesaturate, stabilitate.

Rezumat:

Teza abordează o serie de aspecte legate de comportarea în exploatare a barajelor cu acumulări nepermanente în ipoteza transformării lor în baraje cu acumulări permanente. Principalele aspecte studiate sunt legate de infiltrațiile prin corpul barajelor din pământ. Aceste acumulări sunt caracterizate de variații bruște de nivel cu implicații directe asupra modului în care masivele de pământ reacționează. Sunt studiate și comparate moduri de comportare a barajelor în majoritatea ipotezelor de exploatare. În vederea rezolvării infiltrațiilor plane nepermanente prin medii nesaturate au fost scriși o serie de algoritmi, iar pentru parametri ce influențează infiltrațiile prin medii nesaturate au fost folosite metode de estimare ce țin cont de distribuția și dimensiunea porilor. Rezultatele obținute sunt folosite în vederea comparării stabilității locale în diferite ipoteze de exploatare a acumulărilor.



**CUPRINS**

Cuprins	5
Lista tabele	9
Lista abrevierilor și a notațiilor	11
Introducere	13
1. Baraje din pământ	17
1.1. Clasificarea barajelor din pământ	17
1.2. Situația barajelor mici din România	22
1.3. Condiții de lucru	26
1.4. Proiectarea coronamentului	27
1.5. Predimensionarea taluzelor la baraje din pământ	28
1.6. Protejarea taluzelor	32
1.7. Etanșeizarea corpului barajului	34
1.8. Tratarea terenurilor de fundare	35
1.9. Drenuri și filtre	37
2. Calculul infiltrațiilor prin metode clasice	39
2.1. Legea lui Darcy	40
2.2. Calculul infiltrațiilor folosind spectrul hidrodinamic la terenuri omogene	41
2.3. Calculul infiltrațiilor folosind spectrul hidrodinamic la terenuri neomogene	42
2.4. Forte de antrenare la curgerea apei prin medii poroase	44
2.5. Calculul infiltrațiilor la baraje fundate pe terenuri impermeabile	45
2.5.1. Metoda Dupuit	45
2.5.2. Metoda Schaffernak	46
2.5.3. Metoda Casagrande	47
2.5.4. Metoda Pavlovsky	49
2.6. Calculul infiltrațiilor prin baraje fundate pe terenuri impermeabile de grosime finită	50
2.7. Calculul infiltrațiilor prin baraje anizotropice	51
2.8. Trasarea curbei de infiltrație la baraje de pământ	51
3. Ecuațiile mișcării apei prin medii poroase	53
3.1. Ecuațiile mișcării permanente	53
3.2. Ecuațiile mișcării nepermanente	55
3.3. Parametri ce influențează curgerea prin medii poroase	58
3.3.1. Mișcarea permanentă prin medii saturate	58
3.3.2. Mișcarea permanentă prin medii nesaturate	60
4. Calculul infiltrațiilor prin metoda elementului finit	68
4.1. Reguli generale folosite pentru discretizarea domeniului	69
4.2. Reguli pentru dispunerea nodurilor	71
4.3. Dimensiunea, forma și a plasamentului elementelor	73
4.4. Definirea condițiilor de margine	75
4.5. Obținerea ecuațiilor de aproximare. Metoda reziduurilor ponderate	76
4.6. Tipuri de mișcare prin medii poroase	77
4.6.1. Mișcarea permanentă prin medii saturate	77
4.6.2. Mișcarea permanentă prin medii nesaturate	80
4.6.3. Mișcarea nepermanetă saturată	81
4.6.4. Mișcarea nepermanentă prin medii nesaturate	83
4.7. Calculul matricei caracteristice elementare	84
4.8. Modificarea sistemului global de ecuații prin incorporarea condițiilor de margine. Condiții de margine Dirichlet	87
4.9. Rezolvarea sistemelor de ecuații	87
4.9.1. Metoda Choleski pentru matrici asimetriche	88

4.9.2. Metoda Choleski pentru matrici pătratice simetrice	88
4.10. Rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare	89
4.10.1. Metoda Picard	90
4.10.2. Metoda Newton-Raphson modificată	91
4.11. Aplicarea metodei Choleski pentru rezolvarea mișcării apei subterane	91
4.11.1. Mișcare permanentă prin medii saturate	91
4.11.2. Mișcare nepermanentă prin medii saturate	91
4.11.3. Mișcare nepermanentă prin medii nesaturate	93
4.12. Algoritmi de calcul a mișcării nepermanente prin medii nesaturate	93
5. Studiul infiltrațiilor pentru baraje omogene din pământ	99
5.1. Calculul infiltrațiilor nepermanente la baraje omogene din pământ	99
5.1.1. Baraje omogene din argile grase "CH"	104
5.1.2. Baraje omogene din prafuri argiloase "MH"	108
5.1.3. Baraje omogene din argile nisipoase "CL"	111
5.1.4. Baraje omogene din nisipuri fine prăfoase "SM"	115
5.1.5. Baraje omogene din nisipuri fine argiloase "SC"	119
5.2. Evoluția curbei de infiltrații pentru barajele omogene din pământ	123
5.2.1. Evoluția curbei de infiltrații în timp pentru barajele omogene din pământ cu înălțimea de 2 m	124
5.2.2. Evoluția curbei de infiltrații în timp pentru barajele omogene din pământ cu înălțimea de 5 m	129
5.2.3. Evoluția curbei de infiltrații în timp pentru barajele omogene din pământ cu înălțimea de 10 m	134
6. Verificarea stabilității taluzelor la baraje omogene din pământ	141
6.1. Metode de analiză bazate pe echilibru limită	141
6.2. Metode care consideră suprafețe circulare de alunecare	143
6.2.1. Metoda Fellenius	144
6.2.2. Metoda Bishop simplificată	148
6.2.3. Metoda Bishop exactă	150
6.2.4. Metoda Bishop – Morgenstern	150
6.3. Calculul factorului de siguranță la baraje omogene din pământ	152
6.3.1. Baraj cu acumulare nepermanentă. Lac gol	152
6.3.2. Baraj cu acumulare permanentă. Lac cu nivelul apei la NNR. Mișcare cvasipermanentă	154
6.3.3. Baraj cu acumulare permanentă. Lac cu nivelul apei la valoarea maximă. Mișcare cvasipermanentă	155
6.3.4. Baraj cu acumulare nepermanentă. Lac cu nivelul apei la valoarea maximă. Mișcare nepermanentă în care se consideră creșterea nivelului apei de la 0 la NMAX	156
6.3.5. Baraj cu acumulare permanentă. Lac cu nivelul apei la valoarea maximă. Mișcare nepermanentă în care se consideră creșterea nivelului de la NNR la NMAX	157
6.3.6. Baraj cu acumulare permanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la NNR după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în mișcare cvasipermanentă la NMAX	158
6.3.7. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la o treime din înălțimea barajului, după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare de la 0 la NMAX	159
6.3.8. Baraj cu acumulare permanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la NNR după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare de la NNR la NMAX	160
6.3.9. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la 0 după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în mișcare cvasipermanentă la NMAX	161
6.3.10. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la 0, după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare a nivelului de la 0 la NMAX	161

6.3.11.Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la 0, după ce în corpul barajului nivelul	
7. Studiul comportării în timp a barajului de la Calinești oaș	164
7.1. Descrierea lucrării. Scurt istoric	164
7.2. Sistemul de supraveghere	165
7.3. Măsurarea înălțimii piezometrice la baraje din pământ	170
7.4. Monitorizarea și măsurarea parametrilor pentru zona nesaturată	176
7.5. Studiul comportării barajului Călinești Oaș la viiturile înregistrate	177
7.5.1.Viitura înregistrată în perioada 13.06.-22.06.1998	179
7.5.2.Viitura înregistrată în perioada 24.03.-9.04.2000	182
7.5.3.Viitura înregistrată în perioada 02.03.-12.03.2001	186
8. Concluzii și contribuții personale	190
8.1. Concluzii	190
8.2. Contribuții personale	191
8.3. Direcții pentru cercetări viitoare	192
Bibliografie	193
<b>LISTA FIGURI</b>	
Figura 1.1 Tipuri de baraje din pământ [85]	18
Figura 1.2 Tipuri de racordare a etanșării cu terenul impermeabil[85]	19
Figura 1.3 Soluții folosite pentru drenare [64]	20
Figura 1.4 Clasificarea barajelor după clase de risc [39]	21
Figura 1.5 Clasificarea barajelor propusa de ICOLD [54]	22
Figura 1.6 Baraje din categoria C și D în funcție de folosințe pe BH	22
Figura 1.7 Baraje cu acumulări nepermanente pe tipuri de soluții constructive	23
Figura 1.8 Baraje la nivel de BH pe clase de înălțimi	23
Figura 1.9 Situația la nivel BH în funcție de norma propusa de ICOLD	24
Figura 1.10 Baraje din categoriile C și D în funcție de numărul de folosințe	24
Figura 1.11 Baraje nepermanente funcție de tipul barajului	24
Figura 1.12 Baraje cu acumulări nepermanente funcție de înălțime	25
Figura 1.13 Clasificarea conform normelor ICOLD	25
Figura 1.14 Secțiuni propuse de normele japoneze [58]	30
Figura 1.15 Secțiuni propuse de normele din Cehia [54]	32
Figura 1.16 Protejarea taluzului amonte cu pereu [54]	34
Figura 2.1 Schema de baza a permeametrului	40
Figura 2.2 Spectru hidrodinamic	41
Figura 2.3 Detaliu tub de curent pentru terenuri omogene	41
Figura 2.4 Detaliu tub de curent pentru terenuri neomogene	43
Figura 2.5 Detaliu element supus forțelor de antrenare	44
Figura 2.6 Baraj omogen pe strat impermeabil. Metoda Dupuit	45
Figura 2.7 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apa în aval. Metoda Schaffernak	46
Figura 2.8 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apa în aval. Metoda grafica	47
Figura 2.9 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apa în aval. Metoda Casagrande	48
Figura 2.10 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apa în aval. Metoda Pavlovsky	49
Figura 2.11 Model de calcul al infiltrației pentru un baraj omogen pe strat permeabil.	51
Figura 2.12 Trasarea curbei de infiltrații pentru un baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apa în aval.	51
Figura 3.1 Detaliu mediu poros	53
Figura 3.2 Exemplu de curgere exclusiv prin zona saturata	58
Figura 3.3 Exemplu de curgere prin zona saturata și nesaturata [101]	61
Figura 3.4 Variația conținutului volumic de apa funcție de presiunea apei în pori	62
Figura 4.1 Aplicarea unidimensională a MEF	69
Figura 4.2 Aplicarea tridimensională a MEF	70
Figura 4.3 Tipuri de elemente folosite pentru discretizare în MEF	71
Figura 4.4 Put de extracție. Reducerea modelului de calcul	72
Figura 4.5 Erori în realizarea discretizării	72
Figura 4.6 Numerotarea nodurilor	73
Figura 4.7 Discretizare pentru terenuri neomogene	73

Figura 4.8 Discretizarea neomogena a domeniului	74
Figura 4.9 Reducerea dimensiunii modelului bazate pe simetrie	74
Figura 4.10 Metoda diferențelor finite	82
Figura 4.11 Elemente triunghiulare liniare	85
Figura 4.12 Instabilitatea soluției datorita factorului de relaxare mare	92
Figura 4.13 Stabilitatea soluției pentru factorul de relaxare 1	93
Figura 5.1 Reprezentarea grafica a curbei de infiltrații în timp	123
Figura 5.2 Reprezentarea grafica a distribuției presiunii apei în timp	123
Figura 6.1 Analiza în eforturi totale $\varphi_u = 0$ [74]	142
Figura 6.2 Forțele care acționează pe o fâșie a unui taluz[74]	143
Figura 6.3 Schema de calcul în metoda Fellenius	145
Figura 6.4 Construirea dreptei centrelor în metoda Fellenius	148
Figura 6.5 Forțele care acționează asupra fâșiei verticale	149
Figura 6.6 Metoda Bishop - Morgenstern	151
Figura 6.7 Model calcul stabilitate în ipoteza lac gol	153
Figura 6.8 Model calcul stabilitate în ipoteza nivel apa în lac la nivel normal de retenție	154
Figura 6.9 Model calcul stabilitate în ipoteza nivel apa în lac la nivel maxim. Mișcare cvasipermanenta	155
Figura 6.10 Model calcul stabilitate în ipoteza nivel apă în lac la nivel maxim. Mișcare nepermanentă liniară de la 0-NMAX	156
Figura 6.11 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la nivelul normal de retenție. Mișcare anterioară scăderii este considerată cvasipermanentă	158
Figura 6.12 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la nivelul normal de retenție. Mișcare anterioară scăderii este nepermanentă (de la 0 la NMAX)	159
Figura 6.13 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la 0. Mișcare anterioară scăderii este considerată cvasipermanentă	161
Figura 6.14 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la 0. Mișcare anterioară scăderii este nepermanentă (de la 0 la NMAX)	162
Figura 7.1 Plan de situație și profil longitudinal Călinești Oaș	167
Figura 7.2 Secțiuni de măsurare a infiltrațiilor la Barajul Călinești Oaș[32]	168
Figura 7.3 Secțiune tip piezometru Călinești Oaș [50]	169
Figura 7.4 Piezometre și puțuri de observație [28]	170
Figura 7.5 Timpul de răspuns a tipurilor de piezometre [102]	171
Figura 7.6 Put de observație [28]	172
Figura 7.7 Piezometru Casagrande [28]	173
Figura 7.8 Piezometru cu traductor pneumatic [28]	174
Figura 7.9 Senzor cu fir vibrant	174
Figura 7.10 Senzor tip TDS	176
Figura 7.11 Senzor cu disipator de căldura	177
Figura 7.12 Geometria modelului de calcul în secțiunea III	178
Figura 7.13 Evoluția curbei de infiltrații în timpul viiturii din 1998	179
Figura 7.14 Distribuția presiunii apei în pori 16.06.1998 (2)	179
Figura 7.15 Distribuția presiunii apei în pori 21.06.1998 (3)	180
Figura 7.16 Distribuția presiunii apei în pori 20.06.1998 (4)	180
Figura 7.17 Distribuția presiunii apei în pori 22.06.1998 (5)	180
Figura 7.18 Variația nivelurilor apei în lac și piezometre la viitura din 1998	180
Figura 7.19 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-5 la viitura din 1998	181
Figura 7.20 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-6 la viitura din 1998	181
Figura 7.21 Evoluția factorului de siguranță la viitura din 1998	182
Figura 7.22 Evoluția curbei de infiltrații în timpul viiturii din 2000	182
Figura 7.23 Distribuția presiunii apei în pori 01.04.2000 (1)	183
Figura 7.24 Distribuția presiunii apei în pori 04.04.2000 (2)	183
Figura 7.25 Distribuția presiunii apei în pori 05.04.2000 (3)	183
Figura 7.26 Distribuția presiunii apei în pori 07.04.2000 (4)	183
Figura 7.27 Variația nivelurilor apei în lac și piezometre la viitura din 2000	184

Figura 7.28 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-5 la viitura din 2000	185
Figura 7.29 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-6 la viitura din 2000	185
Figura 7.30 Evoluția factorului de siguranța la viitura din 2000	185
Figura 7.31 Evoluția curbei de infiltrații în timpul viiturii din 2001	186
Figura 7.32 Distribuția presiunii apei în pori 05.03.2001 (1)	186
Figura 7.33 Distribuția presiunii apei în pori 06.03.2001 (2)	186
Figura 7.34 Distribuția presiunii apei în pori 07.03.2001 (3)	186
Figura 7.35 Distribuția presiunii apei în pori 12.03.2001 (4)	187
Figura 7.36 Variația nivelurilor apei în lac și piezometre la viitura din 2001	188
Figura 7.37 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-5 la viitura din 2001	188
Figura 7.38 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-6 la viitura din 2001	188
Figura 7.39 Evoluția factorului de siguranța la viitura din 2001	189

### LISTA TABELE

Tabel 1.1 Clasificarea riscurilor potențiale[39]	21
Tabel 1.2 Lățimea coronamentului recomandat de normele americane [13]	27
Tabel 1.3 Lățimea coronamentului recomandat de normele franceze [17]	27
Tabel 1.4 Lățimea coronamentului calculate cu relația lui Lewis [64]	28
Tabel 1.5 Parametri secțiunilor transversale propuse în China[21]	28
Tabel 1.6 Secțiuni propuse de normele americane pentru baraje omogene[13]	29
Tabel 1.7 Secțiuni propuse de normele din SUA pentru baraje neomogene [13]	29
Tabel 1.8 Secțiunii propuse de normele din Australia [64]	30
Tabel 1.9 Secțiuni propuse de normele din Japonia [58]	31
Tabel 1.10 Secțiuni propuse de normele din Cehia[54]	31
Tabel 1.11 Grosimea protecției propuse de normele americane [13]	33
Tabel 1.12 Grosimea drenului filtrant	33
Tabel 1.13 Grosimea protecției propuse de normele franceze [95]	33
Tabel 1.14 Avantajele și dezavantajele soluțiilor de tratare a terenurilor de fundare [96]	36
Tabel 1.15 Criterii împotriva sufoziei folosite	37
Tabel 1.16 Criterii de filtrare [95]	38
Tabel 1.17 Criterii de uniformitate [95]	38
Tabel 1.18 Criterii de stabilitate [95]	38
Tabel 3.1 Coeficienți de corectare funcție de temperatura	59
Tabel 3.2 Valori orientative ale lui K pentru roci moi sau pământuri	60
Tabel 3.3 Valori orientative ale lui	60
Tabel 3.4 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru argile grase "CH"	64
Tabel 3.5 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru prafuri argiloase "MH"	65
Tabel 3.6 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru argile nisipoase "CL"	66
Tabel 3.7 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru Nisipuri fine prăfoase "SM"	66
Tabel 3.8 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru nisipuri fine argiloase "SC"	67
Tabel 4.1 Validarea rezultatelor obținute pentru baraje izotrope	97
Tabel 4.2 Validarea rezultatelor obținute pentru baraje anizotrope	98
Tabel 4.3 Validarea rezultatelor obținute pentru terenuri neomogene	98
Tabel 5.1 Pante ale taluzelor folosite la modelare	99
Tabel 5.2 Rezumatul parametrilor curgerii nepermanente prin medii nesaturate	100
Tabel 5.3 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 2 m și panta taluzelor de 1:3.5 și 1:2.5	101
Tabel 5.4 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 5 m și panta taluzelor de 1:3.5 și 1:2.5	101
Tabel 5.5 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 10 m și panta taluzelor de 1:3.5 și 1:2.5	102
Tabel 5.6 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 2 m și panta taluzelor de 1:3 și 1:2.5	102

---

Tabel 5.7 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 5 m și panta taluzelor de 1:3 și 1:2.5	102
Tabel 5.8 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 10m și panta taluzelor de 1:3 și 1:2.5	103
Tabel 5.9 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 2 m și panta taluzelor de 1:2.5 și 1:2	103
Tabel 5.10 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 5 m și panta taluzelor de 1:2.5 și 1:2	103
Tabel 5.11 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 10 m și panta taluzelor de 1:2.5 și 1:2	104
Tabel 5.12 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile grase H=2 m	104
Tabel 5.13 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile grase H=5 m	105
Tabel 5.14 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile grase H=10 m	106
Tabel 5.15 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din argile grase	107
Tabel 5.16 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din prafuri argiloase H=2 m	108
Tabel 5.17 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din prafuri argiloase H=5 m	109
Tabel 5.18 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din prafuri argiloase H=10 m	109
Tabel 5.19 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din prafuri argiloase	110
Tabel 5.20 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile nisipoase H=2 m	111
Tabel 5.21 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile nisipoase H=5 m	112
Tabel 5.22 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile nisipoase H=10 m	113
Tabel 5.23 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din argile nisipoase	114
Tabel 5.24 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine prăfoase H=2 m	115
Tabel 5.25 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine prăfoase H=5 m	116
Tabel 5.26 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine prăfoase H=10 m	116
Tabel 5.27 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din nisipuri prăfoase	117
Tabel 5.28 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine argiloase H=2 m	119
Tabel 5.29 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine argiloase H=5 m	119
Tabel 5.30 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine argiloase H=10 m	120
Tabel 5.31 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din nisipuri argiloase	121
Tabel 5.32 Timpii intermediari de calcul	124
Tabel 5.33 Evoluția curbei de infiltrații în timp la baraje de 2m	124
Tabel 5.34 Comparații procentuale în timp raportate la infiltrațiile permanente la baraje de 2 m	127
Tabel 5.35 Evoluția curbei de infiltrații în timp la baraje de 5 m	129
Tabel 5.36 Comparații procentuale în timp raportate la infiltrațiile permanente la baraje de 5 m	133
Tabel 5.37 Evoluția curbei de infiltrații în timp la baraje de 10 m	134
Tabel 5.38 Comparații procentuale în timp raportate la infiltrațiile permanente la baraje de 10 m	139
Tabel 6.1 Ipotezele simplificatoare pentru diferite metode de analiză[74]	144

Tabel 6.2 Factori minim de siguranța pentru taluzele barejelor în diferite ipoteze de exploatare[54]	147
Tabel 6.3 Valorile unghiurilor $\beta_1$ și $\beta_2$ (Popa A., 1987)[82]	147
Tabel 6.4 Coeficienții folosiți în calculul stabilității	152
Tabel 6.5 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 1	153
Tabel 6.6 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 2	154
Tabel 6.7 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 3	155
Tabel 6.8 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 4	156
Tabel 6.9 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 5	157
Tabel 6.10 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 6	158
Tabel 6.11 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 7	159
Tabel 6.12 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 8	160
Tabel 6.13 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 9	161
Tabel 6.14 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 10	162
Tabel 6.15 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 11	163
Tabel 7.1 AMC pentru solicitări exterioare	165
Tabel 7.2 AMC pentru comportarea construcțiilor și terenului de fundare	166
Tabel 7.3 Avantajele și dezavantajele diferitelor tipuri de piezometre [28]	175
Tabel 7.4 Parametri curgerii prin medii nesaturate	178
Tabel 7.5 Parametri geotehnici ai umpluturii și terenului de fundare	179

#### Lista abrevierilor și a notațiilor

$\alpha$	compresibilitatea
$\gamma$	greutatea volumică
$\varepsilon$	toleranța admisă
$\theta$	umiditatea
$\theta_r$	umiditatea reziduală
$\theta_s$	umiditatea un stare saturată
$\mu$	vâscozitatea absolută
$\rho$	densitatea apei
$\nu$	vâscozitatea cinematică a apei
$\sigma'$	efortul unitar normal efectiv
$\tau_f$	rezistența la forfecare
$\varphi'$	unghiul de frecare interioară efectiv
$\phi$	unghiul de frecare interioară
$\psi$	presiunea apei in pori
AMC	aparatura de măsură și control
c	coeziunea
c'	coeziunea efectivă
$C(\psi)$	capacitatea capilară
$[C^{(e)}]$	matricea elementară capacitivă
CH	argile grase
CL	argile nisipoase
$d_m$	diametrul cu cea mai mare frecvență din curba frecvențelor
$F_i^{(e)}$	debitul infiltrat în nodul „i”
G	greutatea

---

$h$	sarcina hidraulică
$i$	panta hidraulică (gradientul hidraulic)
$k_r$	coeficientul de permeabilitate relativă
$[K^{(e)}]$	matrice elementară de conductivitate
$[K]_{global}$	matrice globală de conductivitate
$K$	permeabilitatea intrinsecă
$k_x(\psi), k_y(\psi), k_z(\psi)$	componentele funcțiilor de permeabilitate
$M_a$	momentul forțelor de alunecare
MH	prafuri argiloase
$M_r$	momentul forțelor rezistente
$n$	porozitatea
$N_i^{(e)}, N_j^{(e)}, N_k^{(e)}$	funcții de interpolare
NMAX	nivel maxim al apei în lac
NNR	nivel normal de retenție
Q	debit
Re	numărul Reynolds
SC	nisipuri fine argiloase
$S_e$	gradul efectiv de saturare
SM	nisipuri fine prăfoase
$S_s$	capacitatea de înmagazinare specifică
$T_i$	forța tangențială la suprafața de alunecare
UCC	urmărirea comportării construcțiilor
USC	unified soil classification
$v$	viteza medie
$v_x, v_y, v_z$	componentele vitezei aparente



## INTRODUCERE

Barajele sunt construcții cu durată de viață foarte lungă, care presupun pentru realizare și exploatare investiții importante din partea beneficiarilor. Dacă ne referim la baraje cu acumulări nepermanente ce au fost sau vor urma să fie permanentizate, vorbim despre baraje de mici dimensiuni din pământ, cu funcționare cât mai liberă, iar numărul de folosințe prevăzute, în cele mai multe cazuri, nu sunt întotdeauna generatoare de importante beneficii financiare. Tocmai din acest motiv proiectarea, execuția și exploatarea acestor baraje trebuie să permită eficientizarea acestor tipuri de investiții.

Economicitatea și siguranța lor sunt cele două elemente fundamentale de care se ține seama la proiectarea, execuția, exploatarea, dar mai ales la finanțarea unor noi investiții ce presupun construirea barajelor și a construcțiilor hidrotehnice în general.

În faza de proiectare se fac numeroase ipoteze simplificatoare și se acceptă o serie de aproximații pentru a se putea efectua calcule cu privire la infiltrații și stabilitatea locală a taluzelor, iar în execuție intervin numeroase modificări și fenomene noi ale căror efecte nu mai pot fi determinate prin metodele de calcul.

Cunoașterea în detaliu a soluțiilor constructive ce pot fi adoptate, a modului în care se comportă și a felului în care trebuie să răspundă în exploatare un baraj, sunt aspecte importante pentru a putea demara și încununa cu succes o investiție ce presupune permanentizarea unei acumulări la baraje deja existente.

Un exemplu concludent și foarte cunoscut de la noi din țară este barajul de la Vârșolț. Conceput inițial ca un baraj cu acumulare nepermanentă, proiectul a fost modificat din mers, și astfel, în două etape, barajul a devenit cu acumulare permanentă. Important de menționat este că barajul nu a funcționat nici o clipă cu acumulare nepermanentă.

„Execuția lucrărilor s-a făcut în perioada 1977-1979 în două etape:

- etapa I: devierea apelor râului Crasna, terasamente în corpul barajului, până la cota 234,50 pe tronsonul situat pe malul drept al râului Crasna, prismul drenant de la piciorul aval al barajului, turnul de manevră, galeria de golire și galeria de aducțiune;

- etapa II: terasamente în corpul barajului, descărcătorul de suprafață, lucrări de protecție sanitară, aparatura de urmărire a comportării în timp a acumulării, digurile de apărare a localității Crasna, amenajarea versantului drept, pereu din anrocamente pe taluzul amonte al barajului.

În exploatarea acumulării s-au constatat următoarele deficiențe:

- funcționarea necorespunzătoare a echipamentului hidromecanic la turnul de manevră, existând posibilitatea blocării stavilei în poziția deschisă;
- infiltrații prin pereții turnului de manevră și a galeriei de golire cauzate de degradarea betoanelor;
- tasarea inegală a galeriei de golire, până la 55 cm în zona centrală;

- corodarea conductei de aducțiune;
- la nivel normal de retenție (240,00 mdM), s-au semnalat niveluri piezometrice ridicate cu 1,50-3,50 m peste nivelul teoretic, în zona centrală a barajului, la forajele din bancheta și descărcarea curbei de depresie pe taluzul aval, în zona banchetei;
- la niveluri în lac apropiate de NNR, s-au observat "zone de fierbere", cu izvoare ascensionale, dar fără antrenare de debit solid, în fundul canalului colector;
- funcționarea necorespunzătoare și colmatarea unor foraje piezometrice;
- degradarea unor borne de nivelment;
- existența unui deficit de apă în perioadele secetoase." [104]

Având în vedere deficitul de apă din perioadele secetoase ale anului, Direcția Apelor Someș-Tisa a promovat execuția Derivației Barcău - Ac.Vârșoț, asigurând de la punerea în funcțiune în 1994, suplimentarea debitului la folosințe.[86]

Deficiențele la construcțiile aferente acumulării au impus executarea de lucrări de mărire a gradului de siguranță a acumulării, ceea ce a dus la promovarea de către Direcția Apelor Someș-tisa a proiectului "Mărirea Gradului de siguranță a Acumulării Vârșoț".

Execuția lucrărilor s-a desfășurat în perioada 1994-1997 și a cuprins o serie de lucrări suplimentare, costisitoare, fără rezolvarea principalei probleme a barajului: infiltrațiile necontrolate observate peste anumite niveluri ale apei în lac.

Pentru rezolvarea problemelor generate de nivelul ridicat al curbei de infiltrații în baraj și descărcarea acesteia pe paramentul aval al barajului a fost promovat proiectul Drenuri Acumularea Vârșoț, care prevede executarea unui sistem de drenaj la piciorul aval al barajului, în zona banchetei 234,50 și platforma aval, cu descărcare în canalul colector.

În anul 1999 la comanda beneficiarului, s-a întocmit o expertiză pentru evaluarea stării de siguranță a acumulării Vârșoț, identificându-se exigențele de performanță și factorii de risc ai acumulării.

„Cea mai importantă situație de risc este reprezentată de efectul fenomenului de infiltrație prin baraj.”

Coeficienții de stabilitate prezintă valori scăzute, iar în cazul ridicării nivelului în lac și a nefuncționării drenului se inițiază și se întretine fenomenul de pierdere a stabilității paramentului aval.

În anul 2002, Direcția Apelor Someș-Tisa a promovat investiția „Punerea în siguranța a acumulării Vârșoț”. [86]

Prin proiect, pe baza concluziilor expertizei și a concluziilor studiilor UCC, sunt prevăzute:

- Îmbunătățirea siguranței barajului în exploatare:
  - lucrări de etanșare a barajului și fundației;
  - reprofilarea barajului;
  - lucrări de etanșare a galeriei vechi;
  - executarea a 2 foraje de evacuare a apei din galeria nouă;
  - reprofilarea canalului de evacuare aval;
  - reparații la canalul de evacuare a golirii de fund turn nou, umăr stâng.
- Amenajarea antierozională a conturului lacului
- Lucrări de reducere a transportului aluvionar amonte de acumulare (pe râul Crasna, pârâul Pria, pârâul Ragului, valea Banului).
- Reabilitarea sistemului de monitorizare.

Concluziile expertizei au fost puse în practică, iar problema infiltrațiilor a fost înlăturată cu succes. Costurile ridicate însă puteau fi evitate printr-o planificare în detaliu a proiectului și execuției lucrărilor și renunțarea la modificarea radicală, din mers, sub presiunea timpului a proiectelor gândite inițial să îndeplinească anumite funcții.

Având în vedere problemele apărute în exploatarea acestei lucrări în particular, beneficiarii lucrărilor cu acumulări nepermanente ezită să demareze lucrări asemănătoare. Lipsa de experiență în realizarea acestor tipuri de lucrări face ca beneficiarii, proiectanții și executanții să privească cu reticenta acest tip de investiții.

Lucrarea de față vine în ajutorul acestora, încercând să evidențieze modul în care se schimbă modul de comportare în exploatare, din momentul în care una sau mai multe folosințe au fost adăugate acumulării.

Un alt caz de probleme sau mai bine zis incertitudini în exploatare este cel al barajului de la Căinești-Oaș. Probleme la estimarea infiltrațiilor, AMC și stabilitate sunt prezente în cazul barajului omogen din pământuri de 9,5 metri înălțime, realizat cu scopul principal de atenuare a undelor de viitură din bazinul Tur.

Din multitudinea de probleme ce apar în exploatarea acestui tip de lucrări, în teză se tratează în detaliu infiltrațiile nepermanente.

Teza de doctorat a fost structurată într-un număr de opt capitole. Studiul efectuat este evidențiat pe parcursul a 170 pagini, care cuprind un număr de: 241 relații de calcul, 100 figuri și 87 tabele.

În primul capitol se face o trecere în revista a tipurilor de baraje din pământ, a măsurilor constructive necesare rezolvării problemelor de infiltrații prin și pe sub corpul barajului, a protecției taluzelor barajului. S-au studiat prevederile specifice țărilor cu tradiție în acest domeniu cu privire la alcătuirea acestui tip de lucrări. S-a făcut o analiză la nivel național a situației barajelor ce se pretează ori au potențial de a fi transformate, pentru a restrânge aria de cercetare ce urmează a fi realizată. Se restrânge aria de studiu a problematicii infiltrațiilor la baraje omogene din pământ, cu înălțimi de până la 10 metri, iar materialul din umpluturi este de același tip cu cel din fundație.

În capitolul doi se face un rezumat al metodelor clasice de calcul și estimare a infiltrațiilor barajelor din pământ. Sunt prezentate metodele analitice de calcul a infiltrațiilor permanente pentru baraje omogene, neomogene, izotrope și anizotrope, pe pat permeabil sau impermeabil, se prezintă modul de trasare a curbei de infiltrațiilor și de estimare a spectrului hidrodinamic.

Capitolul trei pune în evidență posibilele tipuri de mișcare a apei prin medii poroase și enumeră ecuațiile diferențiale, parametri și coeficienții ce intervin la rezolvarea problemelor. Se pune accentul pe modelele și metodele de determinare a parametrilor ce descriu mișcarea nepermanentă prin medii nesaturate.

În capitolul patru se trece în revistă teoria elementului finit, a metodei Galerkin aplicată ecuațiilor mișcării apei de infiltrații, se enumera câteva metode de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare și neliniare etc. Teoria prezentată în prima parte a capitolului patru este folosită pentru scrierea algoritmilor de calcul a infiltrațiilor pentru toate tipurile de mișcare plană întâlnite. Acești algoritmi au fost folosiți la rezolvarea tuturor problemelor de infiltrații apărute pe parcursul tezei. Rezultatele obținute cu algoritmi proprii au necesitat o validare, s-au rezolvat probleme clasice din literatura de specialitate și s-au comparat cu rezultatele obținute cu programe cunoscute cum ar fi Slide, Seep, Phase2, GFAS sau Flac.

În capitolul cinci se trece efectiv la studierea infiltrațiilor în regim nepermanent pentru barajele cu înălțimea 2, 5 și 10 metri, se face un studiu cu

privire la evoluția curbei de infiltrații în timp și compararea rezultatelor obținute cu cele din mișcarea permanentă.

În capitolul șase se face o prezentare pe scurt a celor mai cunoscute metode clasice de calcul a stabilității taluzelor și folosind rezultatele obținute în calculul infiltrațiilor din capitolul cinci, analizează modul în care infiltrațiile nepermanente influențează starea de stabilitate a taluzelor amonte și aval în toate ipotezele (infiltrații permanente, nepermanente, exploatare cu acumulări permanente sau nepermanente, cu sau fără drenaj etc.).

În capitolul șapte se face un studiu de caz cu privire la comportarea în exploatare a barajului de la Călinești Oaș, baraj care se încadrează în categoria barajelor studiate în această lucrare, chiar dacă are un volum de acumulare mare. Acest lucru face ca datele cu privire la monitorizarea comportării în exploatare să fie suficient de bogate și să permită reconstituirea unor viituri la care a fost supus acest baraj. Se studiază trei viituri înregistrate, fiecare caracterizată de parametri diferiți, se compara rezultatele calculate și cu cele măsurate. Se propun soluții de urmărire a infiltrațiilor prin metodele clasice (pentru monitorizarea zonei saturate) și pentru zona nesaturată.

Lucrarea a fost elaborată sub conducerea științifică a d-lui prof. dr. ing. Gheorghe Popa, de la Universitatea Politehnică din Timișoara, Facultatea de Construcții, Departamentul de Hidrotehnică, căruia îi exprim cele mai sincere și respectuoase mulțumiri, precum și profunda mea recunoștință pentru îndrumarea și sprijinul acordat.

De asemenea mulțumesc domnului conf. dr. ing. Dorin Vingan de la Facultatea de construcții din Cluj Napoca pentru importante sugestii făcute cu ocazia dezbaterii unor părți mai delicate din teză.

# 1. BARAJE DIN PĂMÂNT

## 1.1. Clasificarea barajelor din pământ

Atunci când folosim termenul „baraje din pământ” facem referire la baraje din nisipuri, nisipuri argiloase, argile nisipoase, argile prăfoase etc. Secțiunea transversală a unui baraj din pământ este trapezoidală, panta taluzului amonte și aval este rezultatul analizei la stabilitate a masivului din pământ. Avantajul principal al acestui tip de baraj este faptul că poate fi amplasat pe orice tip de fundație (cu excepția terenurilor formate din mături curgătoare, sau materiale solubile, straturilor de turbă sau cu un conținut mare de materie organică).

O clasificare în funcție de folosințele acumulărilor ar împărți barajele în două mari categorii: **baraje cu acumulări nepermanente** (atenuarea undelor de viitură) și **baraje cu acumulări permanente** (cu două sau mai multe folosințe).

După tipul fundației barajele de pământ se clasifică în **baraje cu fundații impermeabile** (vezi figura 1.1 și figura 1.2.a și b) și **baraje cu fundații permeabile** (figura 1.2.c - h). Terenul de fundare poate fi stâncos sau nestâncos. În cazul în care sunt fundate pe terenuri permeabile, ele trebuie completate cu un element de etanșare; care este sau nu prelungit spre stratul impermeabil de un voal de etanșare.

După natura materialelor folosite: **barajele omogene** sunt realizate dintr-un singur tip de material capabil să asigure impermeabilitatea și stabilitatea construcției (figura 1.1.a, figura 1.1.bb).

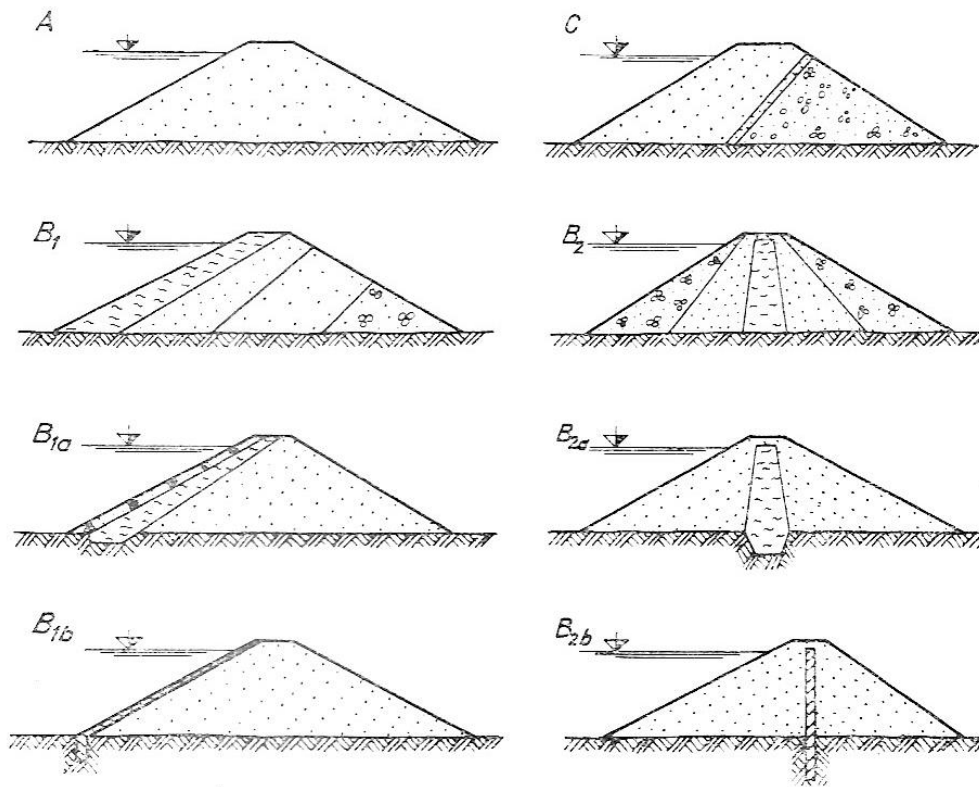


Figura 1.1 Tipuri de baraje din pământ [85]  
A-omogen; B- neomogen; C-mixt

**Baraje neomogene** alcătuite din mai multe tipuri de materiale dispuse într-o anumită ordine pe secțiunea transversală. În această categorie regăsim baraje cu prismul impermeabil spre taluzul amonte (fig. 1.1.B1a, fig. 1.2.d,g), sau cu zona impermeabilă situată central sub forma unui nucleu (figura fig. 1.1.B2, B2a, și fig. 1.2.e, h). Cel mai folosit model este cel cu două prisme permeabile amonte și aval, ce flanchează o zonă centrală realizată din materiale impermeabile.

**Baraje cu ecrane sau diafragme impermeabile.** Din aceasta categorie fac parte barajele omogene sau neomogene cu ecrane plastice din material pământos, situat pe taluzul amonte, sau din materiale nepământoase (beton, beton armat, beton asfaltic, geomembrane etc.), dispuse pe taluzul amonte (fig. 1.1.B1b și fig. 1.2.a,c) sau baraje cu diafragme din materiale pământoase dispuse central (fig. 1.1.B2b, fig.1.2.b,f).

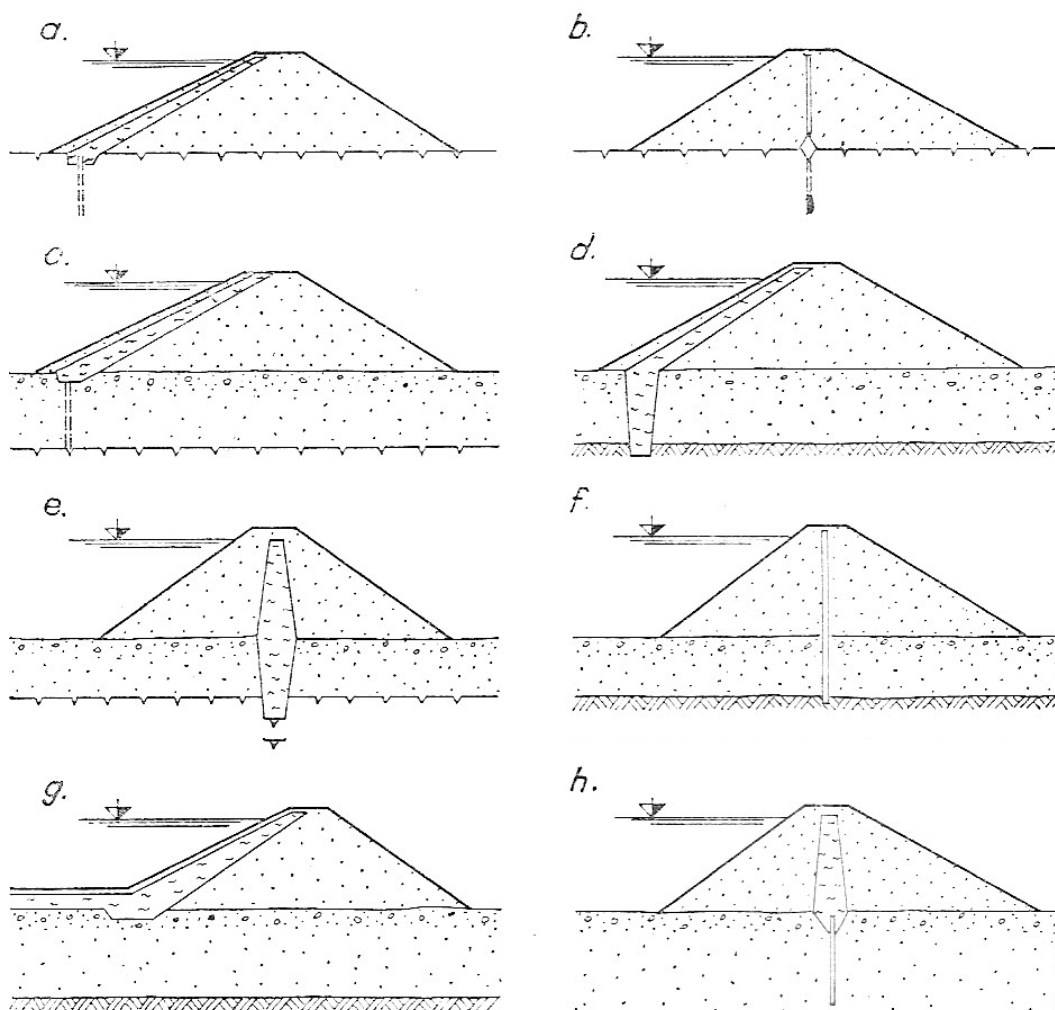


Figura 1.2 Tipuri de racordare a etanșării cu terenul impermeabil[85]  
 a-cu perdea de etanșare; b-cu pinden de beton sau argilă; c,d,e,f- cu prelungirea elementului  
 de etanșare;g-cu avantradiier; h-cu perete de palplanșe

Atunci când este folosită și piatra, **barajele** se numesc **mixte** și sunt considerate din pământ cu prisme de piatră sau din anrocamente cu element de etanșeitate din pământ în funcție de materialul care domină din punct de vedere cantitativ (fig. 1.1.b2).

După modul de realizare a umpluturilor barajele pot fi clasificate în: **baraje din pământ compactat**, realizate prin așternerea succesivă a unor straturi orizontale și compactarea mecanică a lor, și **baraje hidromecanizate** realizate prin dispunerea materialului transportat cu ajutorul apei, într-un proces de sedimentare.

Un alt element constructiv important al barajelor de pământ îl reprezintă elementul drenant care are rolul de a coborâ zona saturată astfel încât să mărească stabilitatea masivului din pământ.

Barajele se împart în **baraje drenante** sau **nedrenante** (figura 1.3) în funcție de existența sau nu a elementului drenant în corpul barajului. Elementul drenant poate fi sub forma unui prism (figura 1.3.a), saltea (figura 1.3.b) sau saltea cu filtru drenant vertical sau înclinat (figura 1.3.c).

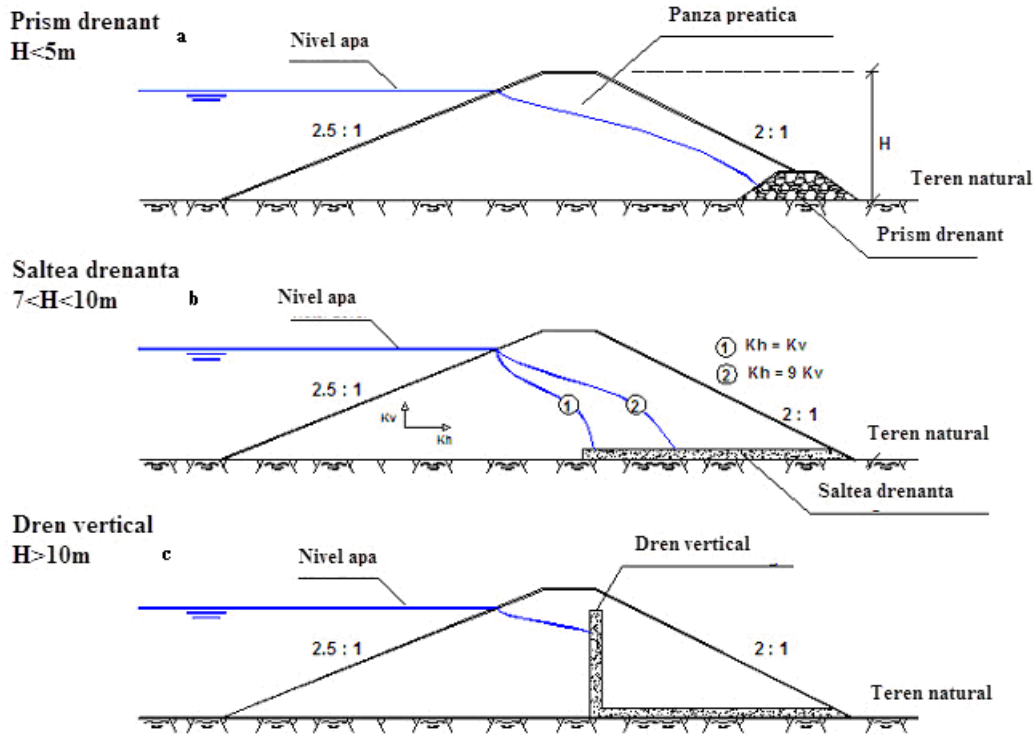


Figura 1.3 Soluții folosite pentru drenare [64]

Barajele cu acumulări nepermanente se încadrează în cea ce ICOLD până în anul 2011 definește baraje mici, sau mai bine zis în cea ce nu cuprinde ICOLD atunci când definește barajele mari.

ICOLD [54] definește barajele mari fiind baraje cu înălțimea mai mare de 15m (măsurată de la cota de fundare) sau dacă au adâncimea cuprinsă între 10 și 15 m atunci trebuie să respecte:

- lungimea la coronament peste 500 metri;
- volum peste 3 milioane  $m^3$ ;
- debitul de calcul peste  $2000m^3/s$ ;
- caracteristici speciale ale barajului sau ale terenului de fundare.

În Franța [17] s-a dezvoltat un sistem bazat pe doi parametri  $H^2\sqrt{V}$ , înălțime baraj (măsurată de la nivelul talvegului) și volumul maxim în milioane de  $m^3$ . Acești parametri se folosesc pentru poziționarea barajelor în diferite clase de risc în vederea proiectării corespunzătoare elementelor barajului (figura 1.4).



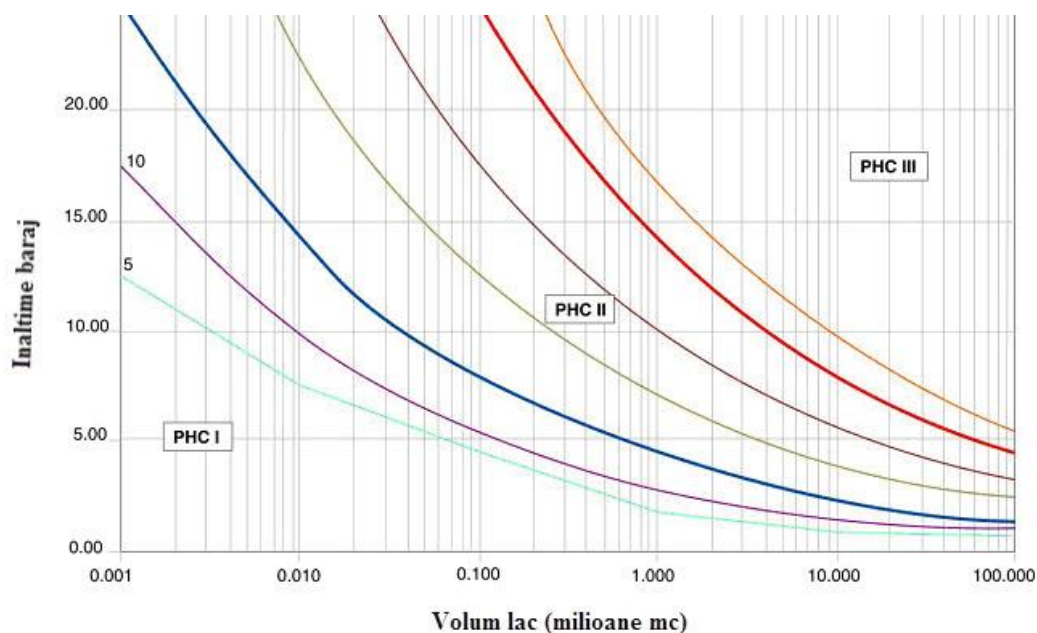


Figura 1.4 Clasificarea barajelor după clase de risc [39]

Suplimentar acestei clasificări a barajelor în clase de risc în funcție de caracteristicile geometrice ale barajului și acumulării, normele franceze mai suprapun câteva riscuri (pierderi de vieți omenești, pagube economice sau de mediu precum și pagube de natura sociala).

Tabel 1.1 Clasificarea riscurilor potențiale[39]

Componenta	Clasificarea riscurilor potențiale		
	Scăzut (PHC I)	Mediu (PHC II)	Ridicat (PHC III)
$H^2 \sqrt{V}$	$H^2 \sqrt{V} < 20$	$20 < H^2 \sqrt{V} < 200$	$H^2 \sqrt{V} > 200$
Risc de pierderi de vieți omenești	$\approx 0$	$< 10$	$\geq 10$
Risc economic	Scăzut	Moderat	Ridicat sau extrem
Risc de mediu	Scăzut sau moderat	moderat	Extrem
Distrugerii sociale	Scăzut (zone rurale)	Regionale	Naționale

Bazându-se pe normele franceze ICOLD a adoptat în 2011 [54] definiția asupra "barajelor mici"(fig. 1.5):

$$2.5 \text{ m} < H < 15 \text{ m} \text{ și } H^2 \sqrt{V} < 200$$

H este înălțimea barajului măsurată de la talvegul albiei la cota coronamentului

V volumul total în milioane de m<sup>3</sup>

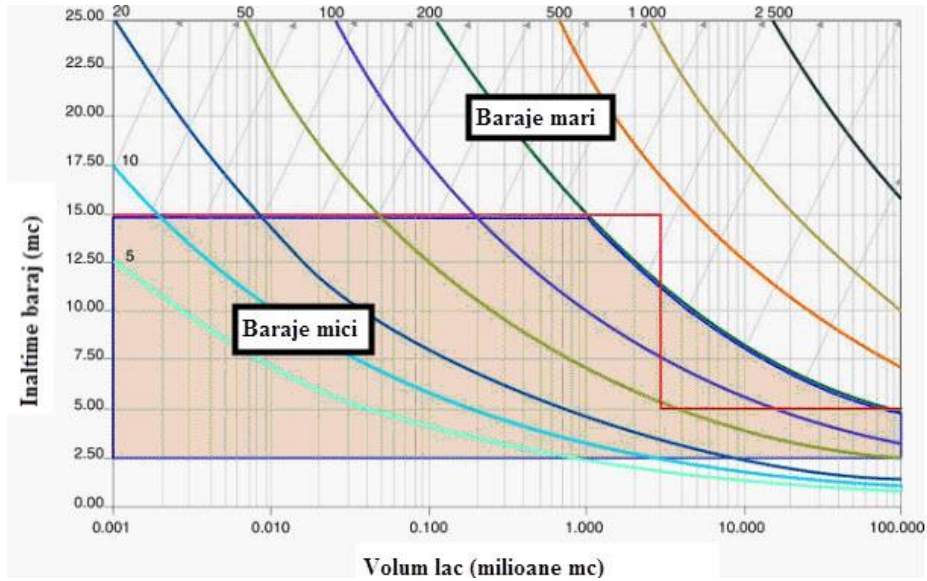


Figura 1.5 Clasificarea barajelor propusa de ICOLD [54]

### 1.2. Situația barajelor mici din România

În anul 2008 pe site-ul oficial al Ministerului mediului a fost publicat „Registrul național al barajelor din România”[48] care prezintă o listă actualizată a barajelor din categoriile C și D. Având în vedere că barajele cu acumulări nepermanente ce se pretează la o permanentizare se încadrează în marea lor majoritate în aceste două categorii, datele furnizate de către minister au fost folosite pentru a face un studiu în ceea ce privește situația lor.

La nivele bazinale situația se prezintă în felul următor:

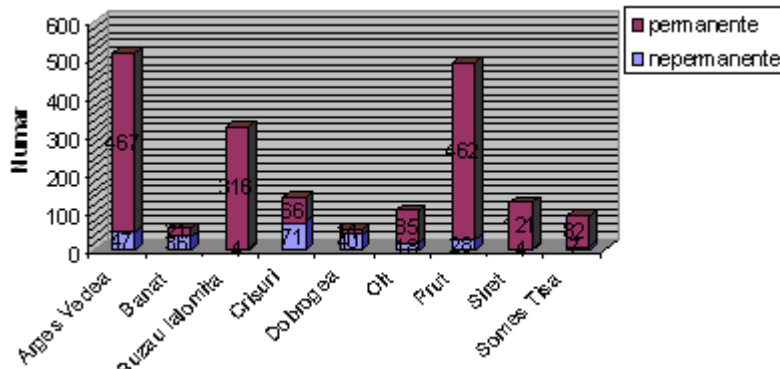


Figura 1.6 Baraje din categoria C și D în funcție de folosințe pe BH

Analizând datele de mai sus se poate observă că bazinele în care efectul inundațiilor este diminuat prin lucrări de atenuare a viiturilor sunt Crișurile și Dobrogea, în care ponderea barajelor cu acumulări nepermanente este în medie de peste 50%.

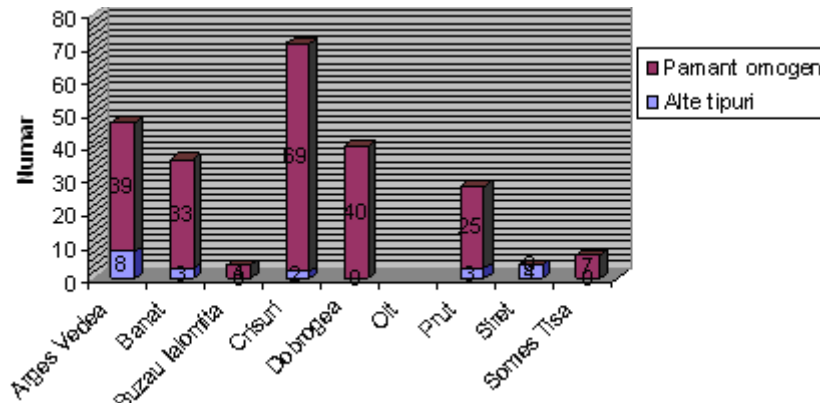


Figura 1.7 Baraje cu acumulări nepermanente pe tipuri de soluții constructive

Se poate observă că aproape fără excepție barajele cu acumulări nepermanente sunt din pământ omogen, la categoria „alte tipuri” intrând baraje din pământ cu măști de protecție sau etanșare.

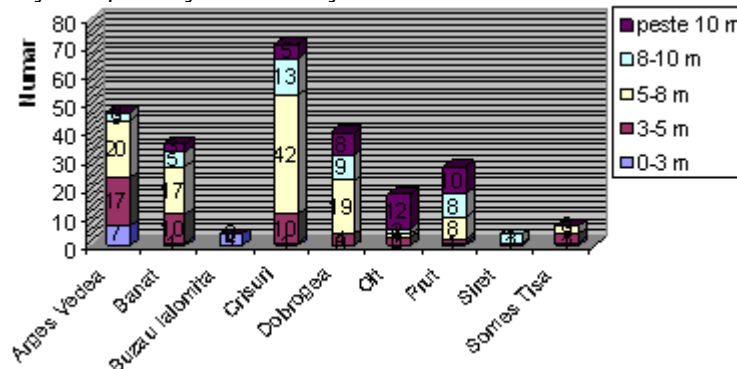


Figura 1.8 Baraje la nivel de BH pe clase de înălțimi

Înălțimile acestor baraje se încadrează sub 10 metri, excepție făcând barajele din bazinele Prut și Olt unde ponderea barajelor cu înălțimi de peste 10 metri este mai ridicată.

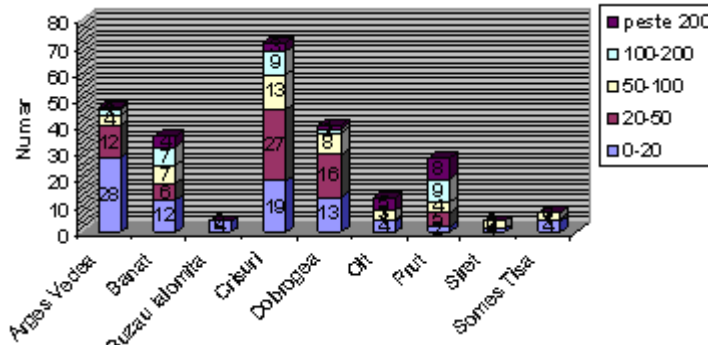


Figura 1.9 Situația la nivel BH în funcție de norma propusa de ICOLD

Marea majoritate a barajelor din categoria C și D se încadrează în categoria barajelor mici, situația la nivel bazinal este prezentată în figura 1.9.

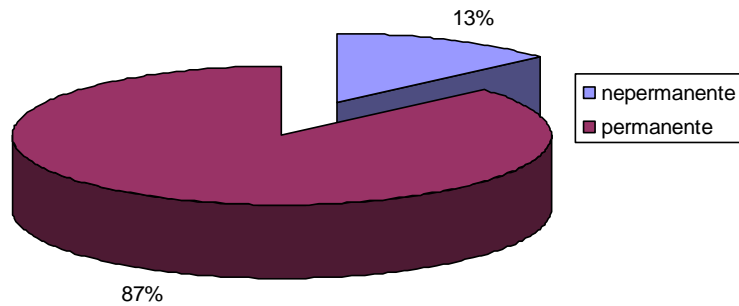


Figura 1.10 Baraje din categoriile C și D în funcție de numărul de folosințe

Astfel la nivel național (fără bazinele Jiu și Mureș), 13% din totalul barajelor din categoriile C și D sunt baraje cu o singură folosință, baraje cu acumulări nepermanente.

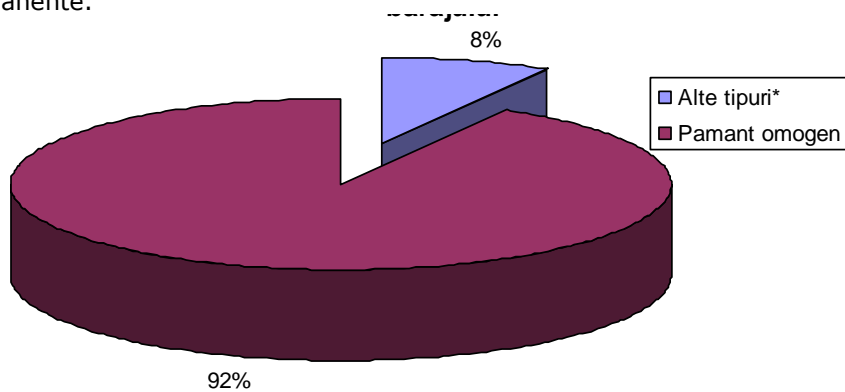


Figura 1.11 Baraje nepermanente funcție de tipul barajului

Din acestea 92% sunt baraje omogene din pământ, 8% omogene din pământ cu mască de etanșare (un singur baraj este de tip stăvilar, în bazinul Argeș Vedea).

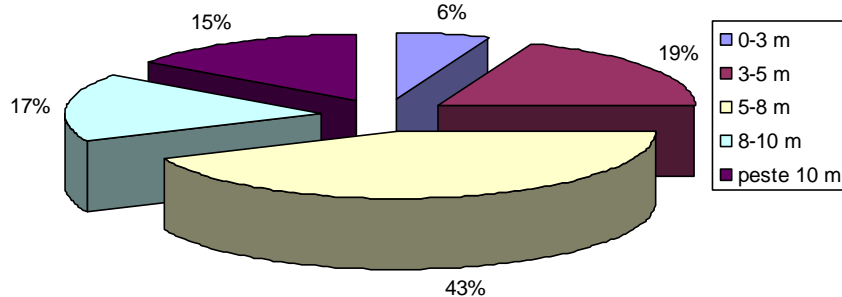


Figura 1.12 Baraje cu acumulări nepermanente funcție de înălțime

85% din barajele ce intră în categoria barajelor cu acumulări nepermanente sunt baraje cu înălțimi cuprinse între 2 și 10 metri înălțime, 15% ieșind în aceste limite cu mențiunea că înălțimea maximă este sub 18 metri.

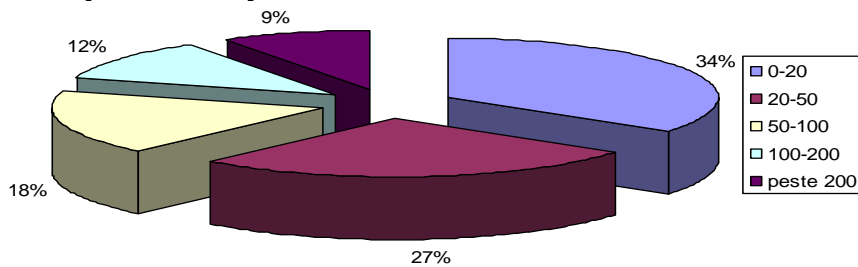


Figura 1.13 Clasificarea conform normelor ICOLD

Chiar dacă unele baraje au înălțimi de peste 10 metri asta nu înseamnă automat că vorbim despre baraje mari. Recomandările ICOLD încadrează 91% din barajele cu acumulări nepermanente în categoria barajelor mici.

Concluzia acestei analize a barajelor cu acumulări nepermanente la nivel național scoate în evidență următoarele:

- la nivel național un număr de 237 de baraje prezintă potențial de permanentizare, la care se adaugă un alt număr de baraje din bazinele Jiu și Mureș, ale căror date nu sunt disponibile pe site-ul MMGA;
- din acestea 236 sunt baraje omogene din pământ și în mai puțin de 8% beneficiază de protecția taluzului amonte cu pereți sau dale din beton;
- marea majoritate sunt baraje cu înălțimi de până în 10 metri;

Pentru a permanentiza o acumulare sunt necesare studii tehnico-economice, de mediu și de impact social.

Prima problemă ce apare în cazul acestor tipuri de lucrări este statutul terenurilor ce urmează a fi ocupate de luciul de apă și de eventualele lucrări complementare de apărare împotriva inundațiilor necesare în noile condiții de lucru.

Starea cadastrului românesc ridică probleme de ordin juridic, probleme ce duc la scăderea apetitului pentru acest tip de investiție.

A doua problemă este de ordin tehnic. Întrebarea care se pune este cum putem ridica, și păstra nivelul apei în lac, având în vedere că lucrarea este gândită să facă față acțiunii nepermanente a apei, golirea barajului nu este dotat cu echipamente hidromecanice și nu a fost gândit să preia în cuneta lacului aluviuni decât pe perioada scurtă a viiturilor.

Ridicarea și păstrarea nivelului apei în lac la un nivel care să creeze un luciul de apă și un volum ce poate fi folosit în diverse scopuri presupune în primul rând echiparea golurilor de fund cu echipamente hidromecanice sau în cel mai simplu caz cu un călugăr, batardou și un grătar.

În cea mai simplă ipoteză, practic se trece de la o acumulare nepermanentă, la o acumulare cu luciul permanent de apă care funcționează în continuare fără a necesita manevre de reglare a debitelor defluate.

În momentul în care se trece la permanentizarea unei acumulări cu baraj din categoria barajelor mici trebuie gândită o schemă de exploatare care să necesite o intervenție minimă din partea factorului uman, funcționarea trebuie să fie sigură și fără folosirea de manevre la echipamente hidromecanice (indiferent de natura lor, manuale sau automatizate).

### 1.3. Condiții de lucru

Lucrările realizate în vederea retenției unui volum de apă sunt supuse acțiunii permanente sau nepermanente a apei.

În cazul barajelor cu acumulări nepermanente aceasta acțiune are un caracter nepermanent, dar cu efecte la fel de importante. Masivele din pământ sunt supuse acțiunii apei, cu variații în timp, variație ce duce la schimbarea continuă a zonelor saturate.

Poziția curbei de infiltrare urmărește mai mult sau mai puțin nivelul apei în lac, atingerea caracterului cvasipermanent înregistrând întârzieri mai ales în cazul unor variații bruște ale nivelului de apă (ridicare sau coborâre). Calculul infiltrațiilor în medii nesaturate în condiții nepermanente urmând a fi descris mai pe larg într-un capitol separat.

Zona saturată este supusă continuu forțelor de antrenare, care pot duce la apariția fenomenului de sufozie.

În cazul scăderii bruște a apei în acumulări cu baraje cu element argilos de etanșare, apar probleme de descărcare a excesului de presiune a apei în pori, cu efecte defavorabile din punct de vedere a exploatării.

Taluzul amonte este supus pe diferite porțiuni acțiunii valurilor, taluzul aval este sensibil la șiroirea apelor din precipitații, la cicluri repetate de îngheț dezgheț, coronamentul trebuie protejat în cazul în care este carosabil.

Deversarea barajelor din pământ este aproape întotdeauna fatală barajelor, scurgerea necontrolată a apelor de pe versant pot afecta integritatea taluzelor în zona umerilor barajelor.

Având în vedere aceste aspecte barajele din pământ trebuie să respecte câteva condiții esențiale:

- să nu fie deversate în nici un fel de condiție;
- curba de infiltrații să fie poziționată cât mai jos cu putință;
- taluzul amonte să fie stabil la coborârea bruscă a nivelului;
- taluzele aval și amonte să fie stabile în orice ipoteză de lucru;
- materialul trebuie dispus în corp, în așa fel încât să nu se producă infiltrații necontrolate, punctiforme, iar viteza trebuie ținută sub valorile la care apare fenomenul de antrenare a particulelor fine;
- să se adopte soluții corespunzătoare în ceea ce privește protejarea taluzelor la acțiunea valurilor sau a apelor meteorice.

Barajele din pământ spre deosebire de alte tipuri de baraje de greutate sau arcuite, nu sunt pretențioase atunci când vorbim de condiții morfologice, ele pot fi amplasate aproape în orice formă de vale. Singura problema ce poate apărea se referă la soluția de deviere a apelor în perioada construcției.

Din punct de vedere climatic, trebuie avut în vedere ca perioadele cu temperaturi negative nu permit depunerea de material, perioadele ploioase pot să afecteze obținerea condițiilor optime de umiditate în vederea compactării.

Amplasamentul trebuie să dispună de surse suficiente de material pentru umpluturi, atât din punct de vedere calitativ și cantitativ. Deseori se optează pentru zonare materialului în funcție de disponibilul de material, de multe ori săpăturile rezultate în urma executării descărcătorului de suprafață sunt folosite în zona aval a barajului.

În continuare se vor prezenta câteva aspecte ce țin de proiectarea și predimensionarea barajelor omogene din pământ.

## 1.4. Proiectarea coronamentului

Lățimea și forma coronamentului depind în primul rând de materialul din care este realizat barajul, de modul în care este folosit: carosabil sau necarosabil, pentru a asigura la stabilitatea taluzelor și pentru a coborâ într-o oarecare măsură punctul de izvorâre al apelor de infiltrații.

Deoarece unele criterii sunt greu de prins într-o relație matematică normele americane propun o lățime a coronamentului calculată cu relația:

$$L = h/5 + 10 \quad (1.1.)$$

- L lățimea coronamentului (in feet);
- h înălțimea barajului măsurată de la nivelul talvegului în feet.

Astfel pentru barajele cu înălțimi cuprinse între 5 și 15 metri se recomandă:

Tabel 1.2 Lățimea coronamentului recomandat de normele americane [13]

Înălțime baraj(m)	Lățime coronament(m)
5	4
10	5
15	6

În Franța dimensiunea coronamentului ține cont și de volumul acumulării, respectiv de riscul atașat lucrării în ansamblu:

Tabel 1.3 Lățimea coronamentului recomandat de normele franceze [17]

$H^2 \sqrt{V}$	<100	Intre 100 și 300	>300
L minim [m]	3	4	5

În 2002, Lewis propune relația empirică ce ține cont înălțimea barajului

$$B = H^{0.5} + 1 \quad (1.2.)$$

Tabel 1.4 Lățimea coronamentului calculate cu relația lui Lewis [64]

Înălțime baraj (m)	Lățimea la coronament (m)
4	3.00
5	3.25
6	3.50
7	3.65
8	3.85
9	4.00

### 1.5. Predimensionarea taluzelor la baraje din pământ

În **China** marea majoritate a barajelor construite sunt din pământ compactat în straturi succesive. Problemele apărute la aceste tipuri de baraje se datorează instabilității taluzelor, supraveghere necorespunzătoare, greutate specifică mică a materialul din umpluturi și rezistențe scăzute la forfecare.

Scăderile bruște de nivel de la nivelul maxim la o treime din înălțimea barajului a dus la supunerea unor eforturi suplimentare a taluzului amonte în special. Pentru evitarea continuării acestor incidente, în provincia Hubei s-au propus următoarele caracteristici ale taluzelor:

Tabel 1.5 Parametri secțiunilor transversale propuse în China[21]

Baraje omogene	Nisip argilos				Praf argilos				
	Berma		Panta amonte (de sus în jos)	Panta aval (de sus în jos)	Berma		Panta aval (de sus în jos)	Panta amonte (de sus în jos)	
	Lățime berma	Nr. berme			Lățime berma	Numărul de berme			
	1.5	1	1:2.5 1:2.75	1:2.25 1:2.5	-	-	1:2.25 1:2.5	1:2.0 1:2.25	
Baraje cu masca sau ecran amonte	Umpluturi				Ecran amonte și pinten de încadrare				
	Berma		Panta amonte (de sus în jos)	Panta aval (de sus în jos)	Lățime la partea inferioară (măsurată normal la panta taluzului)		Lățimea la partea de sus a pintelului	Lățime la partea inferioară a tranșeei (măsurată normal la panta taluzului)	
	Lățime berma	Nr. berme			Lățime la partea superioară (măsurată normal la panta taluzului)	Lățime la partea inferioară (măsurată normal la panta taluzului)			
	1.5	1	1:2.5 1:2.75	1:2.0 1:2.25	0,80 m	¼ din înălțimea barajului	¼ din înălțimea barajului	¼ din înălțimea barajului	
Baraje cu nucleu central	Prisme laterale baraj				Nucleu central și pinten				
	Berma		Panta amonte (de sus în jos)	Panta aval (de sus în jos)	Lățime la partea superioară		Panta taluze nucleu	Lățimea la partea de sus a pintelului	Lățimea la partea de jos a nucleului
	Lățime berma	Nr. berme			Lățime la partea superioară	Panta taluze nucleu			
	1.5	1	1:2~1:2.25 1:2.25~1:2.5	1:1.75~1:2.0 1:2~1:2.25	1.5	1:0.2	¼ Nivel apa	½ Nivel apa	



În **Statele Unite ale Americii** barajele omogene sunt recomandate doar acolo unde nu exista posibilitatea de zonare a materialelor.

Chiar și acolo unde avem un singur tip de pământ el poate fi diferențiat și dispus în așa fel încât cel mai grosier să fie dispus spre piciorul aval. Parametri de predimensionare ai taluzelor barajelor sunt recomandați în funcție de tipul materialului folosit. Notațiile pentru diferitele tipuri de pământuri sunt în detaliu în sistemul "Unified Soil Classification" USC [2].

Tabel 1.6 Secțiuni propuse de normele americane pentru baraje omogene [13]

Tip	Scăderi bruște de nivel (scăderi mai mari de 15 cm)	Clasificarea materialului	Panta taluz amonte	Panta taluz aval
Omogen sau omogen modificat	Nu	GW, GP, SW, SP	Permeabil, nu poate fi folosit	
		GC, GM, SC, SM	2.5:1	2:1
		CL, ML	3:1	2.5:1
		CH, MH	3.5:1	2.5:1
Omogen modificat	Da	GW, GP, SW, SP	Permeabil, nu poate fi folosit	
		GC, GM, SC, SM	3:1	2:1
		CL, ML	3.5:1	2.5:1
		CH, MH	4:1	2.5:1

Pentru baraje neomogene cu material dispus în zone:

Tabel 1.7 Secțiuni propuse de normele din SUA pentru baraje neomogene [13]

Tip	Scăderi bruște de nivel (scăderi mai mari de 15 cm)	Clasificarea materialului din prismele laterale	Material nucleu	Panta taluz amonte	Panta taluz aval
Cu nucleu	Neimportant	Anrocament, GW, GP, SW (cu pietriș), sau SP (cu pietriș)	GC, GM, SC, SM, CL, ML, CH, or MH	2:1	2:1
Cu nucleu masiv	Nu	Anrocament, GW, GP, SW (cu pietriș), sau SP (cu pietriș)	GC, GM	2:1	2:1
			SC, SM	2.25:1	2.25:1
			CL, ML	2.5:1	2.5:1
			CH, MH	3:1	3:1
Cu nucleu masiv	Da	Anrocament, GW, GP, SW (cu pietriș), sau SP (cu pietriș)	GC, GM	2.5:1	2:1
			SC, SM	2.5:1	2.25:1
			CL, ML	3:1	2.5:1
			CH, MH	3.5:1	3:1
			GC, GM	2.5:1	2:1

În Australia se recomandă forma umpluturilor în funcție de sistemul (USC):

Tabel 1.8 Secțiunii propuse de normele din Australia [64]

Tip	Omogen sau modificat				Omogen modificat				
	Permanent sau nepermanent				Permanent				
Scop	Nu				Da				
Supus scăderilor bruște (mai mult de 1m pe zi)	Nu				Da				
Tip material	GW	GC	CL	CH	GW	GC	CL	CH	
	GP	GM	ML	MH	GP	GM	ML	M	
	SW	SC			SW	SC			
	SP	SM			SP	SM			
0-3	Taluz amonte	P(neadecvat)	2.5:1	2.5:1		P(neadecvat)	3:1	3.5:1	4:1
	Taluz aval		2:1	2:1	2.5:1		2:1	2.5:1	2.5:1
3-7	Taluz amonte	P(neadecvat)	2.5:1	3:1	3:1	P(neadecvat)	3.5:1	4:1	4:1
	Taluz aval		2.5:1	2.5:1	3:1		2.5:1	3:1	3:1
7-10	Taluz amonte	P(neadecvat)	3:1	3:1	3.5:1	P(neadecvat)	3.5:1	4:1	4:1
	Taluz aval		3:1	3:1	3:1		3:1	3.5:1	3.5:1

În Japonia forma geometrică pentru baraje cu elementul impermeabil înclinat situat în zona amonte este dată în funcție de înălțimea barajului:

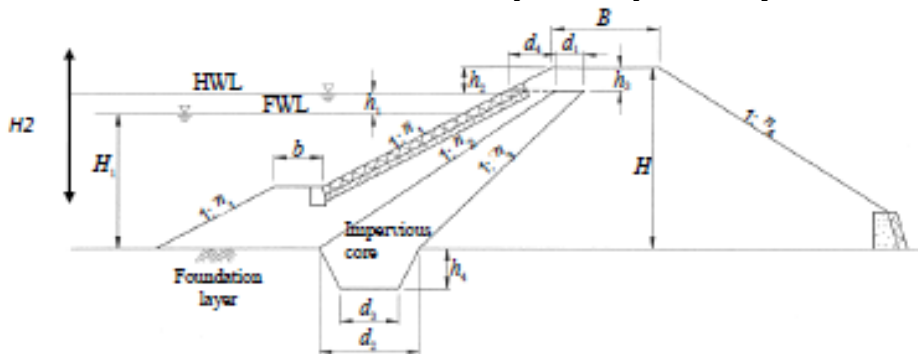


Figura 1.14 Secțiuni propuse de normele japoneze [58]

Tabel 1.9 Secțiuni propuse de normele din Japonia [58]

Înălțime baraj H (m)		5	5-10	10-15	Observații
Înălțime de la fundație la suprafața apei $H_1$ (m)		3.3	3.3-7.8	7.8-12.2	Depinde de tipul și poziția descărcătorului
Adâncime de deversare $h_1$		0.3-0.5	0.5-0.8	0.8-1.2	
Înălțime de garda $h_2$		1.0-1.20	1.2-1.4	1.4-1.6	
Lățime la coronament B		2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	
Taluz amonte	Panta $n_1$ (%)	1.5-1.8	1.8-2.1	2.1-3.0	
	Lățime bancheta b	0-1.5	1.5	0.2	1.5-3.0
Zona impermeabila	Distanța de la coronament $h_3$	0.3-0.5	>0.5	>0.5	Minim 1 m
	Lățime coronament $d_1$	1.5-1.8	1.8-2.4	2.4-3.5	>0.3
	Distanța din amonte $d_4$	1.5	1.5	>1.5	1.5-3.5 m
	Lățimea săpăturii la partea de sus $d_2$				$n_2=n_1-1.1$ $n_3=n_2-0.2$
	Lățimea săpăturii la partea de jos $d_3$				$d_3=1/2d_2$
Adâncimea săpăturii		1.1-1.3	1.3-2.1	2.1-3.2	Depinde de tipul terenului
Panta taluz aval $n_4$ (10%)		1.5-1.8	1.8-2.1	2.1-2.5	1.5-2.5

Și în Cehia parametri ce stau la baza predimensionării secțiunii transversale a barajelor sunt dați tabelar cu mențiunea clară că, calculele de stabilitate și de infiltrații trebuie să valideze și să stea la baza formei finale a barajului:

Tabel 1.10 Secțiuni propuse de normele din Cehia[54]

Elementul de etanșare este situat în zona:	Prisme de stabilizare a barajului sunt în zonele:	Clasificarea pământurilor		Panta	
		Element de etanșare	Prisme de stabilizare	Amonte 1:x	Aval 1:y
A	DB,CE	GM, GC, SM	Piatra de cariera	1:1,75	1:1,15
		SC, GC, MG	GW, SW	1:2,8 <sup>1)</sup>	1:1,75
		ML-MI, CL-CI	GP, SP	1:3 <sup>1)</sup>	1:1,75
AB	D,CE	GM, SM	Piatra de cariera	1:3	1,15
		GC, SC, MG CG, MS, CS	GW, SW	1:1,32	1:1,5
		ML-MI, CL-	GP,SP	1:3,4	1:1,75

CAB	D,E	CI	Piatra de cariera GW, GP	Ca și la barajele cu nucleul în zona AB	1:2.0
		GM, GC, SM, SC, MG, CG MS, CS			
		ML-MI, CL- CI	SW, SP		1:2.2
CABD	E			Ca la barajele omogene	Ca la barajele cu nucleul în zona CAB
Baraje omogene		GM, SM		1:3	1:2
		GC, SC		1:3,4	1:2
		MG, CG, MS, CS		1:3,3	1:2
		MKL-MI, CL-CI		1:3,7	1:2,2

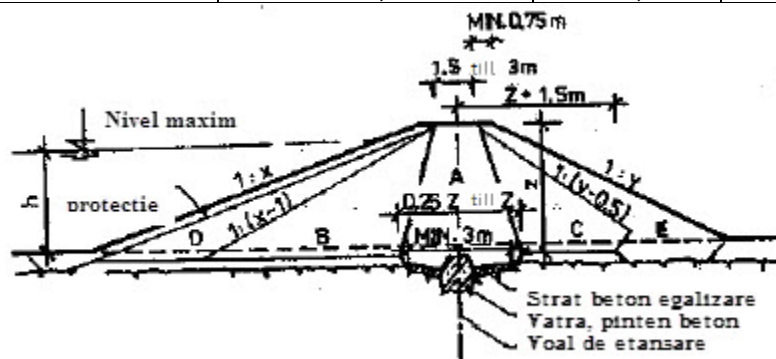


Figura 1.15 Secțiuni propuse de normele din Cehia [54]

## 1.6. Protejarea taluzelor

Având în vedere ca îmbrăcămintea taluzelor barajelor din pământ este singura ce protejează materialul din corpul barajului de acțiunile factorilor externi, soluția folosită trebuie bine justificată din punct de vedere tehnico economic.

Trebuie luate în considerare: viteza și intensitatea vântului, înălțimea valurilor, nivelul normal de retenție, felul de comportare a acumulării în perioadele în care tranzitează viituri (viteza de revenire a nivelului la NNR, durata viiturilor etc.).

În cazul barajelor mici cu acumulări nepermanente o simplă îniebăre poate rezolva problema protecției taluzului amonte și aval, având în vedere că tranzitarea viiturilor se face rapid, înălțimea valurilor nu este semnificativă datorită adâncimii și fetch-ului cu valori reduse.

În cazul acumulărilor permanente însă este vorba de mai multe zone cu acțiuni exterioare diferite:

- zona situată tot timpul sub nivelul apei care nu este supusă eroziunilor (doar excepțional în timpul umpleri sau golirii periodice);
- zona afectată permanent de acțiunea valurilor;
- zona afectată de acțiunea valurilor pe parcursul atenuării unei viituri.

Taluzul aval necesită o protecție împotriva șiroirii apelor meteorice prin păstrarea unui covor vegetal bine întreținut.

Zona situată la nivelul normal de retenție cu o variație a de 10% este supus la acțiunea valurilor.

În cazul în care acumularea are folosințe multiple trebuie avute în vedere toate nivelurile ce implică o exploatare normală.

Cea mai ieftină și rapidă soluție de protejate a taluzelor amonte solicitate la acțiunea valurilor este pereerea cu piatra sau cu prism de anrocamente (rip-rap).

Normele americane indică dimensiunea pietrei folosite la acest tip de protecție în funcție de înălțimea valurilor:

Tabel 1.11 Grosimea protecției propuse de normele americane [13]

Înălțimea valului (m)	Diametrul mediu al pietrei $D_{50}$ (m)	Grosimea stratului (m)
0 – 0.60	0.25	0.30
0.60 – 1.20	0.30	0.46
1.20 – 1.80	0.38	0.61
1.80 – 2.40	0.46	0.76
2.40 – 3.00	0.53	0.91

Pentru a împiedica spălarea umpluturilor pereul trebuie așezat pe un strat drenant și filtrant:

Tabel 1.12 Grosimea drenului filtrant propus de normele americane [13]

Înălțimea maximă a valului (m)	Grosimea filtrului (m)
0 – 1.20	0.15
1.20 – 2.40	0.25
2.40 – 3.00	0.30

Dimensiunile pereului din piatra propuse de normele se regăsesc în tabelul 1.13:

Tabel 1.13 Grosimea protecției propuse de normele franceze [95]

Înălțimea valului (m)	Grosimea - e (m)	Diametrul pietrei - $D_{50}$ (m)
0.30	0.30	0.20
0.55	0.40	0.25
0.80	0.50	0.30
1.05	0.60	0.40
1.30	0.70	0.45
1.55	0.80	0.50

Filtrul poate fi înlocuit cu succes cu un strat de geotextil, problemele apărând în cazul în care acesta este deteriorat pe parcursul execuției.

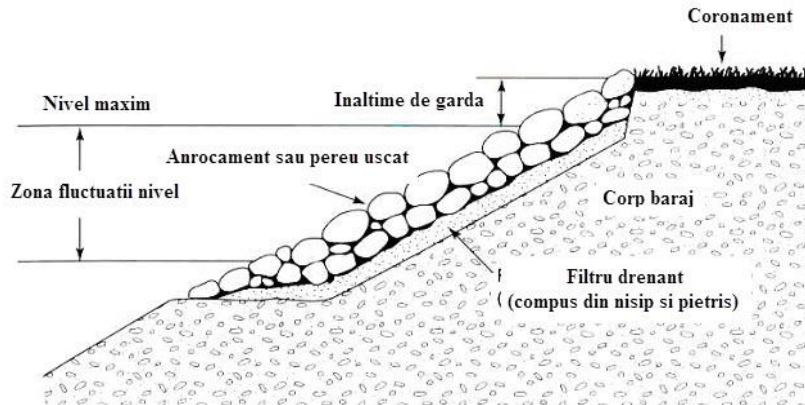


Figura 1.16 Protejarea taluzului amonte cu pereu [54]

Soluția cu pereu uscate din piatră s-a dovedit a fi cea mai fiabilă și ieftină protecție folosită la barajele din pământ. În urma unui studiu efectuată de USCE pe 100 de baraje din pământ cu vârste între 5 și 50 de ani au rezultat următoarele:

- probleme în exploatarea prismelor de anrocamente nu au depășit 5% din cazuri, și acolo au fost cauzate de alegerea deficitară a dimensiunii pietrei;
- în 30 % din pereu uscate au apărut probleme datorită așezării pe un singur strat al pietrei;
- pereerile cu placi din beton au avut deficiențe în comportament în procent de 36% datorită problemelor inerente cu acest tip de protecție.

Taluzele aval ale umpluturilor trebuie protejate împotriva șiroirii apelor meteorice prin așternerea unui covor vegetal, înierbat.

Dacă înălțimea barajului depășește 12 m este necesară și ruperea pante cu o bermă care să colecteze și să conducă controlat apele scurse spre albia naturală.

Plantarea covorului vegetal în zone aride se face mai ușor prin însămânțarea într-un strat de teren vegetal fixat prin diferite materiale geosintetice. Păstrarea acestui strat în bune condiții, prin irigare și taiere periodică asigură una din cele mai infailibile metode de protecție a taluzelor aval a barajelor din pământ. Acest covor vegetal oferă și o vizualizare a porțiunilor în care se înregistrează infiltrații neprevăzute. Neîntreținerea covorului vegetal, creșterea excesivă, favorizează dezvoltarea unui număr mare de rozătoare și animale mici ce își sapă adăposturi în corpul barajului.

### 1.7. Etanșeizarea corpului barajului

În cazul barajelor neomogene elementul de etanșeizare poate fi poziționat amonte și atunci se numește ecran sau mască de etanșare, sau central și se numește nucleu, sâmbure sau diafragmă.

Fiecare soluție are avantaje și dezavantaje, soluția adoptată trebuie să se muleze cel mai bine pe condițiile amplasamentului.

Ecranele de etanșare prezintă următoarele avantaje:

- permit alegerea unui profil mai „suplu” deoarece masivul de pământ este în stare uscată, ceea ce avantajează din punct de vedere al stabilității;
- nu intervine efectul coborârii bruște a nivelului de apă;
- permite executarea umpluturilor într-o cadență neîntreruptă de dificultățile punerii în opera a materialului impermeabil (mai sensibil prin natura sa la condițiile de lucru).

La dezavantajele acestei soluții putem aminti:

- necesită intervenții periodice;
- este mai sensibil la factorii externi datorită expunerii sale în zona de variație a nivelului;
- poate fi deteriorat accidental sau voit;
- necesită măsuri speciale de drenaj pentru a nu supraîncărca structura în sens invers;
- datorită înclinării sale poate să crească cantitatea de material folosită.

Nucleele de etanșare prezintă următoarele avantaje:

- barajele cu nucleu din argila conlucrează mai bine cu terenul de fundare, prismele laterale fiind amplasate simetric față de nucleu;
- datorită masivității nucleului, calitatea materialului folosit în umplutură nu este atât de importantă;
- folosirea unui nucleu mai suplu poate să influențeze în mod favorabil timpii și costurile de execuție.

Dezavantajele barajelor cu nucleu central de argilă:

- folosirea tipurilor diferite de materiale poate să ducă la o decalare a ritmului de depunere a materialului, cu influențe negative asupra costurilor de execuție;
- în cazul în care fundație este permeabilă și la adâncime mare voalul de injecții trebuie efectuat înainte de începerea execuției.

Etanșările folosite la corpul barajelor din pământ se clasifică în:

- etanșări elastice: din argilă, covoare bituminoase și geomembrane;
- etanșări semielastice: din tole metalice, beton asfaltic și beton din pământ;
- etanșări rigide: din beton, beton armat și diafragme metalice.

Din punctul de vedere al materialului folosit la realizarea etanșării:

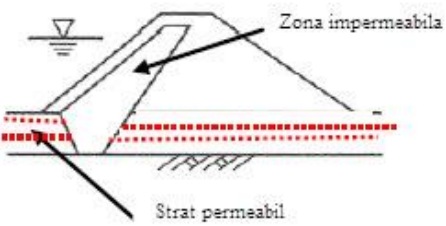
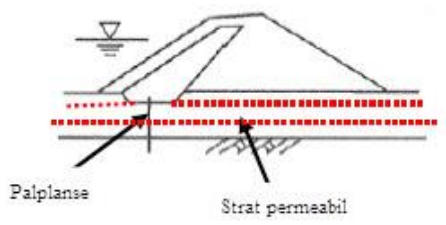
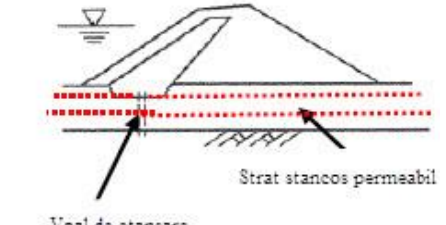
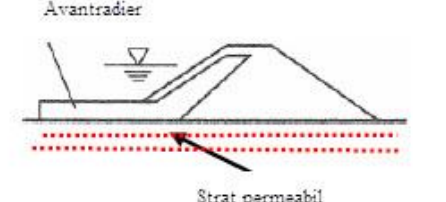
- etanșări din pământ natural;
- din beton de pământ sau hidraton;
- din beton sau beton armat;
- metalice;
- materiale bituminoase;
- folii din diverse materiale.

## 1.8. Tratarea terenurilor de fundare

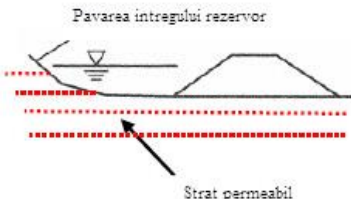
Pentru evitarea sufoziilor din fundații trebuie adoptate câteva soluții preventive: executarea de filtre sub și aval de baraj, executarea de lucrări de etanșare a fundației.

O prezentare sumară este făcută de normele japoneze care punctează puntele slabe ale fiecărei soluții:

Tabel 1.14 Avantajele și dezavantajele soluțiilor de tratare a terenurilor de fundare [96]

Grosimea stratului permeabil	Soluția propusă	Schiță	Aplicabilitate
Subțire	Ecran și pinten		Oferă impermeabiliz. completa fundației, dar se poate aplica doar în condițiile în care grosimea stratului permeabil este mai mică de o treime din înălțimea barajului
Medie	Palplanșe sau piloți secanți		Oferă impermeabilizare parțială. Nu este aplicabilă în terenuri ce conțin bolovani de mari dimensiuni. Oferă rezultate bune în cazul nisipurilor fine și a aluviunilor.
	Injectii		Se pliază bine în zone cu terenul de fundație stâncos
Mare	Radier amonte sau avat-radier		Rezolvă problema sufoziilor, dar soluția este scumpă



	Impermeabilizarea cunetei lacului		Deosebit de costisitoare. Aplicabilă doar în cazul în care infiltrațiile trebuie reduse la minim
--	-----------------------------------	--	--

## 1.9. Drenuri și filtre

Atunci când compactarea straturilor de depuneri este deficitara dea lungul straturilor apare o diferență de coeficienți de permeabilitate care fac ca infiltrațiile să fie locale și preferențiale, cu valori mari și efecte distructive. Soluția de remediere sau prevenire a acestor fenomene presupune plasarea și înglobarea în corpul barajelor din materiale locale a drenurilor și filtrelor inverse, care să controleze apele de infiltrație și să le conducă în afara corpului barajului fără a afecta structura internă a umpluturilor.

În cazul în care barajul este neomogen, la limita între umpluturi diferite pot să apară tasări diferențiate, ce duc la apariția fisurilor și traselor de infiltrație preferențială a apei din acumulare. Acest fenomen este limitat prin plasarea de filtre verticale de tip horn.

Prevenirea fenomenului de sufozie este eliminat în jurul golirilor de fund tot prin plasarea de material filtrant pe zona aval a golirii.

Grosimea drenurilor poate fi determinată folosind relația lui Darcy ( $Q=kiA$ ) prin determinarea ariei necesare. Panta hidraulică se determina prin scăderea cotei la intrarea în sistemul de filtrare și cota inferioară a acestuia și împărțirea la lungimea elementului.

Drenurile și filtrele inverse trebuie să respecte câteva criterii minimale:

Grosimea minimă a filtrelor este recomandată la 25 cm datorită limitărilor impuse de utilajele ce realizează aceste elemente.

Pentru împiedicarea fenomenului de sufozie ce poate să apară la nivelul drenului, se recomandă respectarea următoarelor criterii:

Tabel 1.15 Criterii împotriva sufoziei folosite la proiectarea drenurilor [95]

Număr criteriul	Descriere
1	$D_{15}$ filtru / $D_{85}$ baza > 5
2	$D_{15}$ filtru / $D_{50}$ baza < 25
3	$D_{15} / D_{85} < 5$ pentru nisip prăfos și argile ( $D_{85}$ de la 0,1 la 0,5)
4	$D_{15} < 0,5$ argile fine ( $D_{85}$ de la 0,3 la 0,1)
5	$D_{15} < 0,3$ aluviuni fine cu coeziune și plasticitate mica ( $LL < 30$ ( $D_{85}$ de la 0,3 la 0,1)
6	$D_{15} < 0,2$ soluri fine ( $D_{85}$ de 0,02)

Pentru a asigura o bună filtrare din punct de vedere cantitativ:

Tabel 1.16 Criterii de filtrare [95]

Număr criteriul	Detalii
1	$5 < D_{15} \text{ filtru} / D_{15} \text{ baza} < 40$
2	Dimensiune granulei asociată cu dimensiunea ciurului de 0,075 în compoziția granulometrică a nisipului folosit trebuie să fie în procent mai mic de 5%

Criteriul de uniformitate:

Tabel 1.17 Criterii de uniformitate [95]

Caracteristica	Limita inferioara	Limita superioara
Uniform: $D_{60}/D_{10} =$ de la 3 la 4	5	40
Neuniform: granule sferice	12	40
Neuniform: granule cu muchii ascuțite	6	18

Criteriul de stabilitate:

Tabel 1.18 Criterii de stabilitate [95]

$Cu = D_{60}/D_{10}$	Principii
10	Posibila instabilitate intrinseca
$10 < Cu < 20$	Stabilitatea intrinseca este posibila doar în soluri care schimba brusc curbura granulometrica
$20 < Cu < 75$	Solul va fi stabil doar în cazul în care curba granulometrica este lina și nu conține zone plate importante

Cantitatea de material organic este limitată la 2%.

Pentru întreprinderea unui studiu cu privire la modul de comportare în exploatare a barajelor cu acumulări nepermanente în varianta transformării lor în baraje cu acumulare permanentă este nevoie în primul rând de o bună cunoaștere a situației existente la nivel național și nu numai. În acest sens acest prim capitol stabilește situația națională a barajelor ce se pretează la acest tip de investiții. Mai departe, odată stabilit ce fel de baraje intra în această categorie a putut fi restrânsă aria de studiu la barajele omogene din pământ. Cunoașterea detaliilor constructive cu privire la modul de alcătuire a secțiunii transversale a unui baraj din pământ în diverse țări cu tradiție în domeniul hidrotehnic, de modul de rezolvare a infiltrațiilor prin și pe sub corpul barajului, despre drenarea apelor de infiltrații, a modului de protecție a taluzelor la acțiunea mecanică a apelor din lac și al apelor provenite din precipitații trebuie să fie punctul de pornire în cercetările ce urmează a fi făcute cu privire la modul de comportare în exploatare.

## 2. CALCULUL INFILTRAȚIILOR PRIN METODE CLASICE

Permeabilitatea este definită ca fiind proprietatea pământurilor de a permite scurgerea fluidelor printr-o serie de goluri interconectate.

Toate tipurile de pământuri sunt formate din particule solide și o serie de goluri interconectate. Continuitatea acestor goluri permite apei să se deplaseze spre zonele cu energie scăzută.

Mișcarea apei poate duce în unele cazuri la dislocarea de particule fine din corpul umpluturii. Continuarea acestui fenomen poate duce la eroziuni ale structurii interne, ce pot duce într-un final la cedări ale barajelor din pământ. Cunoașterea și modelarea acestui fenomen poate preîntâmpina aceste neplăceri. Presiuni crescute ale apei în pori, taluze saturate sunt fenomene ce predispun apariția acestor fenomene de cedare.

Forțele de antrenare și presiunea apei în pori, pot afecta stabilitatea locală a taluzelor aval și amonte, poziția curbei de infiltrații influențează caracteristicile geofizice ce intră în calculul stabilității, gradientii hidraulici mari la ieșirea pe taluzul aval poate duce la fenomenul de antrenare a materialului fin, erodarea internă poate duce la pierderea stabilității interne prin crearea de goluri mari și instabile etc.

Situațiile critice ce apar în cazul barajelor din pământ pot fi următoarele:

- infiltrațiile au loc prin baraje realizate din pământuri cu plasticitate redusă;
- infiltrațiile de-a lungul golurilor de fund sau a prizelor de apă ce străbat corpul barajului;
- infiltrațiile la contactul între corpul barajului și pereți verticali din beton;
- infiltrațiile de la drenul de la piciorul aval;
- infiltrații de-a lungul contactului între baraj și fundații impermeabile;
- traseele de infiltrare orizontale, sau cu o mică componentă verticală;
- baraje pe fundații permeabile, la care tratamentul de etanșare nu a fost făcut până la stratul impermeabil.

O analiză asupra comportării barajelor omogene din pământ nu poate fi făcută fără o cunoaștere temeinică a fenomenului de mișcare a apei prin medii poroase.

Chiar dacă în noile Eurocoduri simularea mișcării subterane pentru structuri importante, cum ar fi barajele trebuie făcută folosind metoda elementelor finite, este important să cunoaștem și metodele clasice de estimare a elementelor hidraulice ale curgerii.

## 2.1. Legea lui Darcy

Schema clasică definită de modelul Darcy presupune considerarea unei secțiuni libere de curgere pentru care se poate scrie relația  $q = vA$ .

Mediul poros prezent în secțiunea de curgere este modelat prin introducerea în calculul vitezei de curgere aparentă, a coeficientului de permeabilitate  $k$ .

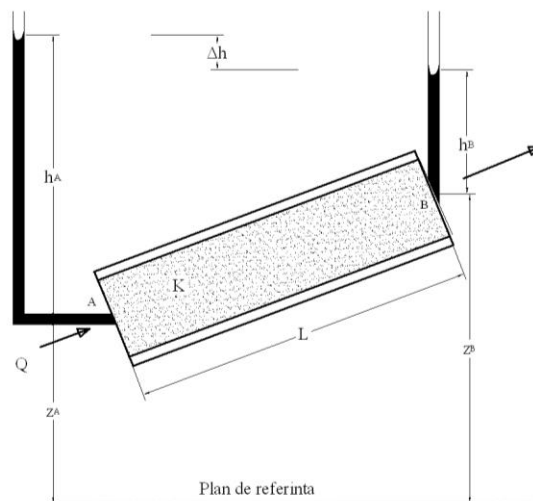


Figura 2.1 Schema de baza a permeametrului

Conform ecuației lui Bernoulli, sarcină totală este formată din termenul cinetic, termenul potențial și lucrul mecanic efectuat de forțele de contact.

$$H = \frac{\alpha v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \quad (2.1)$$

Având în vedere ca viteza este foarte mică, termenul cinetic se poate neglija, iar  $\frac{p}{\gamma} = h$  unde  $h$  este adâncimea apei în punctul în care se determină sarcina totală relația de mai sus se poate scrie sub forma:

$$H = h + z \quad (2.2)$$

Astfel în punctul A sarcina totală este:

$$H_A = h_A + z_A \quad (2.3)$$

iar în punctul B

$$H_B = h_B + z_B \quad (2.4)$$

Consumul de energie între punctele A și B este egal cu:

$$\Delta h = H_A - H_B = (h_A + z_A) - (h_B + z_B) \quad (2.5)$$

Panta hidrolică este egală cu

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.6)$$

În 1856 Darcy [24] a publicat o relație simplă observând că viteza este direct proporțională cu gradientul hidrolic

$$v = ki \quad (2.7)$$

În relația 2.7 notațiile folosite sunt:

$v$  - viteza medie;

$k$  - coeficientul de permeabilitate;

$i$  - panta hidrolică (gradientul hidrolic).

Pentru a determina cantitatea de apă scursă prin secțiunea cu suprafața egală cu  $A$  se poate scrie relația  $q = kiA$ , cu mențiunea că vectorul vitezei  $v$  este normal pe suprafața.

Coeficientul de permeabilitate are unitatea de măsură a vitezei și reprezintă imaginea rezistenței la înaintare întâmpinată de fluid prin terenul pe care îl parcurge. Acest coeficient va fi tratat în amănunt în capitolul 3.

## 2.2. Calculul infiltrațiilor folosind spectrul hidrodinamic la terenuri omogene

Ecuțiile mișcării prin medii poroase sunt prezentate în capitolul următor, pentru toate tipurile de mișcare, pentru lichide incompresibile prin medii nedeformabile.

Un tub de curent este fâșia localizată între două linii de curent. Pentru a determina debitul infiltrat pe sub o structură se consideră un tub de curent ca în figura 2.3:

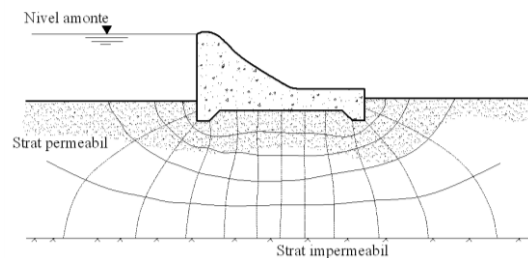


Figura 2.2 Spectru hidrodinamic

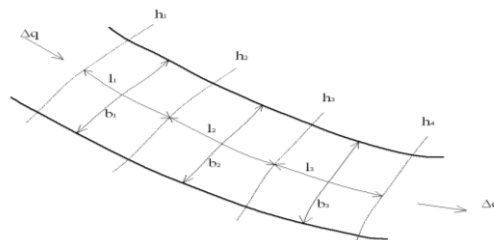


Figura 2.3 Detaliu tub de curent pentru terenuri omogene

În figura 2.3 pe lângă tubul de curent cuprins între două linii de curent sunt reprezentate și liniile echipotențiale. Debitul  $\Delta q$  poate fi determinat conform legii lui Darcy:

$$\Delta q = kiA = k \left( \frac{h_1 - h_2}{l_1} \right) (b_1 \times 1) = k \left( \frac{h_2 - h_3}{l_2} \right) (b_2 \times 1) = \dots \quad (2.8)$$

Dacă elementele prin care are loc curgerea se consideră pătrate atunci  $l_1=b_1, l_2=b_2, \dots$  și înlocuind în relație (2.8) se obține:

$$h_1 - h_2 = h_2 - h_3 = h_3 - h_4 = \Delta h = \frac{h}{N_d} \quad (2.9)$$

În care:

$\Delta h$  se numește scădere de potențial (diferența între două echipotențiale),

$h$  - sarcina totală,

$N_d$  - numărul de pași (de scăderi de potențial).

Relația (2.9) arată că pierderea de sarcină între două linii echipotențiale consecutive este aceeași. Rezulta că:

$$\Delta q = k \left( \frac{h}{N_d} \right) \quad (2.10)$$

Dacă  $N_f$  reprezintă numărul de tuburi de curent debitul total se poate obține însumând  $\Delta q$ :

$$q = N_f \Delta q = kh \frac{N_f}{N_d} \quad (2.11)$$

Deși spectrul hidrodinamic se construiește în așa fel încât elementele să fie aproximativ pătratice, acest lucru nu este întotdeauna posibil. Dacă se alcătuieste spectrul hidrodinamic folosind elemente dreptunghiulare se urmărește că raportul între laturi să fie egal:

$$\frac{b_1}{l_1} = \frac{b_2}{l_2} = \frac{b_3}{l_3} = \dots n \quad (2.12)$$

Pentru acest tip de spectru debitul total este:

$$q = kh \frac{N_f}{N_d} n \quad (2.13)$$

### 2.3. Calculul infiltrațiilor folosind spectrul hidrodinamic la terenuri neomogene

În cele mai multe cazuri întâlnite în practică, terenurile sunt formate din straturi cu proprietăți fizice diferite. Atunci când se construiește spectrul hidrodinamic la trecerea de la un strat la altul trebuie puse câteva „condiții de

### 2.3- Calculul infiltrațiilor folosind spectrul hidrodinamic la terenuri neomogene

transfer". În figura de mai jos se prezintă trecerea de la un sol de tip 1 cu coeficientul  $k_1$  la solul de tip doi cu  $k_2$ . Pierderea de sarcină se consideră egală cu  $\Delta h$ , iar grosimea stratului se consideră unitară. Astfel debitul prin acest tub de curent poate fi calculat cu relația 2.14:

$$\Delta q = k_1 i A = k_1 \left( \frac{\Delta h}{l_1} \right) (b_1 \times 1) = k_2 \left( \frac{\Delta h}{l_2} \right) (b_2 \times 1) = \dots \quad (2.14)$$

Sau:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{b_2 / l_2}{b_1 / l_1} \quad (2.15)$$

În care  $l_1$  și  $b_1$  sunt lungimea și lățimea elementului din tubul de curent cuprins între două echipotențiale pentru solul 1 iar  $l_2$  și  $b_2$  pentru elementele din tubul de curent al solului de tip 2.

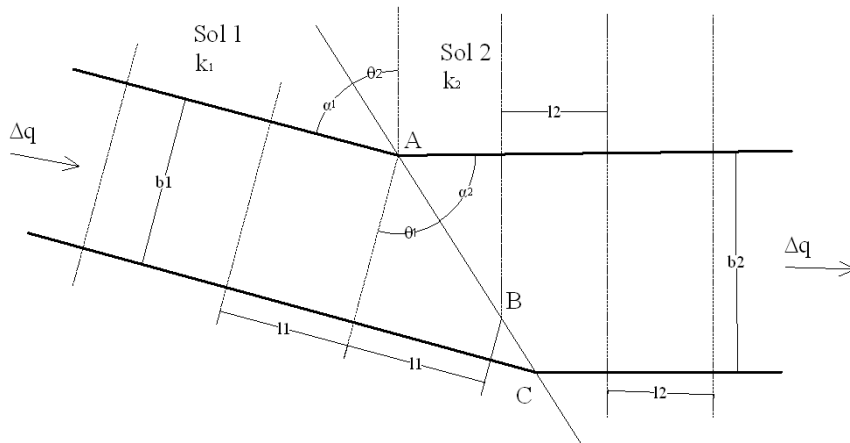


Figura 2.4 Detaliu tub de curent pentru terenuri neomogene

Conform figurii 2.4 rezulta ca:

$$\frac{b_2}{l_2} = \frac{\cos \theta_2}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \alpha_2}{\cos \alpha_2} \quad (2.16)$$

$$\frac{b_2}{l_2} = \frac{1}{\tan \theta_2} = \tan \alpha_2 \quad (2.17)$$

Pentru soluri neomogene:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} \quad (2.18)$$

## 2.4. Forțe de antrenare la curgerea apei prin medii poroase

La curgerea apei prin medii poroase apar forțe de antrenare ce trebuie considerate în calculul stabilității locale a taluzelor. Pentru a stabili valoarea acestor forțe se izolează din domeniul ce este analizat o porțiune cuprinsă între două linii de curent  $ab$  și  $cd$ , respectiv două linii echipotențiale  $ef$  și  $gh$ .

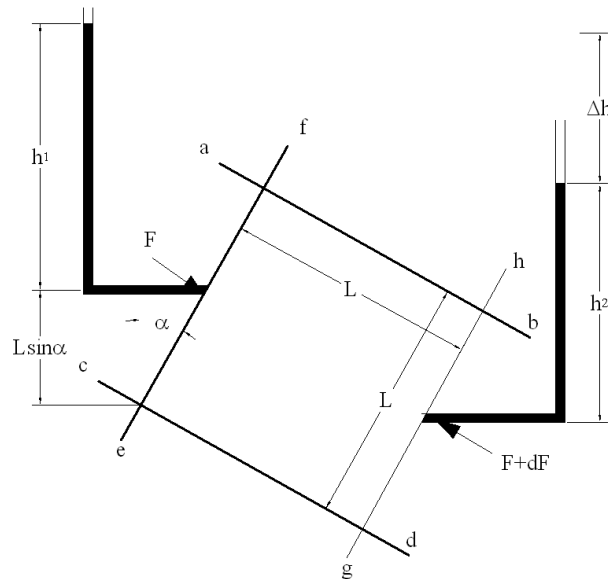


Figura 2.5 Detaliu element supus forțelor de antrenare

Având în vedere că zonă analizată este saturată, greutatea porțiunii analizate este egală cu  $G = L \times L \times 1 \times \gamma_{sat} = L^2 \times \gamma_{sat}$  (lungimea x lățimea x grosimea x greutatea specifică saturată). Forța hidrostatică ce acționează pe suprafața  $ef$  este egală cu  $h_1 \times \gamma_w \times L \times 1$ , iar pe suprafața  $gf$   $h_2 \times \gamma_w \times L \times 1$ .

Scriind echilibrul se obține:

$$\Delta F = h_1 \gamma_w L + L^2 \gamma_{sat} \sin \alpha - h_2 \gamma_w L \quad (2.19)$$

Geometric:  $h_1 + L \sin \alpha = h_2 + \Delta h$  rezultă că  $h_2 = h_1 + L \sin \alpha - \Delta h$ .

Deci:

$\Delta F = h_1 \gamma_w L + L^2 \gamma_{sat} \sin \alpha - (h_1 + L \sin \alpha - \Delta h) \gamma_w L = L^2 \gamma' \sin \alpha + \Delta h \gamma_w L$ . Deci forța de antrenare este  $F = i \gamma_w$  în care  $i$  este panta hidrolică.



## 2.5. Calculul infiltrațiilor la baraje fondate pe terenuri impermeabile

Pentru calculul infiltrațiilor la baraje omogene din materiale locale de-a lungul timpului au fost propuse mai multe soluții și metode de calcul. Din acestea am selectat pentru prezentare pe cele mai cunoscute și des utilizate metode.

### 2.5.1. Metoda Dupuit

În figura 2.6 se notează cu  $ab$  curba de infiltrații care în această metodă este considerată a fi locul geometric sub care are loc curgerea. Debitul infiltrat se calculează cu relația lui Darcy  $q = kiA$ . Dupuit [27] (1863) consideră că panta hidrolică corespunde pantei calculată la nivelul curbei de infiltrații și nu variază pe adâncime  $i = \frac{dz}{dx}$ .

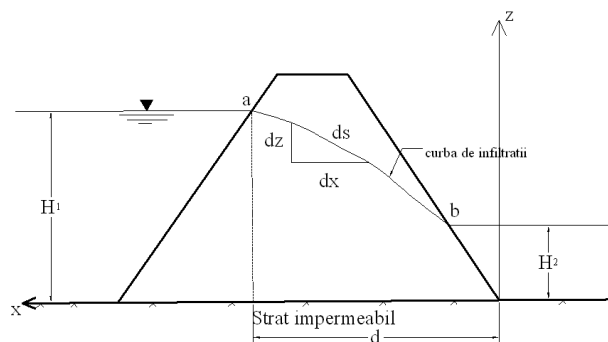


Figura 2.6 Baraj omogen pe strat impermeabil. Metoda Dupuit

Luând în considerare această ipoteză și o grosime unitară, relația lui Darcy devine:

$$q = k \frac{dz}{dx} [(z) \cdot (1)] = k \frac{dz}{dx} z \quad (2.20)$$

Prin însumare între limitele domeniului se obține:

$$\int_0^d q dx = \int_{H_2}^{H_1} kz dz \quad (2.21)$$

$$qd = \frac{k}{2} (H_1^2 - H_2^2) \quad (2.22)$$

Sau:

$$q = \frac{k}{2d} (H_1^2 - H_2^2) \quad (2.23)$$

Din forma ecuației de mai sus rezultă că forma curbei de infiltrație este parabolică și trebuie avut în vedere că nu s-a pus nici o condiție în ceea ce privește modul de pătrundere sau ieșire a apei în și din masivul de pământ. Astfel, dacă nivelul apei în aval este  $H_2 = 0$ , curba de infiltrație va intersecta stratul impermeabil.

### 2.5.2. Metoda Schaffernak

În 1917 Schaffernak propune următoarea schemă pentru a rezolva problema infiltrațiilor prin baraje din materiale locale:

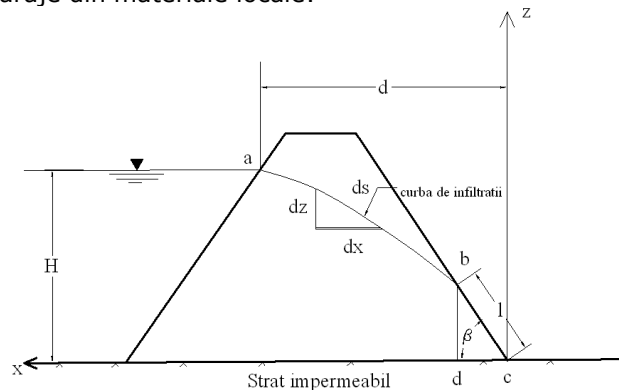


Figura 2.7 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apă în aval. Metoda Schaffernak

Și el notează cu  $ab$  curba de infiltrații, însă pune condiția de ieșire din masivul analizat, în așa fel încât să fie evitată situația în care curba de infiltrații ar intersecta stratul impermeabil. El consideră că, curba de infiltrații va intersecta taluzul aval la o distanță  $l$  de piciorul aval al barajului  $bcd$ .

$$q = kiA \quad A = (\overline{bd}) \cdot (1) = l \sin \beta \quad (2.24)$$

Mai departe Schaffernak urmează pașii descriși de Dupuit și rezolvă problema considerând panta hidrolică egală pe adâncime și egală cu panta curbei

$$\text{de infiltrație} \quad i = \frac{dz}{dx} = \tan \beta$$

$$q = k \frac{dz}{dx} z = (k)(l \sin \beta)(\tan \beta) \quad (2.25)$$

sau

$$\int_{l \sin \beta}^H z dz = \int_{l \cos \beta}^d (l \sin \beta)(\tan \beta) dx \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{2}(H^2 - l^2 \sin^2 \beta) = (l \sin \beta)(\tan \beta)(d - l \cos \beta) = l \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} (d - l \cos \beta) \quad (2.27)$$

$$l^2 \cos \beta - 2ld + \frac{H^2 \cos \beta}{\sin^2 \beta} = 0 \quad (2.28)$$

Deci:

$$l = \frac{d}{\cos \beta} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \beta} - \frac{H^2}{\sin^2 \beta}} \quad (2.29)$$

Odată cunoscută valoarea lui  $l$  se poate trece la calcularea debitului de infiltrație cu relația:  $q = kl \sin \beta \tan \beta$ .

Rezolvarea grafică a problemei se poate face astfel:

1. se prelungeste linia  $bc$  până la intersecția cu verticala dusă din punctul  $a$  și se notează intersecția acestor drepte cu  $f$ ;
2. se trasează un semicerc cu diametrul  $cf$ ;
3. se duce o orizontală din punctul  $a$  și se notează intersecția ei cu taluzul aval cu litera  $g$ ;
4. se ia în compas raza egală cu  $cg$  și se trasează un arc de cerc cu centrul în  $c$  până se intersectează semicercul trasat la pasul 2 se notează intersecția cu litera  $h$ ;
5. poziționând acul compasului în punctul  $f$  se alege raza egală cu  $fh$  și se trasează un arc de cerc până la intersecția cu linia taluzului aval. Se notează intersecția cu litera  $b$ ;
6. lungimea segmentului  $bc=l$ .

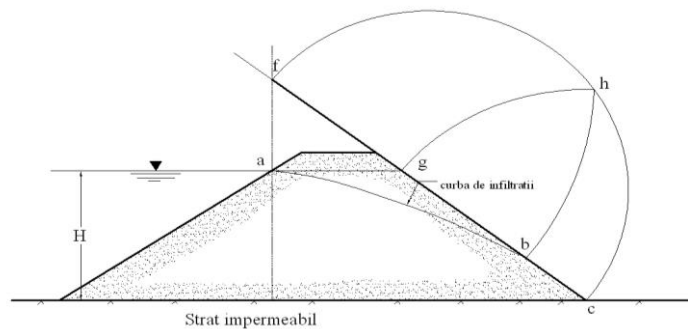


Figura 2.8 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apă în aval. Metoda grafică

### 2.5.3. Metoda Casagrande

În 1937, Casagrande [16] demonstrează experimental ca parabola  $ab$  trebuie de fapt să pornească din punctul  $a'$  așa cum este arătat în figura de mai jos. Deci valoarea lui  $d$  trebuie măsurată între punctele  $a'$  și  $c$ .

Casagrande consideră că determinarea gradientului cu relația  $i = \frac{dz}{dx}$  este o aproximare ce influențează rezultatul final. El propune calculul lui  $i$  cu relația:  $i = \frac{dz}{ds}$ , conform figurii 2.9

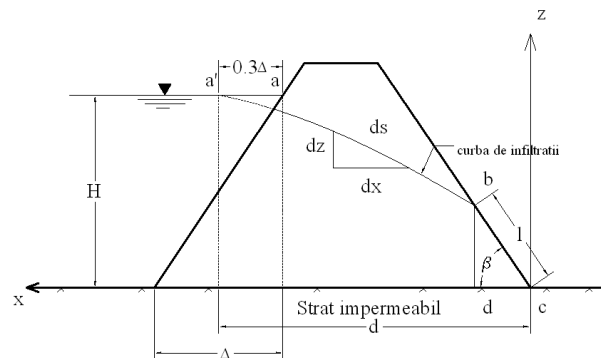


Figura 2.9 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apa în aval. Metoda Casagrande

În cazul în care unghiul făcut de taluzul aval cu orizontala este  $\beta > 30^0$  metoda lui Dupuit devine „foarte aproximativă”. Folosind teoria lui Casagrande care consideră că  $i = \frac{dz}{ds} = \sin \beta$  și făcând un calcul unitar  $A = (\overline{bd})(1) = l \sin \beta$  se

obține următoarea formă pentru determinarea debitului:  $q = k \frac{dz}{ds} z = kl \sin^2 \beta$ .

Prin integrare și considerând că  $s$  este lungimea curbei  $a'bc$  rezultă ecuația de gradul 2:

$$l^2 - 2ls + \frac{H^2}{\sin^2 \beta} = 0 \quad (2.30)$$

Cu soluția:

$$l = s - \sqrt{s^2 - \frac{H^2}{\sin^2 \beta}} \quad (2.31)$$

Asimilând curba  $a'bc$  cu o dreaptă se introduce în calcul o eroare de 4-5%:

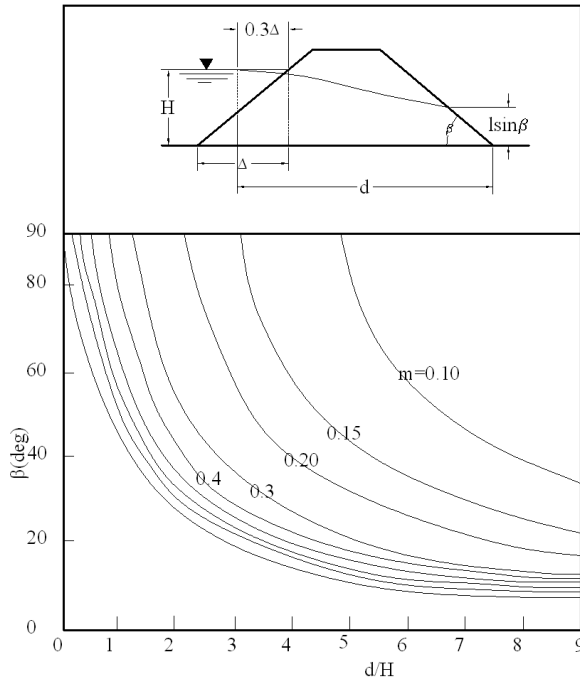
$$s = \sqrt{d^2 + H^2}$$

$$\text{Rezultă: } l = \sqrt{d^2 + H^2} - \sqrt{d^2 - H^2 \cot^2 \beta}$$

Odată cunoscut  $l$  valoarea debitului unitar poate fi calculat cu relația:

$$q = kl \sin^2 \beta.$$

În cazul în care aproximația de 4-5% nu este acceptabilă atunci Gilboy (1934) [42] și Taylor (1948) [100] propun soluția exactă, ultimul oferind o rezolvare grafică a problemei infiltrațiilor prin baraje.



Rezolvarea problemei presupune parcurgerea următorilor pași:

1. se calculează  $\frac{d}{H}$ ;
2. cu valoarea  $\frac{d}{H}$  și  $\beta$  se determină grafic  $m$ ;
3. se calculează  $l = \frac{mH}{\sin \beta}$ ;
4. debitul este egal cu  $q = kl \sin^2 \beta$ .

#### 2.5.4. Metoda Pavlovsky

Această metoda [77] propune divizarea masivului de pământ în trei zone distincte, debitele putând fi calculate pentru fiecare zonă după cum urmează:

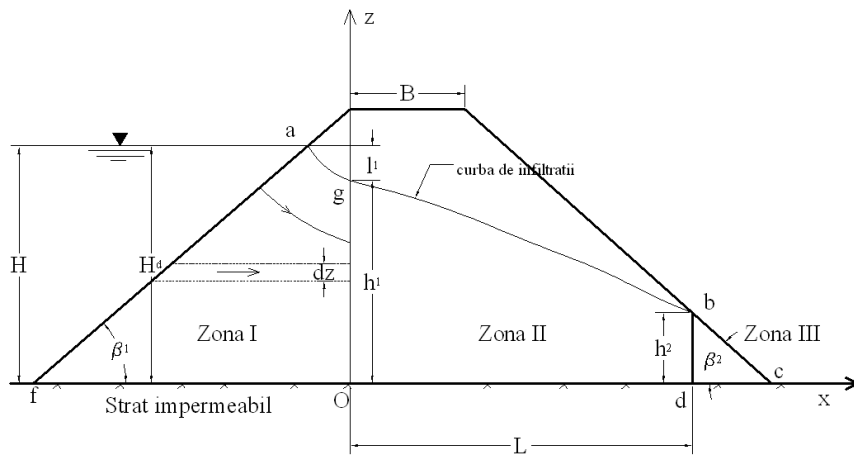


Figura 2.10 Baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apă în aval. Metoda Pavlovsky

#### Zona I (suprafața agOf)

Pe această zonă liniile de curent sunt curbilinii, dar Pavlovsky le consideră linii orizontale. Împarte suprafața în fâșii orizontale cu înălțimea  $dz$ :

$$dq = kida \quad (2.32)$$

$$dA = (dz)(1) = dz \quad (2.33)$$

Odată făcute aceste aproximații se poate determina panta hidraulică:

$$i = \frac{\text{pierderile de sarcină, } l_1}{\text{lungimea liniei de curent}} = \frac{l_1}{(H_d - z)\cot \beta_1} \quad (2.34)$$

Însumând debitele pe fiecare fâșie în parte se obține:

$$q = \int dq = \int_0^{h_1} \frac{kl_1}{(H_d - z)\cot \beta_1} dz = \frac{kl_1}{\cot \beta_1} \ln \frac{H_d}{H_d - h_1} \quad (2.35)$$

Pentru că  $l_1 = H - h_1$  rezultă:

$$q = \frac{k(H - h_1)}{\cot \beta_1} \ln \frac{H_d}{H_d - h_1} \quad (2.36)$$

### **Zona II (suprafața Ogbd)**

Pe această zonă se aplică metoda lui Dupuit:

$$q = \frac{k}{2L} (h_1^2 - h_2^2) \quad (2.37)$$

În care:

$$L = B + (H_d - h_2)\cot \beta_2 \quad (2.38)$$

### **Zona III (suprafața bcd)**

La fel ca în Zona I se consideră liniile de curent orizontale și se obține relația de calcul a debitului prin integrare:

$$q = \int_0^{h_2} \frac{dz}{\cot \beta_2} = \frac{kh_2}{\cot \beta_2} \quad (2.39)$$

În final se obține  $\frac{H - h_1}{\cot \beta_1} \ln \frac{H_d}{H_d - h_1} = \frac{h_2}{\cot \beta_2}$   $h_1$  și  $h_2$  sunt necunoscute și

pot fi obținute pe cale grafică.

## **2.6. Calculul infiltrațiilor prin baraje fundate pe terenuri impermeabile de grosime finită**

În majoritatea cazurilor terenul de fundare este permeabil, la calculul infiltrațiilor trebuie considerat și aportul acestuia. În acest caz problema se poate reduce la cazul barajului omogen pe fundație impermeabilă, prelungind taluzurile barajului până la intersecția cu stratul impermeabil și considerând în mod acoperitor că barajul ar lucra pe tot conturul.

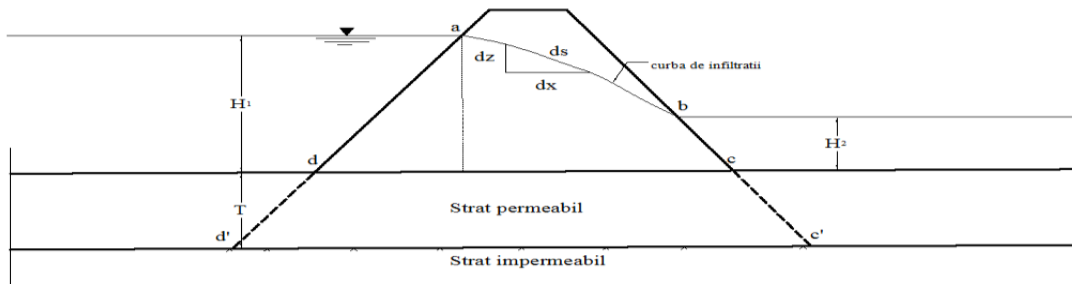


Figura 2.11 Model de calcul al infiltrației pentru un baraj omogen pe strat permeabil.

## 2.7. Calculul infiltrațiilor prin baraje anizotropice

Dacă terenul prezintă un comportament anizotrop, primul pas îl reprezintă deformarea scării de reprezentare a masivului de pământ:  $x' = \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} x$ . Calculele ulterioare trebuie făcute pe noul model reprezentat la scară deformată, debitele fiind obținute folosind un coeficient de permeabilitate egal cu  $\sqrt{k_z k_x}$ .

## 2.8. Trasarea curbei de infiltrație la baraje de pământ

Pentru determinarea spectrului hidrodinamic este nevoie în primul rând de calcularea și determinarea curbei de infiltrații. În cele mai multe cazuri metoda folosită este Casagrande. Curba de infiltrații este parabolică și coincide cu realitatea cu excepția zonelor de intrare și ieșire din masivul de pământ. În punctul *a* curba de infiltrații intră în masiv la un unghi de 90 de grade pornind de la o distanță  $aa' = 3\Delta$ .

Parabola  $a'efb'c'$  poate fi construit după cum urmează:

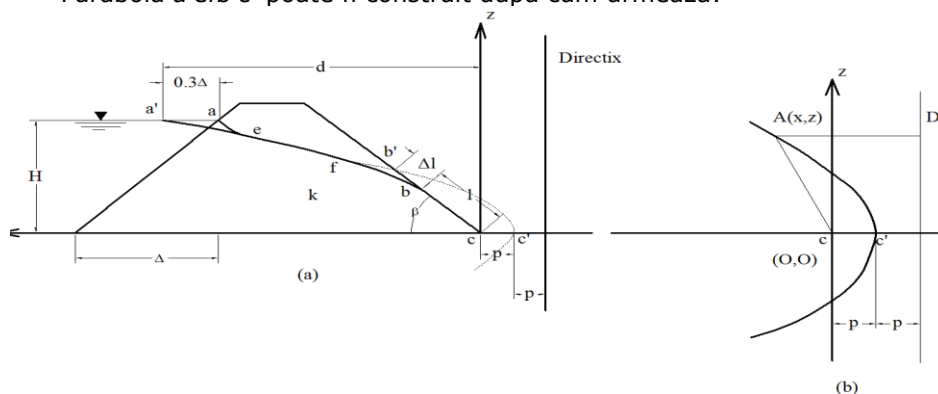


Figura 2.12 Trasarea curbei de infiltrații pentru un baraj omogen pe strat impermeabil fără nivel de apă în aval.

Pe baza proprietăților parabolei  $Ac=AD$ ,  $Ac = \sqrt{x^2 + z^2}$  și  $AD = 2p + x$ .  
Egalând cele două relații:

$$\sqrt{x^2 + z^2} = 2p + x \quad (2.40)$$

Atunci când  $x=d$ ,  $z=H$ :

$$p = \frac{1}{2}(\sqrt{d^2 + H^2} - d) \quad (2.41)$$

Înlocuind în relația 2.41

$$x^2 + z^2 = 4p^2 + x^2 + 4px \quad (2.42)$$

$$x = \frac{z^2 - 4p^2}{4p} \quad (2.43)$$

Din relația de mai sus putem determina valorile lui  $x$  în raport cu variabila  $z$  (având în vedere ca  $p$  este cunoscut).

Pentru a finaliza forma curbei de infiltrații segmentul  $ae$  trebuie aproximat și trasat manual. Dacă  $\beta < 30^\circ$ :

$$l = \frac{d}{\cos \beta} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos \beta} - \frac{H^2}{\sin^2 \beta}} \quad (2.44)$$

Deoarece în figura de mai sus  $l=bc$  punctul  $b$  poate fi determinat, urmând ca segmentul  $fb$  să fie trasat de mână.

Chiar dacă în prezenta lucrare nu s-au efectuat calcule clasice cu privire la infiltrații, având în vedere ca s-a studiat cu precădere mișcarea nepermanentă, cunoștințele acumulate au fost folosite la interpretarea rezultatelor parțiale obținute pe parcursul calibrării programelor de calcul scrise cu ocazia acestei teze.



### 3. ECUAȚIILE MIȘCĂRII APEI PRIN MEDII POROASE

#### 3.1. Ecuatiile mișcării permanente

Se consideră o porțiune infinit mică dintr-un mediu poros permeabil cu dimensiunile  $dx, dy, dz$ , cu suprafețele laterale  $dA_x, dA_y$  și  $dA_z$ .

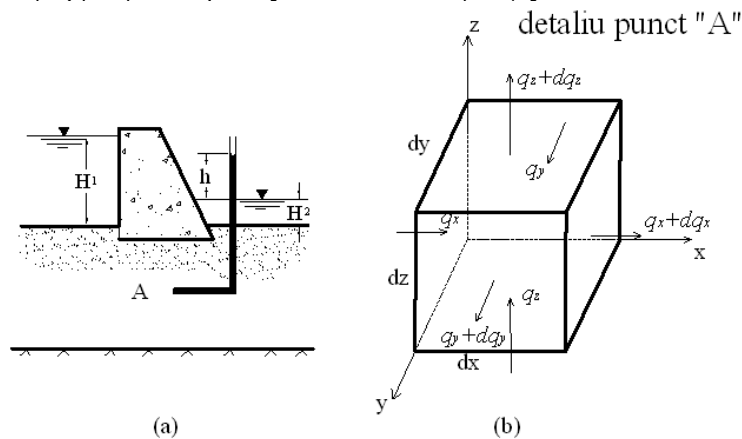


Figura 3.1 Detaliu mediu poros

Legea conservării masei în cazul mișcării permanente consideră că masa lichidului ce intră în volumul izolat infinit mic este egală cu masa volumului ce părăsește acest volum,

În vederea analizei se consideră o rată unitară de intrare în volumul de control pe cele trei direcții  $\rho v_x, \rho v_y, \rho v_z$  în care  $\rho$  este densitatea apei, iar  $v_x, v_y, v_z$  componentele vitezei aparente normale la suprafețele laterale ale volumului  $dV$ . Folosind serii Taylor pentru aproximarea ratei de părăsire a apei pe direcția  $x$  se poate scrie:

$$\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)\Delta x + \frac{\partial^2}{2!\partial x^2}(\rho v_x)\Delta x^2 + \dots \quad (3.1)$$

Având în vedere că volumul de control este foarte mic termenii de ordin ridicat pot fi neglijați, iar pentru că se consideră  $dx = dy = 1$  masa de lichid ce părăsește volumului de control este:

$$\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)$$

Valoarea netă a masei de lichid ce părăsește volumul după direcția axei x este:

$$\rho v_x - \left( \rho v_x + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) \quad (3.2)$$

Având în vedere că tot ceea ce intră trebuie să iasă înseamnă că suma maselor nete trebuie să fie egală cu zero:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (3.3)$$

Dacă lichidul este incompresibil ( $\rho = ct$ )

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) = -\left[ \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] = -\rho \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (3.4)$$

Dacă se procedează la fel și pe celelalte două direcții:

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

Conform legii lui Darcy vitezele aparente sunt egale cu:

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.6)$$

Înlocuind în relația (3.5) se obține relația ce descrie mișcarea permanentă a apei prin medii saturate:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.7)$$

În cazul în care curgerea are loc prin medii nesaturate atunci coeficientul de permeabilitate este funcție de presiunea apei în pori:  $K = K(\psi)$ . Funcțiile ce descriu valoarea coeficientului de permeabilitate pentru terenurile nesaturate vor fi prezentate într-un capitol distinct.

Deci:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Având în vedere că sarcina hidraulică  $h$  conform ecuației lui Bernoulli:

$h = \psi + z^*$  (viteza aparentă mică face ca termenul cinetic să fie neglijabil)

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\psi + z^*) = \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial z^*}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\psi + z^*) = \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial z^*}{\partial z} = \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \quad (3.11)$$

Deci ecuația mișcării permanente prin medii nesaturate devine:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = 0 \quad (3.12)$$

### 3.2. Ecuatiile mișcării nepermanente

Legea de conservare a masei pentru volumul de control (figura 3.1) se scrie ținând cont că diferența între masa de apă ce pătrunde și masa de apă ce părăsește această zonă este egală cu masa volumului de apă ce este înmagazinată sau părăsește zona respectivă.

Rata netă este egală cu:  $= -\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)$ , iar în ipoteza

mișcării permanente aceasta valoare este egală cu 0.

În cazul mișcării nepermanente ecuația devine:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho n) \quad (3.13)$$

în care  $n$  este porozitatea.

Termenul din dreapta se poate scrie:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = \frac{\partial}{\partial h}(\rho n) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.14)$$

Se observă că și în cazul mișcării nepermanente schimbul de fluide cu volumul  $dV$  este în funcție de sarcina hidraulică  $h$ .

Dezvoltând primul termen din dreapta se obține:

$$\frac{\partial}{\partial h}(\rho n) = \rho \frac{\partial n}{\partial h} + n \frac{\partial \rho}{\partial h} \quad (3.15)$$

În relația 3.15 primul termen îl reprezintă modificarea dimensiunilor porilor datorită presiunii, cel de-al doilea termen schimbare masei de apă datorată acestei modificări a porozității. În cazul mișcării saturate apă poate să pătrundă doar în cazul în care porozitatea crește  $\frac{\partial n}{\partial h} > 0$  sau dacă densitatea crește  $\frac{\partial \rho}{\partial h} > 0$ .

În continuare se definesc termenii compresibilitatea mediului poros  $\alpha$  și compresibilitatea fluidului  $\beta$ .

Comprimarea sau extinderea porozității este datorată modificării stării de eforturi  $\sigma_e$ . În cazul în care mediul este saturat:

$$d\sigma_e = -\rho g d\psi \quad (3.16)$$

$\psi$  este presiunea apei în pori

Având în vedere ca  $d\psi = d'(h - z^*) = dh - dz^*$  și  $dz^* = 0$  se poate scrie  $d\sigma_e = -\rho g dh$

Compresibilitatea mediului poros este definită ca fiind:

$$\alpha = -\frac{dV_f}{V} \frac{1}{d\sigma_e} = \frac{dn}{d\sigma_e} \quad (3.17)$$

În care  $V_f$  este volumul apei, iar  $v$  este volumul de control.

Din relațiile (3.16) și (3.16) rezultă:

$$\frac{dn}{dh} = \alpha \rho g \quad (3.18)$$

Compresibilitatea apei este definită ca fiind:

$$\beta = \frac{dV_f}{V_f} \frac{1}{dp} \quad (3.19)$$

În care  $p$  este presiunea apei

Dacă creșterea presiunii este dată de relația:

$$dp = \rho g d\psi = \rho g dh \text{ și } \frac{dV_f}{V_f} = \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.20)$$

rezultă:

$$\beta = \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\rho g dh} \quad (3.21)$$

sau

$$\frac{d\rho}{dh} = \beta \rho^2 g \quad (3.22)$$

Rezultă

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = \left( \rho \frac{\partial n}{\partial h} + n \frac{\partial \rho}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = (\rho^2 g \alpha + n \rho^2 g \beta) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.23)$$

Definim capacitatea de înmagazinare specifică  $S_s$  ca fiind volumul de apă eliberat de un volum unitar pentru o scădere unitară a sarcinii hidraulice.

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (3.24)$$

Înlocuind în relația (3.23) se obține

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.25)$$

Si

$$-\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) - \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.26)$$

Dacă lichidul se consideră izotrop (densitate egală pe toate direcțiile) rezultă că:

$$\rho \left( -\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.27)$$

Simplificând densitatea și înlocuind vitezele cu relațiile date de legea lui Darcy rezultă:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.28)$$

Dacă materialul este omogen și permeabilitățile sunt constante în tot volumul rezultă că:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.29)$$

Iar dacă materialul este și izotrop:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.30)$$

În cazul mișcării plane, dacă se consideră volumul de grosime constanta  $b$ , atunci:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.31)$$

În care  $S = S_s b$  și  $T = Kb$

În cazul mișcării nepermanente prin medii umiditate este variabilă în timp:

$$\theta' = \theta'(t) \quad (3.32)$$

Masa volumului de apă din volumul de control ia forma  $\rho n \theta'$  în loc de  $\rho n$ .

Se obține mai departe:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n \theta') \quad (3.33)$$

Termenul din dreapta se poate scrie:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho n \theta') = \rho n \frac{\partial \theta'}{\partial t} + \rho \theta' \frac{\partial n}{\partial t} + n \theta' \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.34)$$

Considerând că în comparație cu modificarea porozității și densității modificarea gradului de saturare în timp este mult mai mare, atunci ultimii doi termeni pot fi considerați nuli:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = n \frac{\partial \theta'}{\partial t} \quad (3.35)$$

Dacă se ține cont de legea lui Darcy, relația de mai sus se poate scrie sub forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right) = n \frac{\partial \theta'}{\partial t} \quad (3.36)$$

Având în vedere că, umiditatea specifica este  $\theta = n \theta'$  ( $n$  porozitate):

$$n \frac{\partial \theta'}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.37)$$

Definind capacitatea capilară  $C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$  și ținând cont ca  $h = \psi + z^*$  din

ecuația lui Bernoulli ecuația mișcării nepermanente prin medii nesaturate cunoscută și sub numele de ecuația lui Richard [89] are următoarea formă:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (3.38)$$

### 3.3. Parametri ce influențează curgerea prin medii poroase

#### 3.3.1. Mișcarea permanenta prin medii saturate

Dacă infiltrațiile apar prin medii saturate (in cazul infiltrațiilor pe sub un baraj stăvilar) în condiții permanente, ea este influențată de coeficientul de permeabilitate.

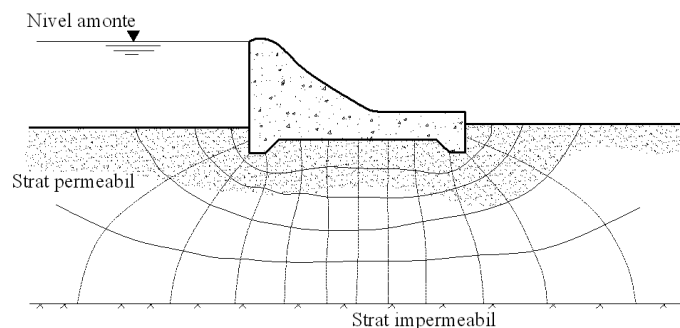


Figura 3.2 Exemplu de curgere exclusiv prin zona saturata

Toată zona prin care are loc curgerea este saturată, deci coeficientul de permeabilitate este constant.

Coeficientul de permeabilitate se poate determina în laborator, în situ prin intermediul unor foraje de proba sau prin folosirea unor relații de empirice.

Dea lungul timpului o serie de relații empirice au fost propuse de diverși autori, relații cu rezultate mai mult sau mai puțin satisfăcătoare.

Coeficientul de permeabilitate are unitatea de măsură a vitezei și reprezintă o măsură a rezistenței la înaintare întâmpinată de fluid prin terenul pe care îl parcurge.

Dacă în care se iau în calcul și modificări ale proprietăților apei atunci:

$$k = \frac{K\rho g}{\mu} \quad (3.39)$$

În relația 3.39 s-a notat cu:

$K$ - permeabilitatea intrinseca;

$\rho$  - densitatea apei;

$\mu$  - vâscozitatea absolută a fluidului.

Relația lui Darcy este valabilă dacă curgerea apei corespunde domeniului laminar de mișcare. Domeniul laminar de mișcare corespunde unor numere Reynolds cuprinse între 2-9, după unii autori acest domeniu se prelungește până la valori ale numărului Reynolds egal cu 60.

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu} \quad (3.40)$$

În relația 3.40 am notat:

Re - numărul Reynolds;  
v - viteza medie;  
d - dimensiunea granulei;  
 $\nu$  - vâscozitatea cinematică a apei

Conform Pietraru (1977) [78], formula lui Hasen pentru nisipuri omogene cu

$\frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 5$  este:

$$k = C\tau d_{10}^2 \quad (3.41)$$

unde:

k - se obține în cm/s;  
 $d_{10}$  - diametrul efectiv, se măsoară în cm;  
C - coeficient adimensional ce ține cont de conținutul de argilă (pentru nisip curat C=100...120, iar pentru nisip cu argilă C=80...100);  
 $\tau$  - coeficient adimensional de corecție funcție de temperatura apei .

$$- \tau = 0.7 + 0.3t^0C \quad (3.42)$$

Formula lui Kozeny pentru nisipuri este prezentată tot în lucrarea lui Pietraru (1977) [78]:

$$k = 8 \frac{n^3}{(1-n)^2} \tau d_{10}^2 \quad (3.43)$$

unde:

k - se obține în cm/s;  
 $d_{10}$  - diametrul efectiv, se măsoară în cm;  
n - porozitatea;

$\tau$  - coeficient adimensional de corecție funcție de temperatura apei, se prezintă în tabelul 3.1.

Tabel 3.1 Coeficienți de corectare funcție de temperatura

$t^0C$	0	5	10	15	20	25
$\tau$	0.59	0.7	0.81	0.93	1.05	1.18

A. Stanciu și I. Lungu (2006) [97] prezintă în lucrarea lor mai multe formule pentru determinarea coeficientului de permeabilitate, dintre care enumerăm:

Jaky - 1944

$$k = 100d_m^2 \quad (3.44)$$

$d_m$  - diametrul cu cea mai mare frecvență din curba frecvențelor  
Terzaghi - 1955[102]

$$k = 200d_{10}^2e \quad (3.45)$$

În următoarele tabele se prezintă valori orientative ale coeficientului de permeabilitate (A. Stanciu și I. Lungu (2006) [97]):

Tabel 3.2 Valori orientative ale lui K pentru roci moi sau pământuri

Tipul pământului	k [cm/s]	Descriere calitativa
Pietriș curat	1	mare
Nisip mare curat	$1 \cdot 10^{-2}$	medie
Nisip mediu	$10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$	medie
Nisip fin	$5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$	medie la mica
Nisip prăfos	$2 \cdot 10^{-2} - 10^{-4}$	mica
nisip fin (U=2.5)	$6 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$	slaba
Nisip de dune	0.1-0.3	mare
Loess	$10^{-3} - 10^{-4}$	medie
praf	$5 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$	mica
Argila	$< 10^{-6}$	mica

Tabel 3.3 Valori orientative ale lui K după STAS - 1913/6 - 76

Tipul pământului	k [cm/s]
Pietriș bolovăniș	$10 - 10^{-1}$
Nisip, nisip cu pietriș	$10^{-1} - 10^{-3}$
Nisip fin, prăfos, praf argilos, loess	$10^{-3} - 10^{-7}$
Argila nisipoasa, prăfoasa, praf argilelor	$10^{-5} - 10^{-8}$
argila, argila grasa	$10^{-7} - 10^{-13}$

### 3.3.2. Mișcarea permanentă prin medii nesaturate

Dacă mișcarea apei este modelata cu ajutorul metodei elementului finit trebuie avut în vedere ca ea are loc (în cazul barajelor de pământ) prin medii saturate și nesaturate.

În condițiile în care ne interesează doar spectrul hidrodinamic, pentru calculul stabilității se poate considera că toată secțiunea este saturată. Având în vedere că în mecanica solurilor nesaturate coeficientul de permeabilitate este o funcție de presiunea apei în pori  $K = f(h)$ , respectiv în zona saturată

$K = K_{sat} = ct$  și în zona nesaturată  $K_{nesat} = K_{sat} f(h)$  se poate observa că poziția curbei de infiltrații, respectiv a zonei saturate nu este influențată de variația lui K. Pentru că zona situată imediat peste curba depresionară este saturată prin fenomenul de capilaritate (curgerea are loc și pe aceasta porțiune) devine importantă considerarea valorii lui K atunci când se calculează debitul infiltrat.



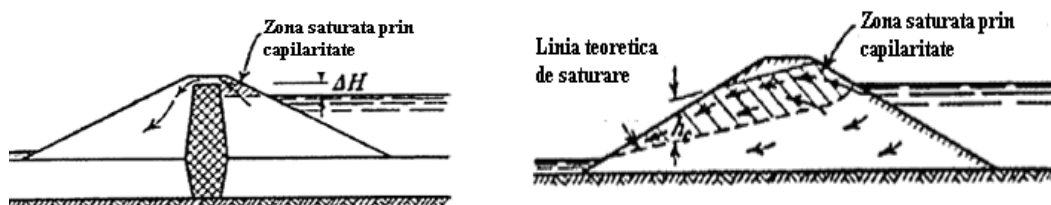


Figura 3.3 Exemplu de curgere prin zona saturata și nesaturata [101]

În cazul modelării folosind MEF nu este suficient să cunoaștem rezultatele obținute în laborator pentru  $K_{nesat}$ . Cunoașterea relației de estimare a valorii lui  $K_{nesat}$  în funcție de necunoscuta  $h$  este necesară pentru rezolvarea sistemului de ecuații care devine neliniar în cazul mișcării ce considera zona saturată și nesaturată.

În ultima perioadă interesul privind modelarea mișcării apei prin medii nesaturate a crescut simțitor. Problemele de mediu, de mișcare a poluanților și de mișcare nepermanenta a apei presupune o bună cunoaștere a fenomenelor ce apar deasupra liniei de depresionare, în zona afectată de capilaritate, cât și în zona situată imediat deasupra.

Modelele matematice sunt bine conturate, avansul înregistrat în ultima perioadă permite modelarea și rezolvarea unor problemelor complicate de mișcare a apei, inclusiv prin medii nesaturate. Din păcate din punctul de vedere al parametrilor ce descriu acesta zonă de curgere lucrurile stau puțin diferit.

Metodele de determinare în laborator a funcției de permeabilitate sunt anevoioase și costisitoare, mari consumatoare de resurse și timp. În aceasta situație o serie de modele de estimare a parametrilor ce caracterizează din punct de vedere hidraulic zona nesaturată, bazate pe distribuția și mărimea porilor au apărut, favorizate de finanțările și inputurile mari de resurse provenite din domeniul petrolier.

Majoritatea acestor metode au apărut pe baza măsurătorilor în situ făcute de-a lungul timpului se bazează în primul rând pe parametri ce descriu capacitatea terenului de a reține și îngloba apă în diferite situații de presiune (sucțiune).

În afara faptului că ușurează munca, aceste metode de estimare ce folosesc o serie de funcții analitice empirice, sunt atractive și deoarece oferă o imagine asupra modului de variație a umidității, a permeabilității în raport cu sucțiunea sau în raport cu alți parametri. Astfel în faze incipiente de rezolvare a unor probleme de proiectare, datele furnizate de aceste metode permit o optimizare a costurilor cu execuția și materialele.

Pentru a dezvolta această teorie trebuie făcute câteva ipoteze: singurele fluide prezente sunt apa și aerul, iar solul este rigid și omogen.

Atunci când  $\psi$  (presiunea apei în pori) este zero, deși sunt îndeplinite condițiile de saturare există volume de aer blocate la diferite niveluri, ca urmare  $\theta_s = (0.85-0.90) \cdot \text{porozitatea}$  ( $\theta_s$  umiditatea un stare saturata).

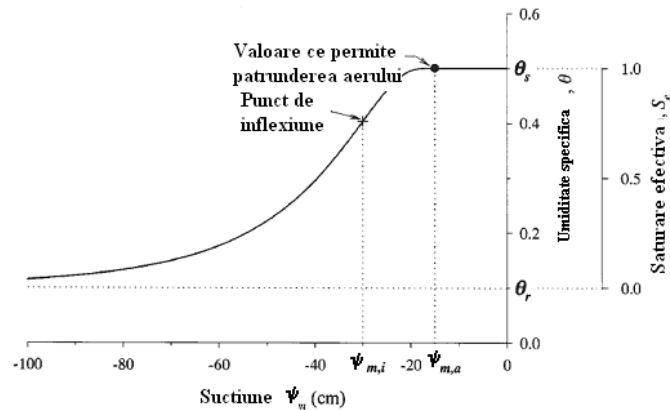


Figura 3.4 Variația conținutului volumic de apă în funcție de presiunea apei în pori

Pentru majoritatea solurilor umiditatea va rămâne egal cu  $\theta_s$  pentru valori ale lui  $\psi$  negative apropiate de zero.

Valoarea la care aerul începe să pătrundă în porii solului este notată cu  $\psi_a$ . Această valoare reprezintă punctul de inflexiune a curbei  $\theta$ , valoarea acesteia scăzând asimptotic până la valoarea  $\theta_r$  cunoscută ca valoare reziduală a umidității. Concluzionând valoarea lui  $\theta$  este cuprinsă între  $\theta_s$  și  $\theta_r$ , devine convenabil să definim gradul de saturație efectivă pentru care valoarea variază între 0 și 1.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.46)$$

Mai mulți autori au propus modele pentru retenția apei exprimând gradul de saturație efectivă în funcție de suctiune:

Brooks și Corey [10]:

$$S_e = \left( \frac{\psi_a}{\psi} \right)^\lambda \quad \text{dacă } \psi < \psi_a \quad (3.47)$$

Și

$$S_e = 1 \quad \text{dacă } \psi \geq \psi_a \quad (3.48)$$

În care  $\lambda$  este un parametru adimensional care caracterizează distribuția dimensiunilor porilor și este cuprins între 0.3 și 10.

Cambell (1974) [14] folosește aceeași funcție, dar exprimă prin ea raportul între  $\theta$  și  $\theta_s$ :

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left( \frac{\psi_a}{\psi} \right)^\lambda \quad \text{dacă } \psi < \psi_a \quad (3.49)$$

Și

$$\frac{\theta}{\theta_s} = 1 \quad \text{dacă } \psi \geq \psi_a \quad (3.50)$$

Brutsaert (1966) [11] folosește următoarea funcție:

$$S_e = \frac{a}{[a + (-\psi)]^b} \quad (3.51)$$

În care  $a$  și  $b$  sunt parametri de forma ce sunt determinați în urma rezultatelor din laborator.

O forma mai generală a relației de mai sus este propusă de van Genuchten (1979,1980) [109], și este folosită în majoritatea modelărilor actuale:

$$S_e = \frac{1}{\left[1 + (-\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (3.52)$$

În care  $a$  este exprimat în  $[m^{-1}]$  este pozitiv și  $n$ ,  $m$  sunt parametri adimensionali de formă ai funcției .

În 1980 autorul propune că  $m$  să fie egal cu  $1-1/n$  când  $n>1$  și  $1-2/n$  atunci când  $n>2$ .

În 1994 [61] Kosugi propune următoarea relație:

$$S_e = \frac{1}{\left[1 + m \left(\frac{\psi}{\psi_i}\right)^n\right]^m} \quad (3.53)$$

În care  $\psi_i$  este punctul de inflexiune  $\psi = \frac{m^{1-m}}{\alpha}$  și  $m=1-1/n$ .

Printre cei care au mai contribuit la crearea de modele de estimare a gardului de saturare mai amintim: Tani (1982), Russo (1988) [93], Ross și Smettem (1993) [91] care reproduc funcția Gardner (1958) [40] pentru funcția permeabilității pentru cazul în care se folosește modelul de conductivitate Mualem (1976) [70]etc.

Pentru rezolvarea ecuației lui Richards [89] este nevoie de funcția C-capacitatea capilară.

$$C = f(\psi) = \frac{d\theta}{d\psi} = (\theta_s - \theta_r) \frac{dS_e}{d\psi} \quad (3.54)$$

Aceasta funcție are forme diferite în funcție de modelul de retenție folosit: Pentru modelul Brooks și Corey [10]:

$$C = \frac{(\theta_s - \theta_r)\lambda}{-h_{m,a}} \left(\frac{\psi_a}{\psi}\right)^{1+\lambda} \quad \text{dacă } \psi < \psi_a \quad (3.55)$$

Si

$$C = 0 \quad \text{dacă } \psi \geq \psi_a \quad (3.56)$$

Pentru modelul van Genuchten:

$$C = (\theta_s - \theta_r) mn (-\alpha\psi)^{n-1} \left[1 + (-\alpha\psi)^n\right]^{-m-1} \quad (3.57)$$

Spre deosebire de datele cu privire la retenția de apă la diferite presiuni, permeabilitatea în mediile nesaturate se determină foarte greu și anevoios.

Modelele funcționale pentru conductivitate au fost dezvoltate pe baza modelului de retenție, iar relațiile folosite exprimă valoarea permeabilității relative (raportul dintre permeabilitatea efectivă și permeabilitatea prin mediul saturat).

Dea lungul timpului au fost prezentate mai multe modele dezvoltate de Childs și Collis-George (1950) [19], Burdine (1953) [12], Mualem și Dagan (1978) [73], (Kosugi, 1999) [61]etc.

Pe baza modelului de retenție Brooks și Corey se obțin:

Cu modelul propus de Mualem:

$$k_r = S_e^{l+2+2/\lambda} \quad (3.58)$$

Burdine

$$k_r = S_e^{l+1+2/\lambda} \quad (3.59)$$

Pe baza modelului de retenție van Genuchten se obțin:

Cu modelul propus de Burdine:

$$k_r = S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right] \quad (3.60)$$

Mualem:

$$k_r = S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3.61)$$

În relațiile 3.60 și 3.61 parametrul  $l$  este propus de Burdine egal cu 2 și 0.5 de către Mualem,  $m=1-1/n$  în modelul lui Mualem și  $m=1-2/n$  în modelul lui Burdine.

Pentru a pune în valoare aceste cunoștințe și rezultate obținute de-a lungul timpului, este dezvoltat programul RETC [106, 112]. El construiește curbe de retenție pe baza modelului Brooks-Corey sau van Genuchten, în timp ce conductivitatea în mediile nesaturate se obțin pe baza modelelor de distribuție a dimensiunilor porilor propuse de Mualem și Burdine. Acest program a fost dezvoltat de către van Genuchten de la Departamentul de inginerie mecanică din Rio de Janeiro, Simunek de la Universitatea Riverside din California și Leij și Sejna de la PC-Progress din Praga. Programul poate estima unul sau mai mulți parametri ai curgerii prin medii nesaturate pe baza datelor caracteristice cunoscute.

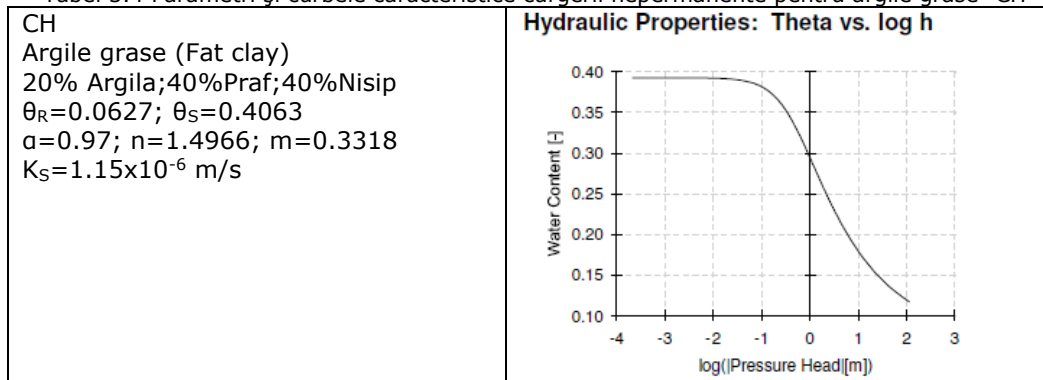
În prezenta lucrare se propune studiul infiltrațiilor permanente și nepermanente prin medii nesaturate folosind programele MNPNS.exe scrise de către autor pe baza metodei elementului finit (vezi capitolul 4). Studiul se face folosind ca punct de plecare geometria propusă de către recomandările americane pentru barajele omogene de 2, 5 respectiv 10 metri înălțime.

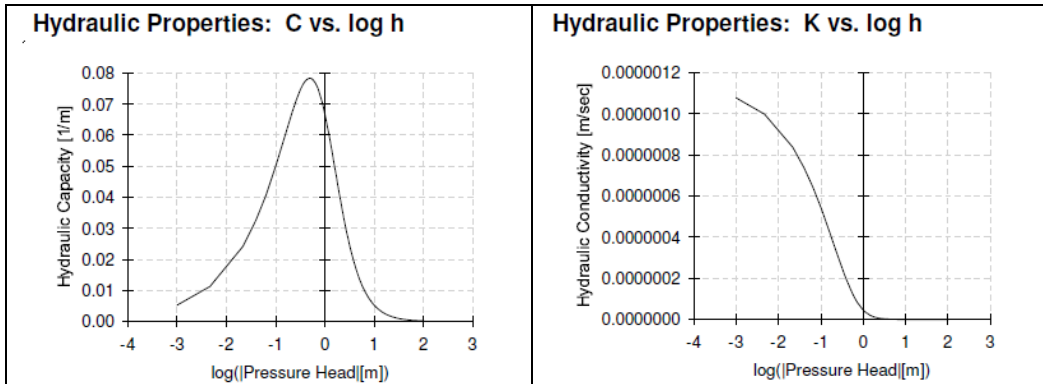
În vederea obținerii parametrilor necesari rezolvării ecuației Richards, prin metoda elementului finit se rulează programul RETC.

Pentru identificarea distribuției dimensiunii porilor la tipurile principale de pământuri, necesara în programul RETC s-a folosit "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)" [2] sau pe scurt USC.

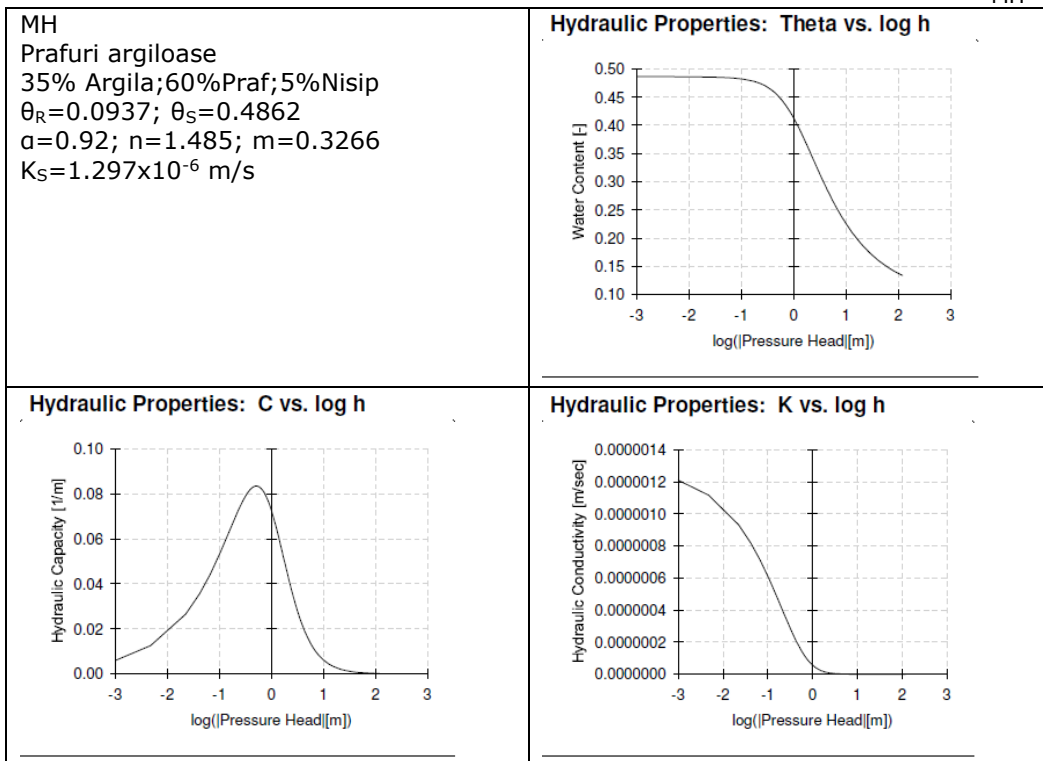
Rezultate ce urmează a fi folosite mai departe în calcule au fost obținute pe baza procentelor medii de argila, praf și nisip și sunt prezentate în tabelele 3.5-3.9:

Tabel 3.4 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru argile grase "CH"

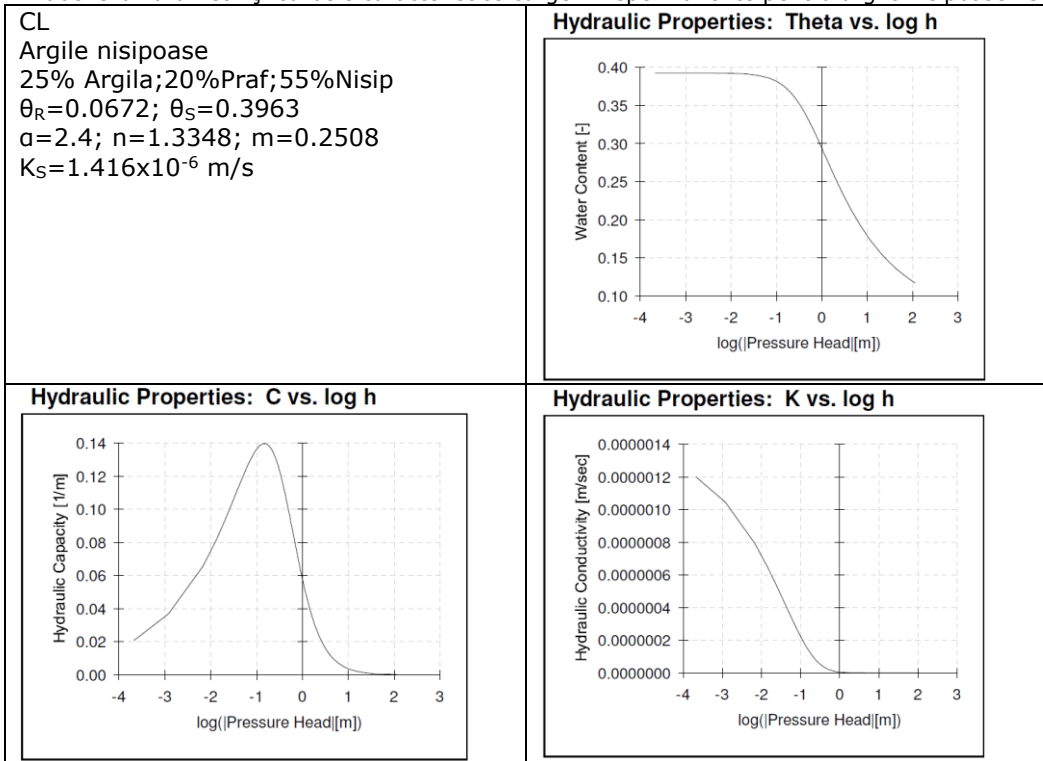




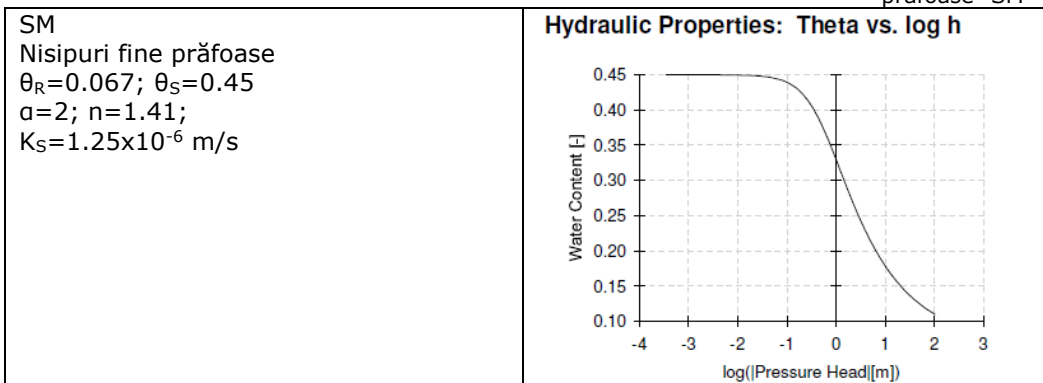
Tabel 3.5 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru prafuri argiloase "MH"



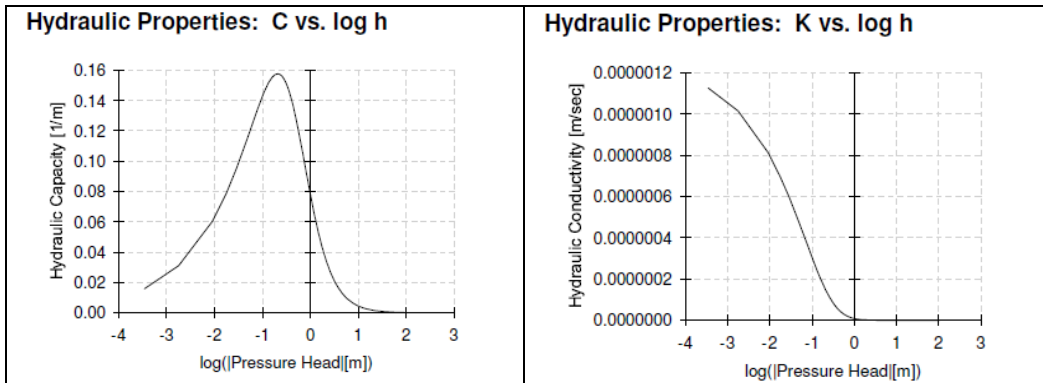
Tabel 3.6 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru argile nisipoase "CL"



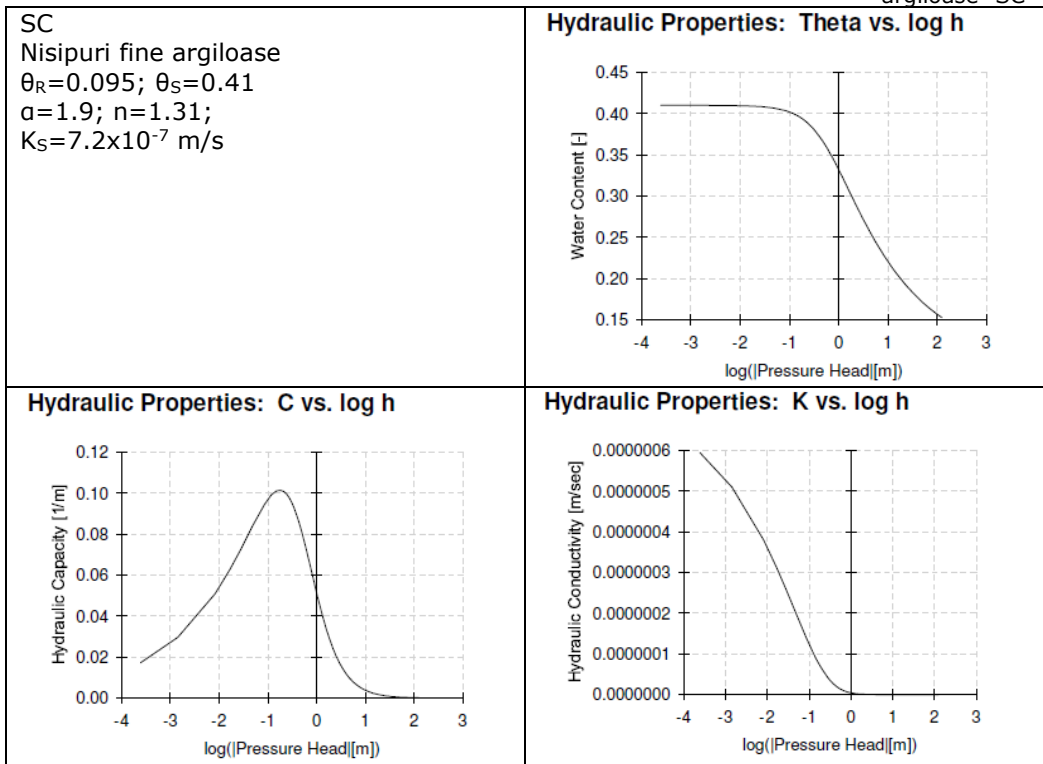
Tabel 3.7 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru Nisipuri fine prăfoase "SM"



3.3- Parametri ce influențează curgerea prin medii poroase 67



Tabel 3.8 Parametri și curbele caracteristice curgerii nepermanente pentru nisipuri fine argiloase "SC"



## 4. CALCULUL INFILTRAȚIILOR PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT

Metoda elementului finit este o metodă numerică aproximativă de calcul, care se poate utiliza pentru rezolvarea diverselor probleme ce apar în practica inginerescă de zi cu zi, dar mai ales în rezolvarea probleme complexe cum ar fi mișcarea apei prin medii poroase stratificate, anizotrope și nesaturate, în condiții nepermanente prin medii saturate sau nesaturate.

Pentru utilizarea metodei nu este necesar ca utilizatorul să aibă cunoștințe speciale de matematică sau informatică, ci este suficient ca el să fie un bun inginer. Succesul de care se bucura metoda este explicabilă prin ușurința cu care se pot înțelege și asimila conceptele de bază: nod, element finit, rețea de discretizare, model de calcul.

Ca orice metodă de calcul metoda elementului finit prezintă o serie de avantaje și dezavantaje:

Avantajele metodei elementelor finite:

- se poate aplica la o gama largă de probleme ingineresti;
- permite utilizatorului să fie creativ și nu limitează în nici un fel modelarea domeniilor pe care se face aplicarea metodei;
- conceptele de baza sunt accesibile masei largi de utilizatori;
- creșterea puterii de calcul a sistemelor informatice folosite în prezent elimină dezavantajul volumului mare de calcul necesar la rezolvarea problemelor;
- rezultatele sunt postprocesate în așa fel încât rezultatele să fie concludente și să ne facă să înțelegem fenomenele ce au loc în practică.

Dezavantaje:

- metoda este aproximativă și nu ne permite estimarea cuantificabilă a încrederii ce o putem acorda rezultatelor obținute;
- uneori libertatea pe care o are utilizatorul în crearea modelului de calcul alterează rezultatele obținute;
- programele de calcul sunt complexe și scumpe, făcând de cele mai multe ori ca accesul la ele să fie imposibil de realizat mai ales în condițiile actuale.

Având în vedere cele prezentate mai sus în prezenta lucrare se propune realizarea unui program de calcul și modelare a mișcării apei prin medii poroase, care să permită intervenția utilizatorului în ceea ce privește modul de calcul a parametrilor ce influențează curgerea în sine.



Având în vedere că în cazul acumulărilor nepermanente ce se pretează la o permanentizare este vorba de baraje mici din pământ omogene, fondate pe terenuri permeabile (în cele mai multe cazuri de aceeași tip cu materialul folosit în umpluturi), care sunt supuse unor variații rapide de nivel (fie ca vorbim despre creșteri de nivel, fie ca este vorba de scăderi de nivel), se impune o studiere în detaliu a fenomenului.

Se propune astfel ca modelarea și calculul infiltrațiilor să se facă în regim nestaționar, iar mediul prin care se face simularea să se considere în stare nesaturată.

Pentru rezolvarea acestei probleme, cea mai bună metoda de modelare este cea a metodei elementului finit și în cele ce urmează se prezintă teoria ce stă la baza scrierii algoritmilor prezentați în anexele aceste lucrări.

#### 4.1. Reguli generale folosite pentru discretizarea domeniului

Primul pas în soluționarea mișcării prin medii poroase prin metoda elementului finit o reprezintă discretizarea domeniului. Acest lucru este realizat prin înlocuirea domeniului cu o serie de noduri și elemente. În funcție de tipul problemei de rezolvat (uni- bi- tri-dimensionale(fig 4.1-2)) elementele folosite pot fi la rândul lor de mai multe tipuri.

Elementele pot fi de dimensiuni și forme diferite, pentru același domeniu putem avea tipuri diferite de elemente.

Deoarece la un element poate fi atașat un singur tip de material, discretizarea și forma elementelor depind de stratificarea și dispunerea materialelor pe domeniu.

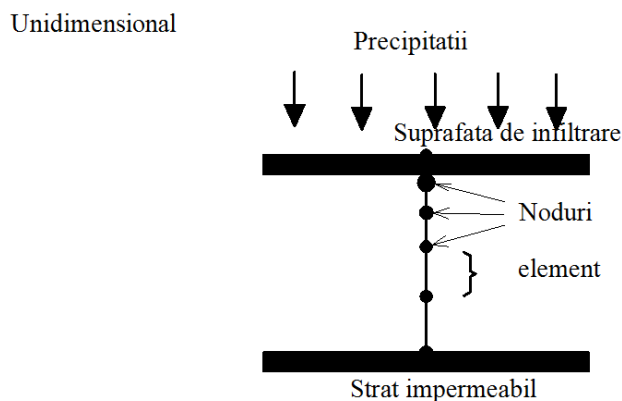


Figura 4.1 Aplicarea unidimensională a MEF

## Tridimensional

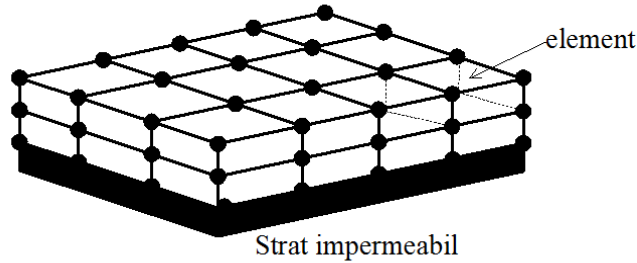


Figura 4.2 Aplicarea tridimensională a MEF

Discretizarea domeniilor este în prezent automatizată cu ajutorul unor programe de calcul, iar la utilizarea lor trebuie avute în vedere câteva aspecte principale.

Modelul de calcul trebuie realizat la scară nedeformată și trebuie demarcate clar zonele cu condițiile de margine ce urmează a fi definite.

În privința fineții discretizării, nu poate fi stabilit de la început cât de mari trebuie să fie elementele. Este clar că dimensiunea elementelor influențează exactitatea soluției. Cu cât elementele sunt mai mici ca dimensiune cu atât soluția problemei va fi mai exactă, dar și volumul de calcul, numărul de necunoscute din sistemul de ecuații va fi mai mare. Ca regulă în prima fază se pornește cu dimensiuni mai mari pentru elemente, apoi se repetă calculul pentru o discretizare mai fină comparându-se rezultatele. Se repetă acești pași până când rezultatele nu diferă semnificativ.

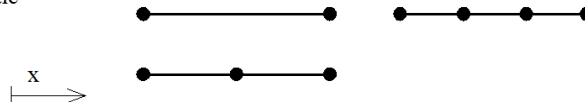
Discretizare nu trebuie făcută uniform pe tot domeniul. Se alege o discretizare mai fină acolo unde se prevăd variații mai mari ale soluției problemei. (fig. 4.4)

Pentru a alege o discretizare adecvată în vederea obținerii unei soluții cu un nivel acceptabil de precizie este nevoie în continuare de intervenția celui care operează discretizarea.

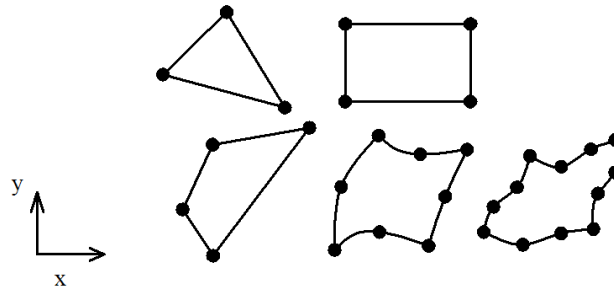
Trebuie avut în vedere că se poate obține aceeași soluție pentru discretizări diferite ale domeniului. Prin urmare nu se poate stabili de la bun început dacă o discretizare este bună sau nu pentru rezolvarea problemei.

Pentru a veni în ajutorul celor care se află la începuturile modelării pot fi stabilite o serie de reguli preliminare pentru a evita eventuale erori.

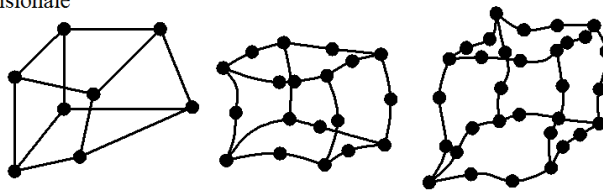
Elemente  
unidimensionale



Elemente  
bidimensionale



Elemente  
tridimensionale



Elemente asimetrice

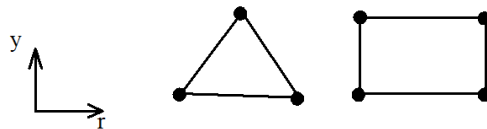


Figura 4.3 Tipuri de elemente folosite pentru discretizare în MEF

## 4.2. Reguli pentru dispunerea nodurilor

Metoda elementului finit constă în discretizarea domeniului într-un număr de noduri și elemente urmat de calculul valorii variabilei în fiecare nod. Fiecărui nod îi este atribuit un număr, avându-se în vedere că acesta să fie unic și să facă parte dintr-un șir continuu de numere întregi.

Fiecare nod primește și un set de coordonate (coordonate nodale), care pot fi de forma  $(x)$ ,  $(x,y)$ ,  $(x,y,z)$  sau  $(r,z)$  (vezi figura 4.3).

De exemplu pentru noduri situate în plan:

```
„1 -20.000000 0.000000
  2 0.000000 0.000000
  3 17.500000 7.000000
  .....”
```

Prima poziție este ocupată de denumirea nodului, a doua de coordonata X și a treia poziție de coordonata după axa Y.

Nodurile trebuie plasate de-a lungul zonelor în care sunt definite condiții de margine. Nodurile în care se cunosc soluțiile problemei se numesc noduri Dirichlet și

aceste valori reprezintă condiții de margine Dirichlet. Nodurile în care se cunosc valorile debitelor infiltrate sau extrase (în cazul puțurilor) se numesc noduri Neuman, deoarece ele sunt folosite pentru la definirea condițiilor de margine Neuman.

Nodurile sunt plasate mai des acolo unde se așteaptă o variație însemnată a soluției problemei.

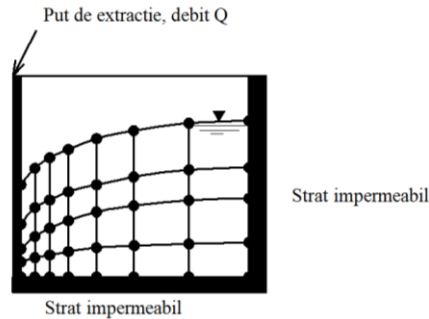


Figura 4.4 Puț de extracție. Reducerea modelului de calcul

Nodurile trebuie plasate la frontieră ce delimitează două tipuri de material, caracterizate de coeficienți de permeabilitate diferiți, în cadrul unui element poate fi definit doar un tip de material.

Între laturile adiacente ale elementelor nu este permis să rămână spații libere.

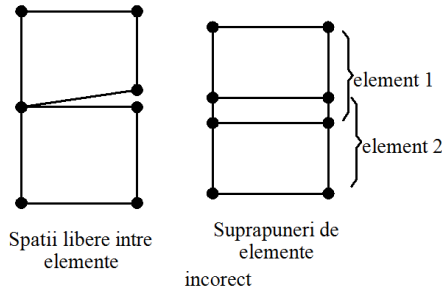


Figura 4.5 Erori în realizarea discretizării

Pentru a obține o matrice bandă cu dimensiuni cât mai mici, în vederea minimizării volumului de calcul, respectiv în vederea reducerii sistemului de ecuații la minim diferența între numărul nodurilor ce formează un element trebuie să fie minim.

Pentru a obține acest lucru este recomandat ca numerotarea nodurilor să se facă pe dimensiunea scurtă a domeniului. (figura 4.6).

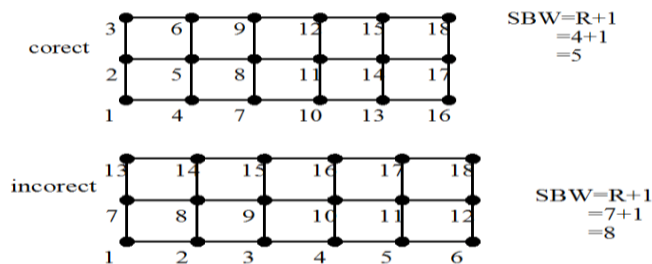


Figura 4.6 Numerotarea nodurilor

### 4.3. Dimensiunea, forma și a plasamentului elementelor

Forma și dimensiunile elementelor sunt în principiu dictate de forma și dimensiunile domeniului ce urmează a fi discretizat, de numărul de materiale din care este compus și de numărul de noduri. În cazul domeniilor de forme irregulate este nevoie de un număr mare de elemente, iar în cazul unor forme regulate fără variații mari de formă și tip de material este nevoie de un număr redus de elemente.

Dimensiunea elementelor trebuie să fie redusă acolo unde se întâlnesc forme curbate, când soluția problemei suferă variații importante, în zonele cu materiale diferite etc. Fiecărui element îi este atribuit un număr care trebuie să fie unic și să facă parte dintr-un șir continuu de valori întregi și pozitive.

Pentru a ușura munca pentru probleme particulare trebuie folosite cele mai simple tipuri de elemente. Asta înseamnă că pentru problema unidimensională se vor folosi elemente de tip bară, pentru mișcarea plana triunghiuri sau dreptunghiuri și elemente paralelipipedice liniare pentru problema tridimensională.

Atunci când se folosesc elemente complexe, numărul de noduri pentru fiecare element crește, crescând și dimensiunea sistemului de ecuații respectiv al volumului de calcul cu diferențe nesemnificative a rezultatelor obținute. Între laturile alăturate ale unui element se lasă spații libere, elementele alăturate nu pot să se suprapună (figura 4.5). În interiorul unui element caracteristicile unui material se consideră constante, deci elementele nu pot să depășească o zonă de delimitare (figura 4.7).

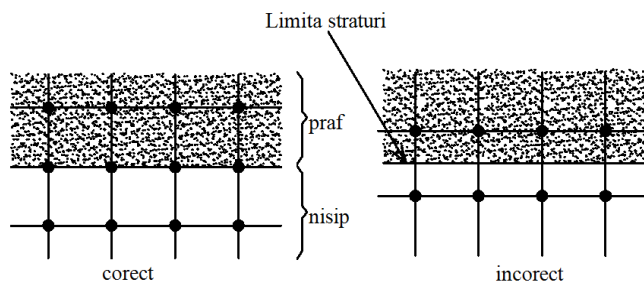


Figura 4.7 Discretizare pentru terenuri neomogene

Forma elementelor influențează rezultatele obținute, iar atunci când se fac analize tranzitorii, acestea sunt influențate de mărimea incrementului temporal necesar obținerii unei soluții stabile.  
Trecerea de la o mărime a elementului la alta trebuie făcută treptat și nu brusc.

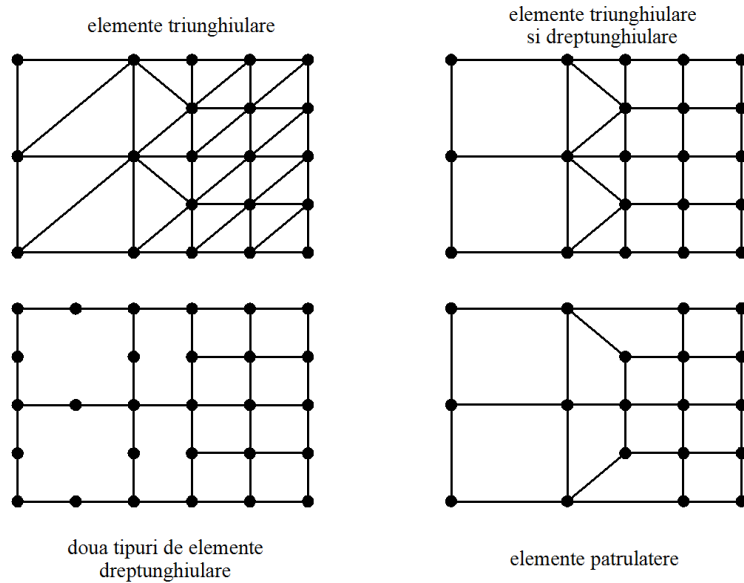


Figura 4.8 Discretizarea neomogena a domeniului

Dacă domeniul este simetric acest avantaj trebuie folosit în vederea scăderii volumului de calcul (figura 4.9).

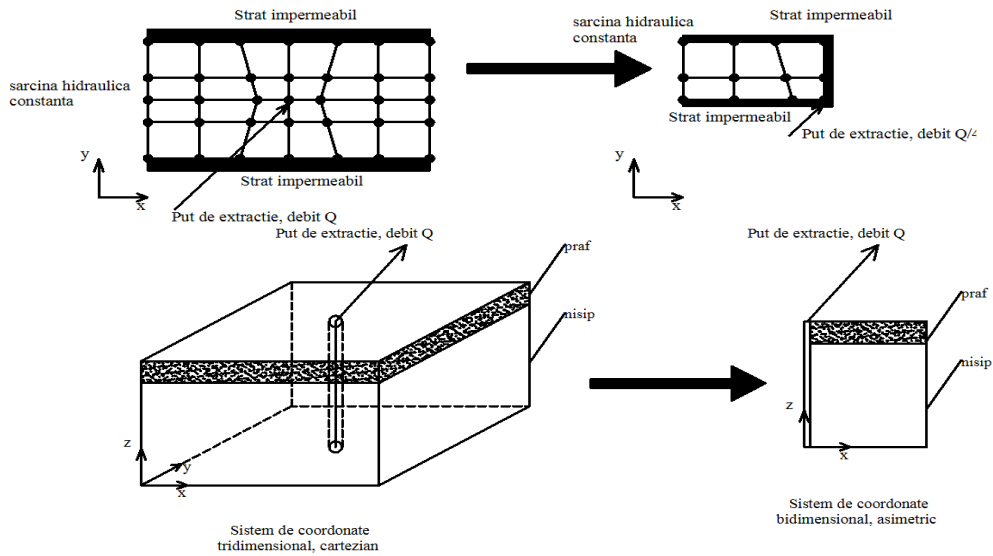


Figura 4.9 Reducerea dimensiunii modelului bazate pe simetrie

Un exemplu de definire a elementelor în cazul programelor de calcul pentru probleme plane rezolvate cu ajutorul unor elemente triunghiulare liniare:

```

„1 119 329 118 1
 2 330 9 10 1
 3 123 519 122 1
....”

```

Prima poziție este reprezentată de denumirea elementului. Ea trebuie să fie un număr întreg ce face parte dintr-un șir continuu, următoarele trei poziții reprezintă denumirea nodurilor ce constituie elementul, iar ultima poziție definește apartenența elementului la un tip de material.

#### 4.4. Definirea condițiilor de margine

În cazul problemelor de mișcarea apei prin medii poroase trebuie pornit de la o schemă de încărcare existentă. Astfel pentru a modela mișcarea apei printr-un baraj din pământ este nevoie, pe lângă cunoașterea geometriei, a proprietăților geofizice ale terenului, de condițiile inițiale care duc la apariția mișcării, fie că este vorba de mișcare permanentă sau nepermanentă. Condițiile care duc la apariția mișcării apei prin baraje de pământ sunt: existența apei în lac și în aval de baraj, precipitații înregistrate pe paramentul expus.

Astfel, pentru o schemă de încărcare clasică în care avem apă în bieful amonte și în bieful aval, cu siguranță cunoaștem valoarea presiunii apei în pori pentru nodurile elementelor situate pe paramentul amonte și paramentul aval situate sub nivelul apei.

Dacă  $y$  este nivelul apei în lac și  $y_i$  este nivelul la care este situat nodul în raport cu originea sistemului de coordonate atunci presiunea apei în nodul  $i$  este:

$$P_i = \gamma(y - y_i) \quad (4.3.)$$

$\gamma$  fiind valoarea greutatei specifice a apei.

Pentru fiecare nod trebuie determinată valoarea adâncimii sale.

O asemenea exprimare a condițiilor de margine poate duce la o îngreunare a procesului de pregătire a modelului.

În mod uzual este folosită metoda introducerii valorii sarcinii hidraulice din teoria lui Bernoulli, respectiv:

$$H_i = \frac{P_i}{\gamma} + y_i \quad (4.4.)$$

Se observă că al treilea termen lipsește (termenul cinetic), și este normal având în vedere starea de repaus considerată în acumulare.

Astfel dacă originea sistemului de coordonate folosit este situat la piciorul amonte al barajului și adâncimea apei este 10 metri, rezultă că pentru toate nodurile de pe paramentul amonte valoarea cunoscută este  $H=10$  m. De precizat că în acest caz rezolvarea problemei duce la obținerea valorilor  $H_i$  pentru toate nodurile Gauss (folosite la discretizare), în m. Pentru calculul presiunii apei în pori se scade din fiecare valoare „ $y$ ” a nodului și se înmulțește valoarea obținută cu  $\gamma$ .

Un exemplu de introducere a condițiilor de margine prin intermediul unui fișier text poate să arate în următorul fel:

„169	45
170	45
91	5
92	5”

Prima poziție este reprezentată de numele nodului în care se cunoaște sarcina hidraulică, a doua poziție de valoarea lui  $H_i$ .

Aceste noduri se numesc noduri Dirichlet, noduri în care valoarea soluției sistemului de ecuații ce urmează a fi rezolvat este cunoscută.

Dacă regimul este nepermanent și care se cunosc doar nodurile din amonte și aval ce urmează a devenii noduri Dirichlet, pe parcursul modelării într-o anumită etapă, atunci se poate face următorul artificiu:

1. se notează într-un fișier numele nodurilor;
2. se verifică la timpul  $t$  cât este nivelul apei (in lac de exemplu);
3. se parcurge lista de noduri și se verifică dacă sunt submersate;
4. dacă da, atunci se scriu într-un fișier de tipul celui descris pentru mișcarea permanentă.

Dacă nu avem apă în aval și nu avem nici un fel de condiție de margine pe al doilea parament, apare o problema implicita metodei elementului finit (implicit toate laturile pe care nu sunt definite condiții de margine sunt considerate impermeabile).

Pentru a elimina acest inconvenient pe nodurile paramentului aval se definește valoarea presiunii apei în pori egala cu presiunea atmosferica. Considerată egală cu „0” sarcina hidraulică pentru aceste noduri devine egală cu coordonata nodului după axa „y”.

#### 4.5. Obținerea ecuațiilor de aproximare. Metoda reziduurilor ponderate

Al doilea pas în rezolvarea problemei infiltrațiilor și a mișcării prin medii poroase îl reprezintă obținerea formulărilor integrale ale ecuațiilor. Formularea integrala a acestor ecuații duce într-un final la un sistem de ecuații algebrice, ce poate fi rezolvat pentru variabilele din câmp (sarcina hidraulică, presiunea apei în pori etc.). O metodă des folosită în modelarea infiltrațiilor este metoda reziduurilor ponderate.

În aceasta metodă este definită o soluție aproximativă pentru valorile inițiale ale problemei. Când aceste soluții aproximative sunt înlocuite în ecuațiile diferențiale ce descriu mișcarea, în fiecare nod al domeniului apare o eroare sau un „reziduu” și apoi se egalează cu zero erorile în fiecare nod al domeniului.[57]

Se consideră ecuația diferențială:

$$L(\phi(x, y, z)) - F(x, y, z) = 0 \quad (4.5.)$$

În care  $L$  este operatorul diferențial,  $\phi$  variabila din câmp, iar  $F$  o funcție cunoscută. Se definește o soluție aproximativă de forma:

$$\tilde{\phi}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \phi_i \quad (4.6.)$$



În care  $N_i$  sunt funcțiile de aproximare și  $\phi_i$  valorile din nodurile domeniului,  $m$  este numărul de noduri ale discretizării.

Când acesta soluție se înlocuiește în ecuația (4.3) valoarea nu este egala cu 0:

$$L(\tilde{\phi}(x, y, z)) - F(x, y, z) = R(x, y, z) \neq 0 \quad (4.7.)$$

$R$  este eroarea ce survine datorită alegerii soluției aproximative. Această valoare variază în nodurile domeniului. Din această cauză dacă se egalează  $R$  cu zero în anumite noduri, în ale noduri  $R$  devine mult prea mare.

În metoda de calcul propusa se egalează media ponderată a rezidului în toate nodurile domeniului cu 0.

$$\int_{\Omega} W(x, y, z) R(x, y, z) d\Omega = 0 \quad (4.8.)$$

$W$ - funcția de ponderare.

Înlocuind în relația (4.5) se obține:

$$\iiint_{\Omega} W(x, y, z) [L(\tilde{\phi}(x, y, z)) - F(x, y, z)] d\Omega = 0 \quad (4.9.)$$

Se specifică forma soluțiilor aproximative pe fiecare element al domeniului:

$$\tilde{\phi}^{(e)}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \phi_i \quad (4.10.)$$

$N_i^{(e)}$  sunt funcțiile de interpolare ale elementului (câte una pentru fiecare nod) și  $\phi_i$  necunoscutele în fiecare nod, iar  $n$  numărul de noduri al elementului.

Metoda lui Galerkin propune ca funcțiile de ponderare să fie la fel ca și cele de interpolare  $W_i = N_i$ .

## 4.6. Tipuri de mișcare prin medii poroase

### 4.6.1. Mișcarea permanentă prin medii saturate

Ecuația tridimensională ce descrie aceasta mișcare este:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.11.)$$

În care:

$k_x, k_y$  și  $k_z$  – coeficienții de permeabilitate pe cele trei direcții;  
 $h$  este sarcina hidraulică.

Așa cum am descris în capitolul anterior, se propune o soluție aproximativă pentru fiecare element:

$$\tilde{h}^{(e)} = \sum_{i=1}^n N_i^{(e)} h_i \quad (4.12.)$$

Folosind această soluție aproximativă ecuația (4.9) nu mai este satisfăcută exact, în fiecare nod al domeniului rezulta un reziduu.

$$R_i = -\iiint_{V^{(e)}} W_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} + k_y^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial y} + k_z^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial z} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (4.13.)$$

Folosind metoda Galerkin și considerând că coeficienții de permeabilitate sunt constanți pe fiecare element ecuația de mai sus se poate scrie sub forma:

$$R_i = -\iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial x^2} + k_y^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial y^2} + k_z^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial z^2} \right] dx dy dz \quad (4.14.)$$

Deoarece derivata de ordinul doi nu este definită pentru soluțiilor aproximative la majoritatea tipurilor de elemente atunci:

$$R_i = -\iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} + k_y^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial y} + k_z^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial z} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (4.15.)$$

Dacă mișcarea este plană:

$$R_i = -\iint_{A^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} + k_y^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial y} \right] dx dy \quad (4.16.)$$

Pentru evaluarea acestor ecuații integrale în primul rând trebuie ales tipul elementului.

În cazul elementelor tip bară, în cazul mișcării unidimensionale funcțiile de interpolare au forma:

$$N_i^{(e)}(x) = \frac{x_j^{(e)} - x}{L^{(e)}} \quad \text{și} \quad N_j^{(e)}(x) = \frac{x - x_i^{(e)}}{L^{(e)}} \quad (4.17.)$$

În care  $x_i$  și  $x_j$  sunt coordonatele nodurilor care formează elementul cu lungimea  $L^{(e)}$

Deoarece fiecare element are două noduri și ambele noduri contribuie la valoarea rezidului avem:

$$R^{(e)}_i = -\int_{x_i^{(e)}}^{x_j^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} \right] dx \quad (4.18.)$$

$$R^{(e)}_j = -\int_{x_i^{(e)}}^{x_j^{(e)}} N_j^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} \right] dx \quad (4.19.)$$

Combinând cele două relații se poate scrie formularea matricială pentru elementul  $e$ .

$$[K^{(e)}] = \int_{x_i^{(e)}}^{x_j^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} \end{bmatrix} dx = \int_{x_i^{(e)}}^{x_j^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} \end{bmatrix} [K_x^{(e)}] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} \end{bmatrix} dx \quad (4.20.)$$

În cazul în care avem trei noduri  $i, j, k$ :

$$[K^{(e)}] = \int_{x_i^{(e)}}^{x_j^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial x} \end{bmatrix} [K_x^{(e)}] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial x} \end{bmatrix} dx \quad (4.21.)$$

Pentru problema plană cu trei noduri:

$$[K^{(e)}] = \iint_{A^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^{(e)} & 0 \\ 0 & k_y^{(e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_k^{(e)}}{\partial y} \end{bmatrix} dx dy \quad (4.22.)$$

În cazul problemei spațiale cu n noduri pe element, matricea de conductivitate devine:

$$[K^{(e)}] = \iiint_{V^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^{(e)} & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{(e)} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{(e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix} dx dy dz \quad 4.23.$$

Înlocuind în relația (4.16) relația (4.17) se obține

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ \vdots \\ R_n^{(e)} \end{Bmatrix} = [K^{(e)}] \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{Bmatrix} \quad (4.24.)$$

Scrise pentru fiecare element al discretizării și însumate aceasta ecuație duce la relație:

$$\begin{Bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_p \end{Bmatrix} = [K]_{global} \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{Bmatrix} \quad (4.25.)$$

Setând valoare reziduurilor în fiecare nod egal cu 0 se obține

$$[K]_{global} \{h\} = \{0\} \quad (4.26.)$$

Rezolvarea acestui sistem de ecuații încorporând în el și condițiile de margine duce la aflarea soluției problemei în fiecare nod al discretizării.

Dacă avem de a face cu debite infiltrate în anumite noduri ale domeniului, atunci problema devine:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = 0 \quad (4.27.)$$

$q$  fiind pozitiv dacă sensul de curgere este înspre domeniu (infiltrare în) sau negativ dacă se extrage apa din domeniu. În acest caz la reziduu rămas contribuie și debitul pe element:

$$R_i = - \iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} + k_y^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial y} + k_z^{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial z} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial z} + q^{(e)} \right] dx dy dz \quad (4.28.)$$

$$\text{Singura diferență este termenul: } \iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} q^{(e)} dx dy dz = F_i^{(e)}.$$

$F_i^{(e)}$  - este debitul infiltrat în nodul „ $i$ ” al elementului „ $e$ ”.

Dacă se însumează pe suprafața pe care are loc extracția sau injecția de apă se obține:  $F_i^{(e)} = \int_{S^e} N_i^{(e)} k_x^{(e)} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial x} ds = \int_{S^e} N_i^{(e)} q ds$  în care  $S^e$  reprezintă suprafața elementului  $e$ . Pentru toate nodurile unui element se poate scrie:

$$\{F^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} F_1^{(e)} \\ \vdots \\ F_n^{(e)} \end{Bmatrix} \quad (4.29.)$$

Completând astfel relația:

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ \vdots \\ R_n^{(e)} \end{Bmatrix} = [K^{(e)}] \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} F_1^{(e)} \\ \vdots \\ F_n^{(e)} \end{Bmatrix} \quad (4.30.)$$

Dacă se extinde această relație pe întreg domeniul se obține:

$$[K]_{global} \{h\} = \{F\}_{global} \quad (4.31.)$$

#### 4.6.2. Mișcarea permanentă prin medii nesaturate

Forma tridimensională a ecuației de mișcare permanente în medii nesaturate este de forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = 0 \quad (4.32.)$$

$k_x(\psi), k_y(\psi), k_z(\psi)$  sunt componentele funcțiilor de permeabilitate în funcție de presiunea apei în pori  $\psi$ . Necunoscuta în acest caz este presiunea apei în pori  $\psi$ . Presupunând pentru presiunea apei în pori  $\psi$  o soluție aproximativă  $\tilde{\psi}$  de

forma  $\tilde{\psi}^{(e)} = \sum_{i=1}^n N_i^{(e)} \psi_i$  și folosind procedeul de rezolvare descrise în subcapitolul 4.6.1 se obține reziduul:

$$R^{(e)}_i = -\iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)}(\psi) \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial \psi^{(e)}}{\partial x} + \dots + k_z^{(e)}(\psi) \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial z} \frac{\partial \psi^{(e)}}{\partial z} + \frac{\partial k_z^{(e)}}{\partial z}(\psi) \right] dx dy dz \quad 4.33.$$

Pentru materiale relativ uscate ultimul termen din integrala  $\frac{\partial k_z^{(e)}}{\partial z}(\psi)$  se poate neglija.

Rezultă mai departe forma finală a sistemului de ecuații  $[K(\psi)]_{global} \{\psi\} = \{0\}$  sau în cazul în care avem debite ce intră sau ies din domeniu prin intermediul nodurilor Neuman atunci  $[K(\psi)]_{global} \{\psi\} = \{F\}$

### 4.6.3. Mișcarea nepermanetă saturată

Forma tridimensională a ecuației de mișcare nepermaneta în medii saturate este de forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.34.)$$

În care termenul  $S_s$  reprezintă coeficientul de înmagazinare specific.

Propunând o soluție aproximativă și folosind metoda Galerkin se obține:

$$\begin{aligned} R_i = & -\iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial x^2} + k_y^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial y^2} + k_z^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial z^2} - S_s^{(e)} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial t} \right] dx dy dz = \\ & - \iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} \left[ k_x^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial x^2} + k_y^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial y^2} + k_z^{(e)} \frac{\partial^2 \tilde{h}^{(e)}}{\partial z^2} \right] dx dy dz + \\ & + \iiint_{V^{(e)}} N_i^{(e)} S_s^{(e)} \frac{\partial \tilde{h}^{(e)}}{\partial t} dx dy dz \end{aligned} \quad (4.35.)$$

Prima integrală am evaluat-o deja:

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ \vdots \\ R_n^{(e)} \end{Bmatrix}_k = [K^{(e)}] \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{Bmatrix} \quad (4.36.)$$

Similar din cea de a doua integrală rezulta  $[C^{(e)}]$  fiind matricea capacitivă.

Însumând cele două sisteme de ecuații și extinzându-le pe întreg domeniul prin metoda reziduurilor ponderate se obține

$$[C]_{global} \begin{Bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial h_n}{\partial t} \end{Bmatrix} + [K]_{global} \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{Bmatrix} = \{F\}_{global} \quad (4.37.)$$

Notând  $\{h\}^* = \begin{Bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial h_n}{\partial t} \end{Bmatrix}$  și  $\{h\} = \begin{Bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{Bmatrix}$  obținem ecuația

$$[C]_{global} \{h\}^* + [K]_{global} \{h\} = \{F\}_{global} \quad (4.38.)$$

Relația 4.38 reprezintă un sistem de ecuații diferențiale care oferă prin rezolvare necunoscutele  $\frac{\partial h}{\partial t}$  în fiecare nod al discretizării. Pentru rezolvarea acestui sistem de ecuații exista mai multe metode de rezolvare, totuși a devenit deja uzuală rezolvarea prin metoda diferențelor finite.

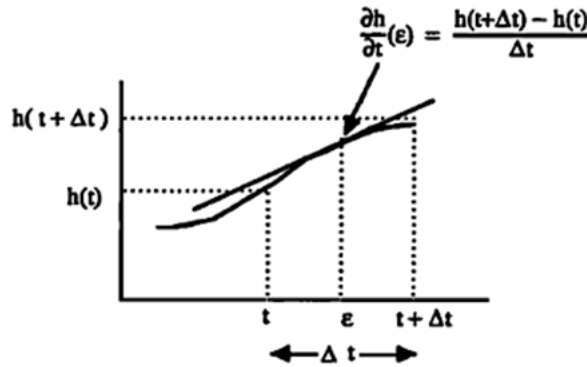


Figura 4.10 Metoda diferențelor finite

În figura 4.10 valoarea lui  $\epsilon$  este arbitrară pe intervalul de la  $t$  la  $t+\Delta t$

$$\frac{\partial h}{\partial t}(\epsilon) = \frac{h(t+\Delta t) - h(t)}{\Delta t} \text{ sau } h(\epsilon) = h(t) + (\epsilon - t) \frac{\partial h}{\partial t}(\epsilon) \quad (4.39.)$$

Definind variabila  $\omega = \frac{\epsilon - t}{\Delta t}$  putem scrie:

$$h(\epsilon) = (1 - \omega)h(t) + \omega h(t + \Delta t) \quad (4.40.)$$

Extinzând la formularea vectorială se obține:

$$\{h\} = (1 - \omega)\{h\}_t + \omega\{h\}_{t+\Delta t} \quad (4.41.)$$

și

$$\{F\} = (1 - \omega)\{F\}_t + \omega\{F\}_{t+\Delta t} \quad (4.42.)$$

Rezultă:

$$\begin{aligned} ([C] + \omega\Delta t[K])\{h\}_{t+\Delta t} &= \\ &= ([C] - (1 - \omega)\Delta t[K])\{h\}_t + \Delta t((1 - \omega)\{F\}_t + \omega\{F\}_{t+\Delta t}) \end{aligned} \quad (4.43.)$$

#### 4.6.4. Mișcarea nepermanentă prin medii nesaturate

Ecuția ce descrie acest tip de mișcare este:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4.44.)$$

În care  $C(\psi)$  este capacitatea capilară

$$C(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad (4.45.)$$

$\theta$  - umiditatea specifică.

Deoarece necunoscuta este presiunea apei în pori, urmând procedurile de prezentate anterior se obțin:

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ \vdots \\ R_n^{(e)} \end{Bmatrix}_k = [K^{(e)}] \begin{Bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{Bmatrix} \quad (4.46.)$$

Si

$$\begin{Bmatrix} R_1^{(e)} \\ \vdots \\ R_n^{(e)} \end{Bmatrix}_c = [C^{(e)}(\psi)] \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (4.47.)$$

Însumând:

$$[C(\psi)]_{global} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial t} \end{Bmatrix} + [K(\psi)]_{global} \begin{Bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{Bmatrix} = \{F\}_{global} \quad (4.48.)$$

$$\text{Notând } \{\psi^*\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial t} \end{Bmatrix} \text{ și } \{\psi\} = \begin{Bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{Bmatrix} \text{ obținem ecuația}$$

$$[C(\psi)]_{\text{global}}^* \{\psi^*\} + [K(\psi)]_{\text{global}} \{\psi\} = \{F\}_{\text{global}} \quad (4.49.)$$

- sistemul de ecuații diferențiale care oferă prin rezolvare necunoscutele  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$  în toate nodurile domeniului.

$$\begin{aligned} & \text{Prin metoda diferențelor finite rezultă} \\ & ([C(\psi)] + \omega \Delta t [K(\psi)]) \{\psi\}_{t+\Delta t} = \\ & = ([C(\psi)] - (1 - \omega) \Delta t [K(\psi)]) \{\psi\}_t + \Delta t ((1 - \omega) \{F\}_t + \omega \{F\}_{t+\Delta t}) \end{aligned} \quad (4.50.)$$

#### 4.7. Calculul matricei caracteristice elementare

Matricea elementară de conductivitate la mișcarea saturată pentru elemente tridimensionale cu  $n$  noduri:

$$\begin{aligned} [K^{(e)}] &= \\ &= \iiint_{V^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix}_{n \times 3} \begin{bmatrix} k_x^{(e)} & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{(e)} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{(e)} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix}_{3 \times n} dx dy dz \end{aligned} \quad (4.51.)$$

Matricea elementară de conductivitate (mișcare nesaturată) pentru elemente tridimensionale cu  $n$  noduri:

$$\begin{aligned} [K^{(e)}(\psi)] &= \\ &= \iiint_{V^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix}_{n \times 3} \begin{bmatrix} k_x^{(e)}(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{(e)}(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{(e)}(\psi) \end{bmatrix}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix}_{3 \times n} dx dy dz \end{aligned} \quad (4.52.)$$

Matricea elementara capacitivă (mișcare saturată, formulare concentrată) pentru elemente tridimensionale cu  $n$  noduri:



$$[C^{(e)}] = S_s^{(e)} \frac{V^{(e)}}{n} \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.53.)$$

Matricea elementara capacitivă (mişcare nesaturată, formulare consecventă) pentru elemente tridimensionale cu  $n$  noduri:

$$[C^{(e)}(\psi)] = \iiint_{V^{(e)}} \begin{bmatrix} N_1^{(e)} \\ \vdots \\ N_n^{(e)} \end{bmatrix} [C^{(e)}(\psi)] [N_1^{(e)} \dots N_n^{(e)}] dx dy dz \quad (4.54.)$$

Matricea elementara capacitivă (mişcare nesaturată, formulare concentrată) pentru elemente tridimensionale cu  $n$  noduri:

$$[C^{(e)}(\psi)] = C^{(e)} \frac{V^{(e)}}{n} \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & 1 & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.55.)$$

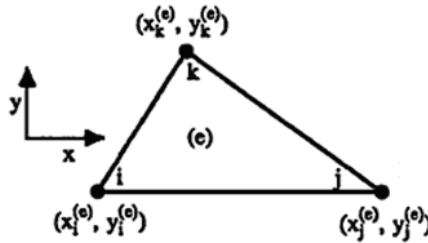


Figura 4.11 Elemente triunghiulare liniare

Pentru elemente plane triunghiulare liniare prezentate în figura 4.11 funcțiile de aproximare au forma:

$$\begin{aligned} N_i^{(e)}(x, y) &= \frac{1}{2A^{(e)}} (a_i + b_i x + c_i y) \\ N_j^{(e)}(x, y) &= \frac{1}{2A^{(e)}} (a_j + b_j x + c_j y) \\ N_k^{(e)}(x, y) &= \frac{1}{2A^{(e)}} (a_k + b_k x + c_k y) \end{aligned} \quad (4.56.)$$

În care:

$$\begin{aligned} a_i &= x_j^{(e)} y_k^{(e)} - x_k^{(e)} y_j^{(e)} & a_j &= x_k^{(e)} y_i^{(e)} - x_i^{(e)} y_k^{(e)} & a_k &= x_i^{(e)} y_j^{(e)} - x_j^{(e)} y_i^{(e)} \\ b_i &= y_j^{(e)} - y_k^{(e)} & b_j &= y_k^{(e)} - y_i^{(e)} & b_k &= y_i^{(e)} - y_j^{(e)} \\ c_i &= x_k^{(e)} - x_j^{(e)} & c_j &= x_i^{(e)} - x_k^{(e)} & c_k &= x_j^{(e)} - x_i^{(e)} \end{aligned} \quad (4.57.)$$

$$A^{(e)} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i^{(e)} & y_i^{(e)} \\ 1 & x_j^{(e)} & y_j^{(e)} \\ 1 & x_k^{(e)} & y_k^{(e)} \end{vmatrix} \quad (4.58.)$$

Matricea elementară de conductivitate la mișcarea saturată:

$$[K^e] = \frac{k_x^{(e)}}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_i & b_j^2 & b_j b_k \\ b_k b_j & b_k b_j & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{k_y^{(e)}}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_j c_i & b_j^2 & c_j c_k \\ c_k c_j & b_k b_j & c_k^2 \end{bmatrix} \quad (4.59.)$$

Matricea elementară de conductivitate (mișcare nesaturată):

$$[K^e(\psi)] = \frac{k_x^{(e)}(\psi)}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_j b_i & b_j^2 & b_j b_k \\ b_k b_j & b_k b_j & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{k_y^{(e)}(\psi)}{4A^{(e)}} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_j c_i & b_j^2 & c_j c_k \\ c_k c_j & b_k b_j & c_k^2 \end{bmatrix} \quad (4.60.)$$

Matricea elementară capacitivă (mișcare saturată, formulare uniformă și în formularea concentrată):

$$[C^{(e)}] = S_s \frac{A^{(e)}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.61.)$$

$$[C^{(e)}] = S_s \frac{A^{(e)}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matricea elementară capacitivă (mișcare nesaturată, formulare uniformă și în formularea concentrată):

$$[C^{(e)}(\psi)] = C^{(e)}(\psi) \frac{A^{(e)}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.62.)$$

$$[C^{(e)}(\psi)] = C^{(e)}(\psi) \frac{A^{(e)}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 4.8. Modificarea sistemului global de ecuații prin incorporarea condițiilor de margine. Condiții de margine Dirichlet

Atunci când se cunosc valorile necunoscutele (presiune în pori, sarcina hidraulică etc.) în câteva noduri (noduri Dirichlet), acest lucru duce la modificarea sistemului de ecuații înaintea rezolvării lui.

De exemplu dacă avem  $n$  noduri în discretizare și se cunosc valorile necunoscutei în  $m$  noduri, sistemul de ecuații devine de dimensiunea  $(n-m) \times (n-m)$ .

În cele ce urmează o să dau un exemplu simplu

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix} \quad (4.63.)$$

În cazul în care se cunoaște variabila  $x_2$  sistemul de ecuații suferă următoarele modificări:

Se elimină rândul 2 și coloana 2, iar vectorul termenilor liberi se modifica astfel:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{13} & a_{14} \\ a_{31} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 - a_{12} \times x_2 \\ b_3 - a_{32} \times x_2 \\ b_4 - a_{42} \times x_2 \end{Bmatrix} \quad (4.64.)$$

### 4.9. Rezolvarea sistemelor de ecuații

În acest subcapitol o să prezint câteva metode de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare și neliniare, în vederea obținerii valorii sarcinii hidraulice sau a presiunii apei în pori în nodurile domeniului analizat.

Forma generală a sistemelor de ecuații liniare este  $[M]\{X\} = \{B\}$ , iar a sistemului de ecuații neliniare  $[M(X)]\{X\} = \{B\}$ .

$[M]$  este matricea coeficienților cunoscuți  $m_{ij}$ ,  $\{X\}$  vectorul necunoscutelelor  $x_i$ , iar  $\{B\}$  vectorul termenilor liberi  $b_i$ .

În sistemul de ecuații neliniare valorile din matricea  $[M]$  sunt funcție de  $\{X\}$ .

Sistemul de ecuații liniare se poate dezvolta sub forma:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{Bmatrix} \quad (4.65.)$$

și se poate rezolva prin diferite metode, metode prezentate în cele ce urmează:

#### 4.9.1. Metoda Choleski pentru matrici asimetrice

Această metodă se folosește de faptul că matricea [M] este pătratică și prin urmare poate fi descompusă în produsul a două matrici triunghiulare (superioară și inferioară [L] și [U])

$$[M] = [L][U] \quad (4.66.)$$

Se poate spune că matricea [M] a fost descompusă sau factorizată și în această metodă descompunerea poate fi numită descompunere triunghiulară. Termenii din matricea triunghiulară inferioară pot fi determinați cu relațiile:

$$l_{ij} = m_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} u_{kj} \quad (4.67.)$$

$$l_{ij} = 0 \quad (4.68.)$$

Iar cei din matricea superioara cu relațiile:

$$u_{ij} = \frac{m_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} u_{kj}}{l_{ii}} \quad (4.69.)$$

$$u_{ij} = 0 \quad (4.70.)$$

Odată descompusă matricea [M] sistemul de ecuații devine:

$$[M]\{X\} = \{B\} = [L][U]\{X\} = \{B\} \quad (4.71.)$$

Definim vectorul {Z} ca fiind:  $[U]\{X\} = \{Z\}$

Deci sistemul de ecuații devine:  $[L]\{Z\} = \{B\}$

Prin rezolvarea primei ecuații din sistemul de mai jos, cu o singură necunoscută și prin substituiri succesive în restul de ecuații se pot determina toți termenii din vectorul {Z}

$$z_i = \frac{\left( b_i - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} z_{kj} \right)}{l_{ii}} \quad (4.72.)$$

Nu ne mai rămâne decât să rezolvăm sistemul de ecuații:

$$x_{n+1-i} = z_{n+1-i} - \sum_{k=1}^{i-1} u_{n+1-i, n+1-k} x_{n+1-k} \quad (4.73.)$$

#### 4.9.2. Metoda Choleski pentru matrici pătratice simetrice

Dacă matricea [M] este simetrică atunci ea poate fi descompusă în matricea superioară triunghiulară și transpusa sa:  $[M] = [U]^T [U]$

Termenii matricei [U] pot fi determinați cu relațiile:

$$u_{ij} = \left( m_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} u_{ki}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.74.)$$

$$u_{ij} = \frac{\left( m_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} u_{ki} u_{kj} \right)^{\frac{1}{2}}}{u_{ii}} \quad (4.75.)$$

$$u_{ij} = 0 \quad (4.76.)$$

Odată descompusă matricea [M] sistemul de ecuații se poate

$$[M]\{X\} = \{B\} = [U]^T [U]\{X\} = \{B\} \quad (4.77.)$$

Se definește vectorul {Z}:  $[U]\{X\} = \{Z\}$  și se rezolvă sistemul de

ecuații:  $[U]^T \{Z\} = \{B\}$

Rezultând soluția:

$$z_i = \frac{\left( b_i - \sum_{k=1}^{i-1} u_{ik} z_{kj} \right)}{u_{ii}} \quad (4.78.)$$

Cel de al doilea sistem de ecuații poate fi scris:

$$\begin{cases} u_{11}x_1 + u_{12}x_2 + u_{13}x_3 + \dots + u_{1n}x_n = z_1 \\ u_{22}x_2 + u_{23}x_3 + \dots + u_{2n}x_n = z_2 \\ u_{33}x_3 + \dots + u_{3n}x_n = z_3 \\ \vdots \\ u_{nn}x_n = z_n \end{cases} \quad (4.79.)$$

Cu soluția:

$$x_{n+1-i} = \frac{\left( z_{n+1-i} - \sum_{k=1}^{i-1} u_{n+1-i, n+1-k} x_{n+1-k} \right)}{u_{n+1-i, n+1-i}} \quad (4.80.)$$

## 4.10. Rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare

Atunci când elementele din matricea [M] depind de una sau mai multe necunoscute sistemul de ecuații devine neliniar. În unele cazuri chiar și vectorul termenilor liberi sunt funcție de necunoscute, fapt ce complica rezolvarea sistemelor de ecuații neliniare.

$$\begin{bmatrix} m_{11}(x_1, \dots, x_n) & \dots & m_{1n}(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ m_{n1}(x_1, \dots, x_n) & \dots & m_{nn}(x_1, \dots, x_n) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{Bmatrix} \quad (4.81.)$$

Procesul de rezolvare al acestor tipuri de ecuații începe prin specificarea unei presupuse soluții inițiale:

$$\{X\} = \{X^0\} \quad (4.82.)$$

Dacă această presupunere este soluția exactă a sistemului de ecuații atunci procesul de rezolvare se încheie:

$$[M(X^0)]\{X^0\} = \{B\} \quad (4.83.)$$

Sau:

$$\{B\} - [M(X^0)]\{X^0\} = \{R^0\} = \{0\} \quad (4.84.)$$

Si  $\{R^0\} = 0$

$$\begin{Bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11}(x_1^0, \dots, x_n^0) & \dots & m_{1n}(x_1^0, \dots, x_n^0) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ m_{n1}(x_1^0, \dots, x_n^0) & \dots & m_{nn}(x_1^0, \dots, x_n^0) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1^0 \\ \vdots \\ x_n^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1^0 \\ \vdots \\ r_n^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.85.)$$

Evident în practica aceste resturi numite reziduuri sunt diferite de 0. În practică se pune condiția ca reziduul maxim din vectorul  $\{R^0\}$  să fie mai mic decât toleranța  $\varepsilon$

$$|\max\{r_i^0\}| < \varepsilon \quad (4.86.)$$

Dacă această condiție nu este satisfăcută, se trece la cea de a doua presupunere și se continuă până când condiția este satisfăcută. Procesul este anevoios și necesita un număr mare de iterații. Pentru a reduce numărul de iterații necesare obținerii soluții sistemului de ecuații există mai multe metode dintre care o să prezint metoda Picard și Newton-Raphson modificată.

#### 4.10.1. Metoda Picard

Cunoscută și sub numele de metoda substituției, metoda presupune construirea unui șir de soluții  $\{X^0\}, \{X^1\}, \{X^2\}$  etc., fiecare soluție  $\{X^k\}$  rezultând cu ajutorul precedentei  $\{X^{k-1}\}$ :

$$[M(X^{k-1})]\{X^k\} = \{B\} \quad (4.87.)$$

Matricea coeficienților este construita folosind soluția de la pasul anterior:

$$\begin{bmatrix} m_{11}(x_1^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}) & \dots & m_{1n}(x_1^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ m_{n1}(x_1^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}) & \dots & m_{nn}(x_1^{k-1}, \dots, x_n^{k-1}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1^k \\ \vdots \\ x_n^k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{Bmatrix} \quad (4.88.)$$

Se pornește de la o presupunere inițială pentru soluția sistemului  $\{X^0\}$ :

$$[M(X^0)]\{X^1\} = \{B\} \quad (4.89.)$$

Sistemul de ecuații devine liniar și se poate rezolva cu una din metodele prezentate anterior. Se construiește vectorul reziduurilor:  $\{R^0\} = \{B\} - [M(X^0)]\{X^1\}$  sau  $\{R^1\} = \{X^1\} - \{X^0\}$  care este verificat conform condiției de  $|\max\{r_i^1\}| < \varepsilon$ . Se continuă până când este îndeplinită condiția de convergență.

#### 4.10.2. Metoda Newton-Raphson modificată

În unele cazuri metoda Picard poate fi modificată pe baza unei metode incrementale (numita Metoda Newton-Raphson modificată). Procedeu pornește tot de la o presupunere a soluției inițiale  $\{X^0\}$ , calcularea reziduurilor  $\{R^0\}$  etc.

Dacă în schimb este nevoie de presupunerea unei noi soluții  $\{X^1\}$  ea se va obține diferit.

Se construiește sistemul de ecuații liniare:

$$[M(X^0)]\{\Delta x^1\} = \{R^0\} \quad (4.90.)$$

Soluția acestui sistem de ecuații  $\{\Delta x^1\}$  este un vector cu incremente folosite pentru construcția următoarei soluții:

$$\{X^1\} = \{X^0\} + \omega^* \{\Delta x^1\} \quad (4.91.)$$

$\omega^*$  fiind factorul de *relaxare* determinat prin încercări.

Iterațiile continuă până este îndeplinit criteriul de convergență.

### 4.11. Aplicarea metodei Choleski pentru rezolvarea mișcării apei subterane

#### 4.11.1. Mișcare permanentă prin medii saturate

Metoda Choleski se poate aplica foarte simplu pentru rezolvarea mișcării permanente prin medii saturate având în vedere că  $[M]=[K]$ ,  $\{X\}=\{h\}$  și  $\{B\}=\{F\}$ . Pentru că matricea de conductivitate este simetrică sistemul de ecuații este liniar (termenii din matricea elementară  $[K^{(e)}]$  nu depinde de variabila  $h$ ), rezolvarea este simplă și se poate face cu oricare dintre metodele mai sus prezentate.

#### 4.11.2. Mișcare nepermanentă prin medii saturate

Pentru a rezolva această problemă a mișcării nepermanente prin medii saturate (valabilă în cazul infiltrării apei pe sub stăvilare) se identifică matricile  $[M]$ ,  $\{X\}$  și  $\{B\}$ .

$$[M] = ([C] + \omega \Delta t [K])\{h\}_{t+\Delta t} \quad (4.92.)$$

$$\{X\} = \{h\}_{t+\Delta t} \quad (4.93.)$$

$$\{B\} = ([C] - (1 - \omega)\Delta t[K])\{h\}_t + \Delta t((1 - \omega)\{F\}_t + \omega\{F\}_{t+\Delta t}) \quad (4.94.)$$

În relațiile 4.100-102 am notat cu  $[C]$  matricea globală capacitivă,  $[K]$  matricea globală de conductivitate,  $\omega$  factorul de relaxare,  $\Delta t$  incrementul temporal,  $\{F\}$  valorile de infiltrații punctuale definite în secțiunea condițiilor de margine inițiale și sunt cunoscute la orice moment dat. Alegerea lui  $\Delta t$  și  $\omega$  nu influențează în nici un fel simetria matricei  $[M]$ .

Asamblarea acestor matrici  $[M]$  se face o singură dată, la fel și factorizarea.

Deoarece debitele infiltrate sau extrase din domeniul pe care rezolvăm problema sunt variabile în funcție de timp asamblarea și descompunerea vectorului  $\{B\}$  trebuie făcută la fiecare pas în vederea rezolvării sistemului de ecuații.

Pentru a reduce cu cât mai mult volumul de calcul depus, este de dorit ca incrementul  $\Delta t$  să fie cât mai mare, cu observația că alegerea unei valori mari poate influența acuratețea rezultatelor obținute.

Valoarea incrementului  $\Delta t$  se alege în funcție de forma și dimensiunea elementelor discretizării, de valorile coeficientului de permeabilitate, de valorile coeficientului de capacitate capilară definit pentru fiecare element. De asemenea contează procedeul folosit la construcția matricei capacitivă (metoda consecventă sau metoda concentrată) și de valoarea factorului de relaxare.

De exemplu acolo unde avem variații mari ale soluției problemei (în jurul nodurilor Neuman) Segerling [94] și Maadooliad [66] în 1984 și 1983 propun ca  $\omega$  și  $\Delta t$  să fie alese astfel încât elementele de pe diagonala matricei  $[M]$  să fie pozitive și în rest negative.

Al doilea tip de problemă care apare la rezolvarea problemelor tranzitorii este instabilitatea soluției. Acest fenomen apare atunci când diferența între soluția reală și cea aproximativă apar diferențe mari la timpi diferiți.

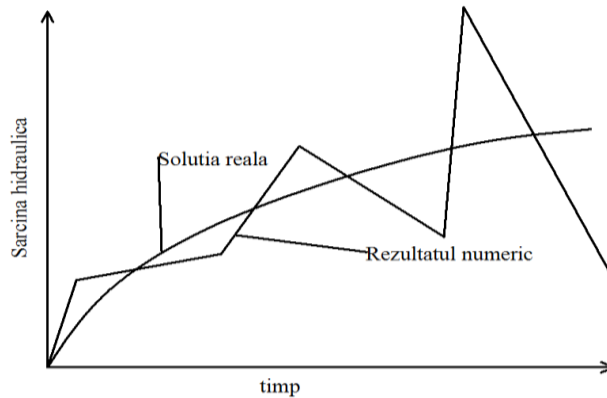


Figura 4.12 Instabilitatea soluției datorită factorului de relaxare mare

Instabilitatea se poate evita (Lapidus și Pinder [62]1982) prin alegerea unui factor de relaxare mai mare de 0.5.

Al treilea tip de situații întâmpinate la rezolvarea acestui tip de problema îl reprezintă alegerea unui increment mult prea mare. Acest lucru duce la apariția oscilațiilor numerice adică soluția numerică oscilează de la un pas la altul deasupra și dedesubtul soluției reale.



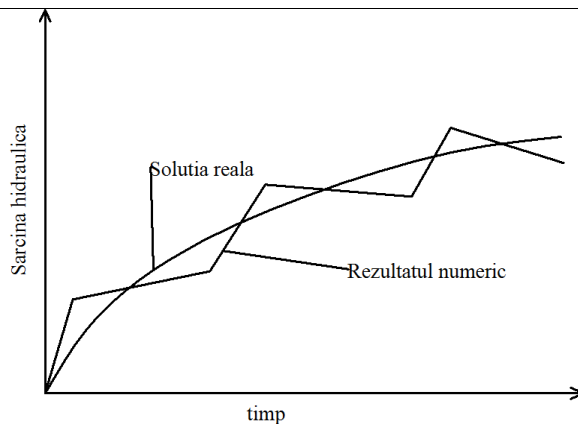


Figura 4.13 Stabilitatea soluției pentru factorul de relaxare 1

Sederling în 1984 rezolva problema oscilațiilor numerice propunând pentru factorul de relaxare valoare 1.

#### 4.11.3. Mișcare nepermanentă prin medii nesaturate

Pentru a rezolva această problemă a mișcării nepermanente prin medii nesaturate se identifică matricile  $[M]$ ,  $\{X\}$  și  $\{B\}$ .

$$[M] = ([C(\psi)] + \omega \Delta t [K(\psi)]) \quad (4.95.)$$

$$\{X\} = \{h\}_{t+\Delta t} \quad (4.96.)$$

$$\{B\} = ([C(\psi)] - (1-\omega)\Delta t [K(\psi)])\{\psi\}_t + \Delta t((1-\omega)\{F\}_t + \omega\{F\}_{t+\Delta t}) \quad (4.97.)$$

Am notat cu  $[C(\psi)]$  matricea globală capacitivă,  $[K(\psi)]$  matricea globală de conductivitate,  $\omega$  factorul de relaxare,  $\Delta t$  incrementul temporal,  $\{F\}$  valorile de infiltrații punctuale.

Alegerea lui  $\Delta t$  și  $\omega$  nu influențează în nici un fel simetria matricei  $[M]$ .

Asamblarea acestor matrici  $[M]$  se face la fiecare pas, la fel și factorizarea.

### 4.12. Algoritmi de calcul a mișcării nepermanente prin medii nesaturate

Pentru rezolvarea problemelor de infiltrații din prezenta lucrare, pe baza teoriei prezentate în prezentul capitol am scris și dezvoltat o serie de algoritmi de calcul în limbajul de programare Pascal.

Discretizarea domeniilor de modelat a fost făcută folosind programul GMSH.exe [46].

Acesta ușurează generarea de geometrii de orice formă, în plan sau în spațiu, realizează discretizarea folosind toate tipurile de elemente disponibile și prezentate în fig. 4.3.

La discretizarea domeniilor s-au folosit elemente triunghiulare, liniare cu trei noduri, iar în vederea folosirii datelor în program au fost scrise fișiere de tip txt în forma prezentată în subcapitolele 4.2 și 4.3.

În vederea definirii condițiilor de margine, nodurile de pe contur și de pe laturile cu valoarea sarcinii hidraulice cunoscută au fost definite în doua fișiere txt, un fișier pentru nodurile din lac și de pe paramentul amonte și unul pentru paramentul aval și bancheta aval.

Deoarece nivelul apei în lac este variabil, și la momente diferite condițiile de margine sunt diferite trebuie introduse evoluția nivelului apei în lac și în aval.

Pentru a defini condițiile de margine, la fiecare moment trebuie cunoscut nivelul apei în lac și în aval:

```
for i:=1 to cont do readln(dd);
read(dd,t1); readln(dd,h1); read(dd,t2); readln(dd,h2);
hamonte:=h1+((t-t1)*(h2-h1))/(t2-t1);
```

Condițiile de margine sunt redefinite într-un fișier txt la fiecare pas în funcție de valoarea nivelului amonte aval, prin intermediul următoarei proceduri:

```
procedure conditii;
var nume,nume1, nume2:string;
cont,i,noduri:integer;
begin
reset(ff);rewrite(ff);reset(nodam);reset(nodav);
repeat
readln(nodam,noduri);
if (not(noduri=23333)) then if nod[noduri,3]<=hamonte then
writeln(ff,noduri,' ',hamonte:2:6);
until noduri=23333;
repeat
readln(nodav,noduri);
if not(noduri=23333) then if nod[noduri,3]<=haval then
writeln(ff,noduri,' ',haval:2:6);
until noduri=23333;
writeln(ff,23333); close(ff);
end;
```

Pentru calculul matricei de conductivitate și a celor capacitive este nevoie de câteva calcule preliminare. Parametri curgerii prin medii nesaturate au fost definiți în capitolul 3.3 și ei trebuie calculați prin intermediul unor funcții sau proceduri:

Coeficientul C de capacitate capilara (relația 3.54) în modelul descris de van Genuchten (3.57):

```
water_storage:=(tetas-tetar)*(1-
1/nnn)*nnn*exp(nnn*ln(a*abs(csi)))/(abs(csi)*exp((1-1/nnn)*ln(1+
exp(nnn*ln(a*abs(csi))))));
```

Iar funcția de permeabilitate în modelul lui Mualem (relația 3.61):

```
kfun:=ksat/(exp((1-1/nnn)*ln((1+exp(nnn*ln(abs(a*csi)))))));
```

Pentru elementele plane triunghiulare este nevoie de valoarea funcțiilor de interpolare, iar ele sunt în funcție de parametri a, b și c (vezi relația 4.56):

```
ii:=round(element[gs,2]); jj:=round(element[gs,3]);
kk:=round(element[gs,4]);
ai:=nod[jj,2]*nod[kk,3]-nod[kk,2]*nod[jj,3];
aj:=nod[kk,2]*nod[ii,3]-nod[ii,2]*nod[kk,3];
ak:=nod[ii,2]*nod[jj,3]-nod[jj,2]*nod[ii,3];
```

---

```

    bi:=nod[jj,3]-nod[kk,3]; bj:=nod[kk,3]-nod[ii,3]; bk:=nod[ii,3]-
    nod[jj,3];
    ci:=nod[kk,2]-nod[jj,2]; cj:=nod[ii,2]-nod[kk,2]; ck:=nod[jj,2]-
    nod[ii,2];

```

Matricele elementare și globale sunt calculate în fiecare iterație parcurgând toate elementele:

```

k_element[1,1]:=element[i,6]/(4*element[i,10])*bi*bi+element[i,7]/(4*element[i,
10])*ci*ci;

```

```

    c_element_LEF[1,1]:=element[i,11]*element[i,10]/3;
    K_global[ii,ii]:=K_global[ii,ii]+k_element[1,1];
    c_global_LEF[ii,ii]:=c_global_LEF[ii,ii]+c_element_LEF[1,1];

```

```

k_element[1,2]:=element[i,6]/(4*element[i,10])*bi*bj+element[i,7]/(4*element[i,
10])*ci*cj;

```

```

    K_global[ii,jj]:=K_global[ii,jj]+k_element[1,2];

```

...

```

k_element[3,2]:=element[i,6]/(4*element[i,10])*bk*bj+element[i,7]/(4*element[i,
10])*ck*cj;

```

```

    K_global[kk,jj]:=K_global[kk,jj]+k_element[3,2];

```

```

k_element[3,3]:=element[i,6]/(4*element[i,10])*bk*bk+element[i,7]/(4*element[i,
10])*ck*ck;

```

```

    c_element_LEF[3,3]:=element[i,11]*element[i,10]/3;
    K_global[kk,kk]:=K_global[kk,kk]+k_element[3,3];
    c_global_LEF[kk,kk]:=c_global_LEF[kk,kk]+c_element_LEF[3,3];"

```

Se scrie sistemul de ecuații (4.108-4.110):

```

for i:=1 to n do
    for j:=1 to n do
        BB[i,j]:=c_global_LEF[i,j]-(1-omega)*delta_t*k_global[i,j];

```

```

for i:=1 to n do
    for j:=1 to n do
        MMARE[i,j]:=c_global_LEF[i,j]+omega*delta_t*k_global[i,j];

```

Se implementează condițiile de margine Dirichlet și sistemul de ecuații este redus la noile dimensiuni.

La rezolvarea sistemului de ecuații se folosește cea mai generală metoda Choleski:

```

n:=p-1;
for i:=1 to n do
    for j:=1 to n do
        begin
            if i<j then l[i,j]:=0
            else begin
                l[i,j]:=m[i,j];
                for k:=1 to j-1 do l[i,j]:=l[i,j]-l[i,k]*u[k,j];
            end;
            if i>j then u[i,j]:=0 else
            if i=j then u[i,j]:=1 else begin
                u[i,j]:=m[i,j]/l[i,i];

```

```

                for k:=1 to i-1 do u[i,j]:=u[i,j]-l[i,k]*u[k,j]/l[i,i];
                end;
            end;
w:=0;
for i:=1 to numar_noduri do b[i]:=0;
for i:=1 to numar_noduri do
begin
    if lim[i]=1300 then
        begin
            w:=w+1;
            for j:=1 to numar_noduri do b[w]:=b[w]+BB[I,j]*hh[s,j];
            end
        end;
for i:=1 to w do
    for j:=1 to numar_noduri do b[i]:=b[i]-ajut[j]*v[i,j];
for i:=1 to w do
    begin
        z[i]:=b[i]/l[i,i];
        for k:=1 to i-1 do z[i]:=z[i]-l[i,k]*z[k]/l[i,i];
        end;
for i:=1 to w do
    begin
        x[n+1-i]:=z[n+1-i];
        for k:=1 to i-1 do x[n+1-i]:=x[n+1-i]-u[n+1-i,n+1-k]*x[n+1-
k];
        end;
j:=1;
for i:=1 to numar_noduri do
    begin
        if lim[i]=1300 then
            begin
                solutii[i]:=x[j];
                j:=j+1;
                hh[s+1,i]:=solutii[i];
            end
            else begin
                solutii[i]:=lim[i];
                hh[s+1,i]:=solutii[i];
            end;
        end;
end;

```

Pentru rezolvarea sistemului de ecuații neliniare se folosește metoda substituției (Picard), toleranța admisă de la o iterație la alta fiind fixată la 0.005.

Dacă nu se verifică condiția de întrerupere, se calculează presiunea medie a apei în pori rezultată în această etapă pentru fiecare element în parte, rezultatele urmând a fi folosite mai departe în pasul ulterior pentru determinare parametrilor curgerii nepermanente:

```

for i:=1 to e do begin
    ii:=round(element[i,2]);
    jj:=round(element[i,3]);
    kk:=round(element[i,4]);

```

```

        element[i,12]:=1/3*(hh[s,ii]+hh[s,jj]+hh[s,kk]-nod[ii,3]-
        nod[jj,3]-nod[kk,3]);
    end;

```

Reprezentarea grafică a rezultatelor se face prin intermediul modulului de postprocesare gmsih.exe, rezultatele obținute necesitând scrierea lor într-un format specific:

```

writeln(fis,'$MeshFormat');writeln(fis,'2.2 0
8');writeln(fis,'$EndMeshFormat'); writeln(fis,'$Nodes');
writeln(fis,numar_noduri);
for i:=1 to numar_noduri do
begin
write(fis,nod[i,1]:2:0,' ',nod[i,2]:2:8,' ',nod[i,3]:2:8,' 0'); writeln(fis);
end;
writeln(fis,'$EndNodes');writeln(fis,'$Elements');
writeln(fis,e);
for i:=1 to e do begin
write(fis,element[i,1]:2:0,' 2 2 0 10 ',element[i,2]:2:0,'
',element[i,3]:2:0,' ',element[i,4]:2:0); writeln(fis);
end;
writeln(fis,'$EndElements');writeln(fis,'$NodeData');writeln(fis,1);writeln(fis,
'"Presiunea apei în pori"');
writeln(fis,'1');writeln(fis,'0.0');writeln(fis,'3');writeln(fis,'0');writeln(fis,'1');
writeln(fis,numar_noduri);
for i:=1 to numar_noduri do
begin
write(fis,nod[i,1]:2:0); write(fis,' ',nod[i,4]-nod[i,3]:2:6);
writeln(fis);
end;
writeln(fis,'$EndNodeData');

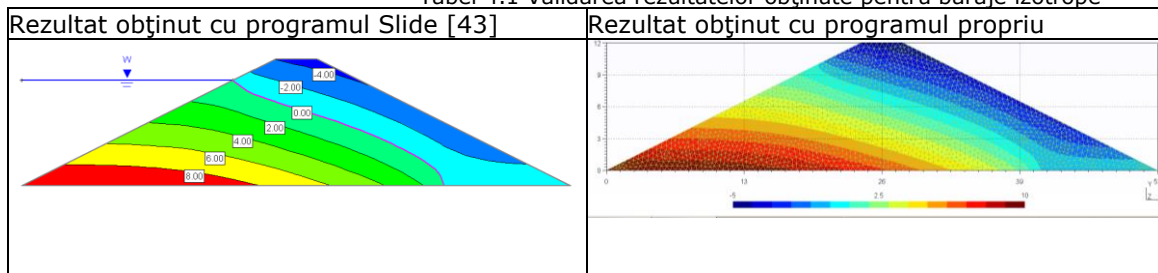
```

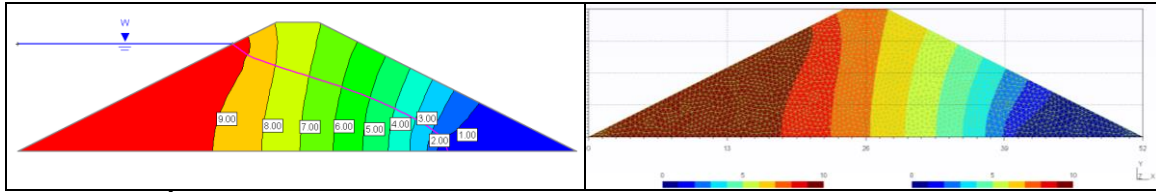
Algoritm prezentat succint în acest capitol, a fost folosit la toate calculele de infiltrații din această lucrare, în diferite forme și adaptări specifice problemei curente.

Pe parcursul realizării și calibrării programului de calcul au fost rulate și comparate probleme din literatura de specialitate, rezolvate cu ajutorul unor programe comerciale dedicate.

În tabelul 4.1 sunt prezentate probleme din literatura de specialitate [35] (baraje izotrope cu saltea orizontală de drenaj), rezolvate cu programul prezentat mai sus (în coloana din dreapta), și rezultatele obținute cu programul Slide în coloana din stânga.

Tabel 4.1 Validarea rezultatelor obținute pentru baraje izotrope





În tabelul 4.2 este prezentată problema rezolvată pentru un baraj anizotrop cu saltea orizontală de drenaj, cu programul prezentat mai sus (în coloana din dreapta), și cu programul Slide în coloana din stânga.

Tabel 4.2 Validarea rezultatelor obținute pentru baraje anizotrope

Rezultat obținut cu programul Slide[43]	Rezultat obținut cu programul propriu
<p>Figure 6.8 Total head contours</p>	
<p>Figure 6.7 Pressure head contours</p>	

În tabelul 4.3 este prezentată problema rezolvată pentru terenuri neomogene, stratificate (preluate din literatura de specialitate [35]), cu programul prezentat și scris de autor (în coloana din dreapta), și cu programul Slide în coloana din stânga.

Tabel 4.3 Validarea rezultatelor obținute pentru terenuri neomogene

Rezultat obținut cu programul Slide[43]	Rezultat obținut cu programul propriu

Rezultatele obținute validează și permit folosirea algoritmilor de calcul pentru rezolvarea problemelor propuse în aceasta lucrare.

## 5. STUDIUL INFILTRAȚIILOR PENTRU BARAJE OMOGENE DIN PĂMÂNT

### 5.1. Calculul infiltrațiilor nepermanente la baraje omogene din pământ

În acest capitol se propune studiul comportării barajelor omogene din pământ la acțiunea permanentă și nepermanentă a apei, în mai multe ipoteze folosind algoritmi de calcul proprii descriși în subcapitolul 4.12, algoritmi bazați pe teoria metodei elementului finit prezentată în capitolul 4.

S-au studiat în detaliu tipurile de baraje omogene de 2, 5 și 10 metri înălțime (având în vedere ca 92% din barajele din categoria baraje cu acumulări nepermanente sunt omogene din pământ) și 85% din ele se plasează în această plajă de înălțimi. Secțiunile transversale de calcul adoptate în realizarea modelelor s-au bazat pe parametri prezentați în capitolul 1 tabelul 1.10.

Din numărul total de variante propuse, pentru clasele principale de soluri din USC s-au eliminat din start cele care nu se pretează construcției de baraje. Deoarece pentru anumite clase de pământuri se propun mai multe secțiuni transversale (în condițiile unei încărcări diferite cu apa, respectiv cu sau fără scăderi bruște de nivel), s-au ales secțiunile cele mai defavorabile din punct de vedere al stabilității. Astfel s-au propus spre studiu secțiuni transversale cu următoarele caracteristici geometrice:

Tabel 5.1 Pante ale taluzelor folosite la modelare

Materialul	Panta amonte	Panta aval
CH, MH	3.5:1	2.5:1
CL	3:1	2.5:1
SC, SM	2.5:1	2:1

Lățimea la coronament a fost calculată cu relația (1.4) propusa de Lewis, terenul de fundare a fost considerat de același tip cu materialul folosit în corpul barajului, iar stratul impermeabil situat la o adâncime egala cu înălțimea barajului.

În toate ipotezele luate în calcul s-a considerat că nu avem apa în aval, nivelul apei în lac urmând să varieze liniar sau brusc pe o perioada diferita în funcție de înălțimea barajului.

Pentru barajul de 2 m înălțime se consideră un timp total de calcul al mișcării nepermanente de aproximativ 6 ore, pentru cel de 5 m de 12 ore, iar pentru barajul cu înălțimea de 10m timpul total de calcul de 24 ore.

S-au modelat două variante constructive pentru fiecare înălțime, cu și fără drenaj. Salteaua orizontală de drenaj s-a dimensionat folosind teoria clasică din mișcarea permanentă

S-a considerat nivelul maxim al apei în lac și s-a pus condiția ca curba depresionară să coboare sub zona de îngheț la piciorul aval al barajului.

S-au considerat pentru fiecare înălțime două variante de exploatare:

1. baraj este considerat cu acumulare nepermanentă și variația nivelului are loc de la 0 la înălțimea maximă a apei în lac  $H=H_b-0.5$ , în timpi de variație amintiți mai sus;

2. baraj cu acumulare permanentă, iar variația nivelului este liniară, de la un nivel considerat normal de retenție (considerat egal cu 1/3 din înălțimea barajului), până la nivelul maxim.

Pentru verificarea modului în care tipul de variație (liniar sau brusc) a nivelului de apă în lac influențează rezultatele, una din ipoteze considera ca la timpul  $t > 0$ ,  $t \approx 0$  adâncimea apei în lac crește brusc la adâncimea maximă.

Această ipoteză ușurează și scurtează timpii necesari aflării soluției problemei, iar în cazul în care nu se cunosc exact parametri de variație a nivelului apei în lac poate să fie o metodă care să ofere rezultate satisfăcătoare.

Intervalul temporar de calcul a fost împărțit în părți egale de aproximativ 15 minute.

Pentru soluționarea problemei infiltrațiilor nepermanente a fost necesară alegerea unui model de retenție capilară și unui de permeabilitate.

Astfel în prezenta lucrare la rezolvarea problemelor de curgere nepermanentă pentru retenția de apă s-a optat pentru modelul propus de van Genuchten și pentru permeabilitate modelul propus de Mualem. Prezentate în subcapitolul 3.3.2 aceste modele necesită determinarea unor parametri de formă și ai unor coeficienți. Ei au fost determinați prin folosirea programului RETC [112] și sunt prezentați concentrat în tabelul 5.2.

Tabel 5.2 Rezumatul parametrilor curgerii nepermanente prin medii nesaturate

CH Argile grase $\theta_R=0.0627$ ; $\theta_S=0.4063$ $\alpha=0.97$ ; $n=1.4966$ ; $m=0.3318$ $K_S=1.15 \times 10^{-6}$ m/s	MH Prafuri argiloase $\theta_R=0.0937$ ; $\theta_S=0.4862$ $\alpha=0.92$ ; $n=1.485$ ; $m=0.3266$ $K_S=1.297 \times 10^{-6}$ m/s
CL Argile nisipoase $\theta_R=0.0672$ ; $\theta_S=0.3963$ $\alpha=2.4$ ; $n=1.3348$ ; $m=0.2508$ $K_S=1.416 \times 10^{-6}$ m/s	
SM Nisipuri fine prăfoase $\theta_R=0.067$ ; $\theta_S=0.45$ $\alpha=2$ ; $n=1.41$ ; $K_S=1.25 \times 10^{-6}$ m/s	SC Nisipuri fine argiloase $\theta_R=0.095$ ; $\theta_S=0.41$ $\alpha=1.9$ ; $n=1.31$ ; $K_S=7.2 \times 10^{-7}$ m/s

Pentru rezolvarea problemei infiltrațiilor nepermanente prin medii nesaturate a fost utilizată o variantă a programului MNPNS.exe dezvoltată de către autor și adaptată problemei.

Modelele au fost realizate în programul gms.exe [46], discretizarea s-a realizat omogen pe întregul domeniu, dimensiunea elementelor a rezultat în urma unei analize de sensibilitate în jurul valorii de 0.15 mp, numărul maxim de noduri este limitat la 4700, elementele folosite la discretizare triunghiulare și liniare.

Condițiile de margine au fost aplicate la nivelul nodurilor prin intermediul unei proceduri care citește dintr-un fișierul txt în care sunt numite nodurile de pe taluzul amonte (și cuneta lacului), verifică dacă nivelul la care ele sunt situate este sub nivelul apei la timpul de calcul „t”, iar dacă este îndeplinită condiția atunci nodului îi este atașată valoarea corespunzătoare nivelului apei în lac.

Pentru aval se consideră că nodurile au presiunea egală cu presiunea atmosferică [78], în cazul nostru (pentru că lucrăm cu presiuni hidrostatice sau relative ea este considerată egală cu 0).



Deci sarcina hidraulică a acestor noduri va fi egală cu înălțimea la care sunt situate în raport cu sistemul de referință. Originea sistemului de referință este considerată în toate cazurile la piciorul amonte al barajului.

Matricile capacitive au fost calculate conform formulării concentrate, sistemul de ecuații se modifică încorporând condițiile de margine Dirichlet și se rezolvă folosind metoda Choleski pentru matrice nesimetrică.

Sistemele de ecuații neliniare sunt rezolvate prin metoda substituției (Picard), pentru că soluția să fie acceptabilă toleranța maximă impusă între două iterații succesive fiind de 0.005 m.

Rezultatele obținute au fost scrise în fișiere txt sub forma cerută de programul de postprocesare a rezultatelor gmsb.exe.

Pentru prezentarea grafică a rezultatelor s-a optat pentru prezentarea zonei saturate și distribuția presiunii apei în pori la finalul perioadei, considerate în modelare pentru fiecare înălțime în parte, poziția presiunii apei în pori egală cu 0 în aceste condiții reprezentând poziția curbei de infiltrații. Aceasta poziție, ce delimitează zona saturată de cea nesaturată a fost folosită mai departe pentru a calcula stabilitatea taluzelor (prin metodele clasice consacrate).

Pentru realizarea calculului au fost folosiți următorii parametri de modelare: Baraje cu panta taluzului amonte 1:3.5 și a taluzului aval 1:2.5.

Tabel 5.3 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 2 m și panta taluzelor de 1:3.5 și 1:2.5

Înălțimea barajului de 2 m					
Lățimea coronamentului B=2.5 m					
Varianta drenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranța admisă	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
1078	1943	0.005	1000	21000	2.50
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranța admisă	$\Delta t$ [s]	T [s]	
1275	2329	0.005	1000	21000	

Tabel 5.4 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 5 m și panta taluzelor de 1:3.5 și 1:2.5

Înălțimea barajului de 5 m					
Lățimea coronamentului B=3.25m					
Varianta drenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranța admisă	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
1256	2311	0.005	1000	42000	4.00
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranța admisă	$\Delta t$ [s]	T [s]	
2034	3789	0.005	1000	42000	

Tabel 5.5 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 10 m și panta taluzelor de 1:3.5 și 1:2.5

Înălțimea barajului de 10 m					
Lățimea coronamentului B=4.20 m					
Varianta drenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
2071	3885	0.005	1000	86000	5.20 m
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	
1700	3171	0.005	1000	86000	

Baraje cu panta taluzului amonte 1:3 și a taluzului aval 1:2.5.

Tabel 5.6 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 2 m și panta taluzelor de 1:3 și 1:2.5

Înălțimea barajului de 2 m					
Lățimea coronamentului B=2.5m					
Varianta drenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
1079	1945	0.005	1000	21000	3.00
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	
1260	2299	0.005	1000	21000	

Tabel 5.7 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 5 m și panta taluzelor de 1:3 și 1:2.5

Înălțimea barajului de 5 m					
Lățimea coronamentului B=3.25 m					
Varianta drenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
2033	3787	0.005	1000	42000	4.00
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	
2256	4233	0.005	1000	42000	

Tabel 5.8 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 10m și panta taluzelor de 1:3 și 1:2.5

Înălțimea barajului de 10 m					
Lățimea coronamentului B=4.20 m					
Varianta drenata					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
1296	2415	0.005	1000	86000	5.20
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	
1901	3573	0.005	1000	86000	

Baraje cu panta taluzului amonte 1:2.5 și a taluzului aval 1:2.

Tabel 5.9 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 2 m și panta taluzelor de 1:2.5 și 1:2

Înălțimea barajului de 2 m					
Lățimea coronamentului B=2.5 m					
Varianta drenata					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
1213	2179	0.005	1000	21000	3.50
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	
1387	2520	0.005	1000	21000	

Tabel 5.10 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 5 m și panta taluzelor de 1:2.5 și 1:2

Înălțimea barajului de 5 m					
Lățimea coronamentului B=3.25 m					
Varianta drenata					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenanta [m]
2005	3730	0.005	1000	42000	3.50
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [s]	T [s]	
2211	4142	0.005	1000	42000	

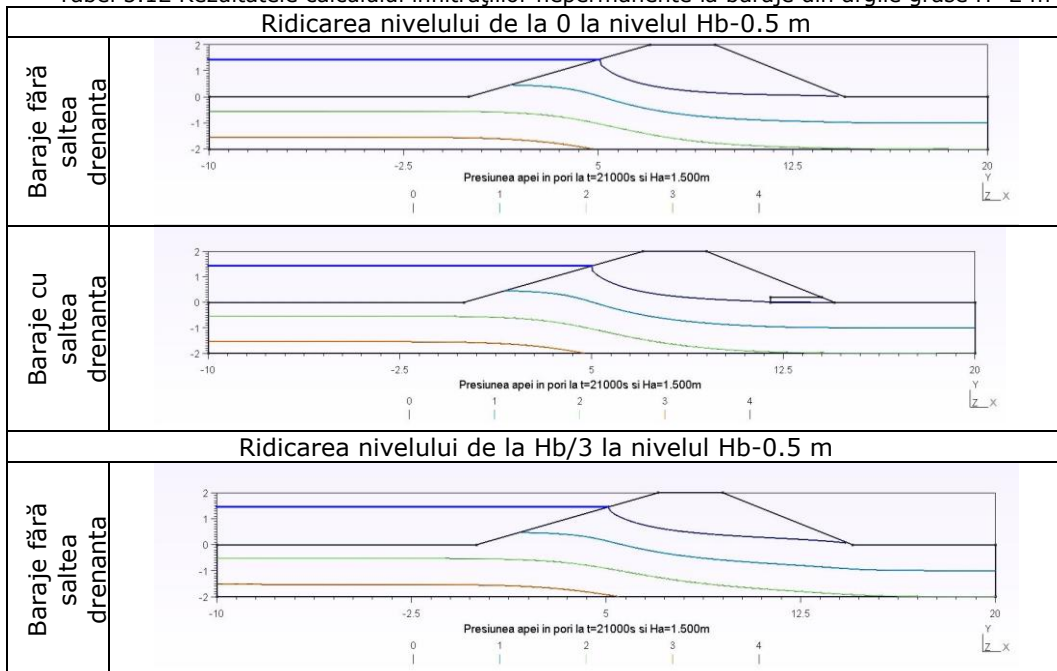
Tabel 5.11 Parametri folosiți la modelarea infiltrațiilor la baraje de 10 m și panta taluzelor de 1:2.5 și 1:2

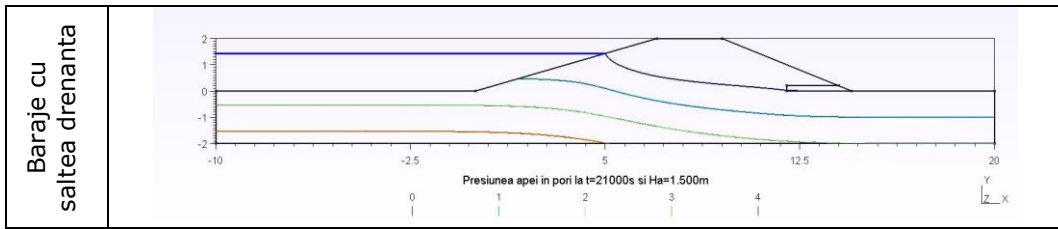
Înălțimea barajului de 10 m					
Lățimea coronamentului B=4.20 m					
Varianta drenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranța admisă	$\Delta t$ [s]	T [s]	L saltea drenantă [m]
2024	3790	0.005	1000	86000	5.20
Varianta nedrenată					
Număr noduri	Număr elemente	Toleranța admisă	$\Delta t$ [s]	T [s]	
1849	3468	0.005	1000	86000	

Pentru interpretarea rezultatelor obținute în cele două variante (cu și fără dren), rezultatele au fost folosite (prin intermediul unei alte aplicații scrise în Pascal) pentru a determina poziția indicată de piezometre așezate în diferite poziții (distanțe măsurate de la piciorul amonte al barajului) și compararea lor cu poziția apei pentru ipoteza unei mișcări cvasipermanente nivel maxim al apei în lac.

### 5.1.1. Baraje omogene din argile grase "CH"

Tabel 5.12 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile grase H=2 m

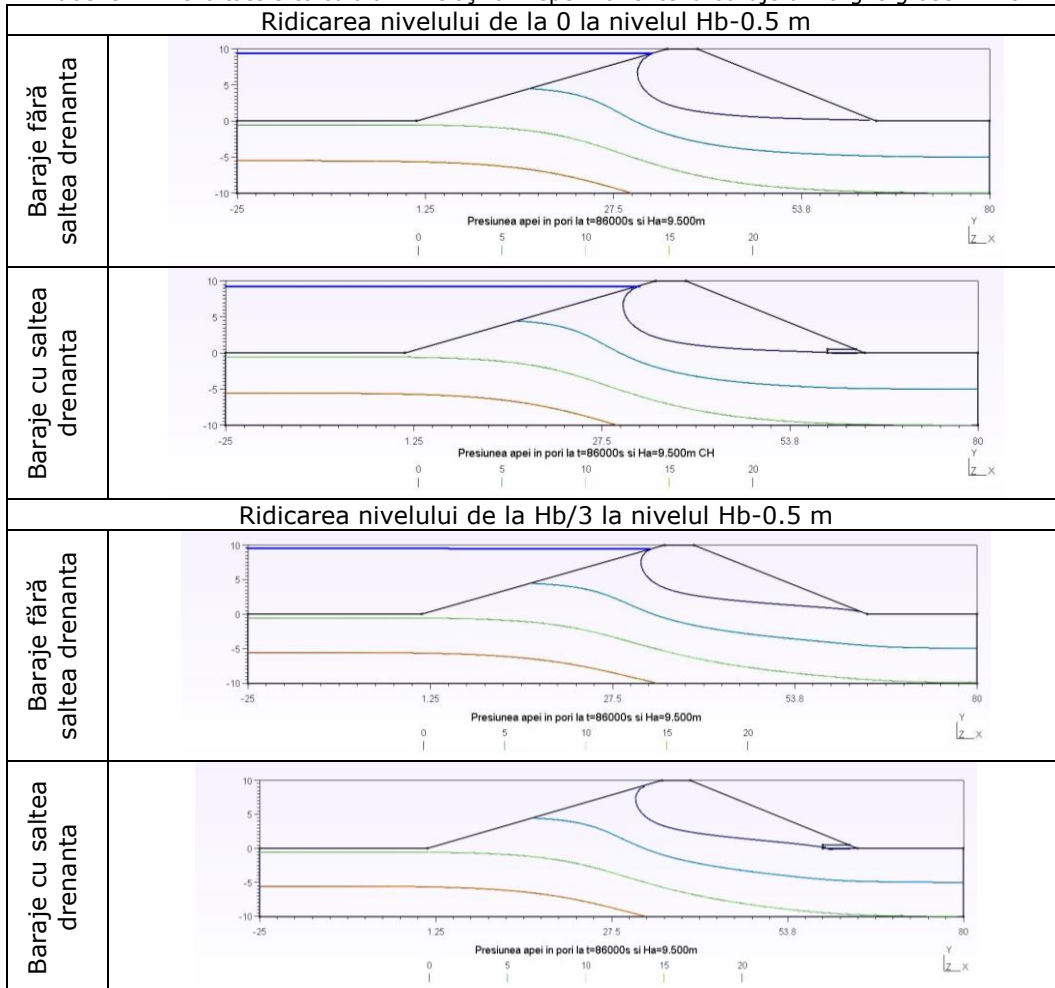




Tabel 5.13 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile grase H=5 m  
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul Hb-0.5 m

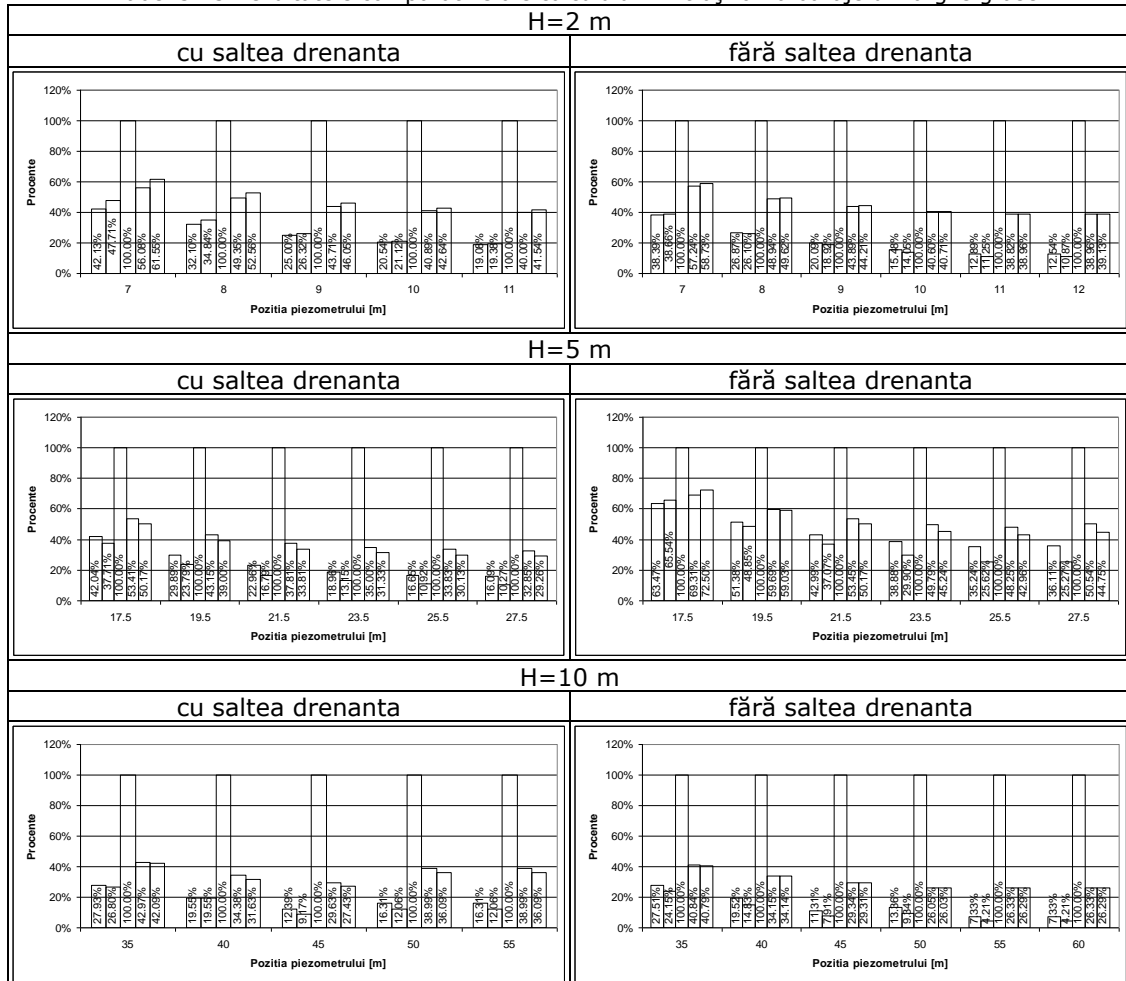
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul Hb-0.5 m	
Baraje fără saltea drenanta	
Baraje cu saltea drenanta	
Ridicarea nivelului de la Hb/3 la nivelul Hb-0.5 m	
Baraje fără saltea drenanta	
Baraje cu saltea drenanta	

Tabel 5.14 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile grase H=10 m



Pentru interpretarea și folosirea mai departe a rezultatelor obținute în modelarea infiltrațiilor nepermanente, s-a optat pe o prezentare grafică comparativă. S-au calculat nivelurile apei în piezometre virtuale situate la diferite distanțe față de piciorul monte și s-a raportat valoarea procentuală calculată în diferite ipoteze de variație a nivelului apei în lac, din valoarea nivelului obținut prin metodele clasice de calcul în regim staționar. Pentru același piezometru a fost reprezentate alăturat rezultatele cu următoarele semnificații: prima coloană (din stânga în dreapta) reprezintă valoarea relativă (procentuală) a nivelului apei obținut în cazul unei variații liniare a nivelului de la ipoteza lac gol la nivelul maxim al apei în lac, a doua coloană nivelul apei în piezometru în cazul unei variații bruște a nivelului apei în lac de la 0 la nivelul maxim, a treia coloană nivelul obținut în cazul mișcării permanente staționare, a patra coloană reprezintă rezultatul obținut în cazul în care variația nivelului apei în lac are loc liniar de la nivelul normal de retenție considerat al o treime din înălțimea barajului, iar cea de a cincea coloană reprezintă rezultatul unei variații bruște a nivelului.

Tabel 5.15 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din argile grase



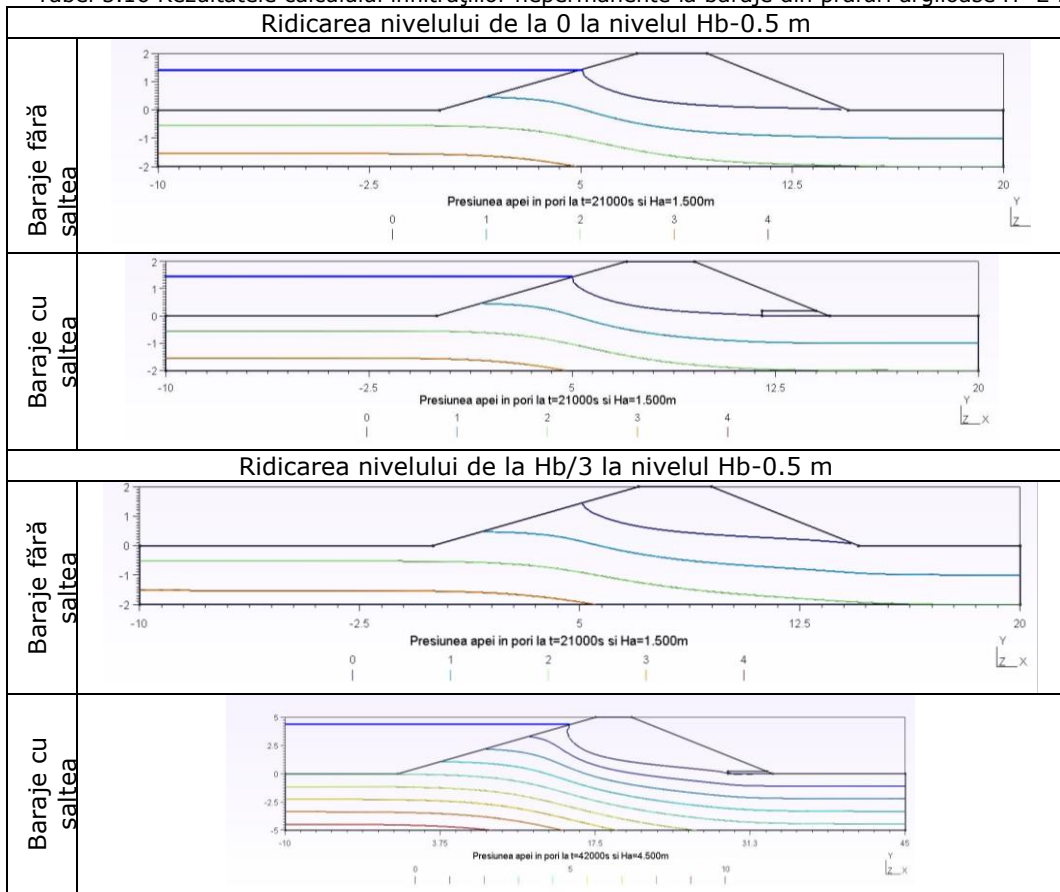
Analizând situația comparativă a nivelurilor prezentată în tabelul 5.15, se pot trage următoarele concluzii:

- compararea rezultatelor obținute în calculul infiltrațiilor nepermanente prin medii nesaturate cu cele obținute în regimul cvasipermanent, pun în evidență diferențe semnificative la barajele medii și de mici dimensiuni (2 și 5 m), unde nivelul apei în piezometrele prezentate la barajele drenate cu exploatare nepermanentă reprezintă între 42% și 16% din nivelul obținut în mișcarea permanentă și între 56% și 32% în cazul barajului cu acumulare permanentă.
- Barajele drenate din clasa de înălțime superioară se comportă diferit în sensul în care nivelul în piezometre reprezintă doar între 28% și 16 % și între 43% și 38 % în cazul barajelor cu acumulări permanente.
- Modul în care este modelată variația nivelului apei în lac (brusc sau liniar pe perioada analizată) nu influențează semnificativ

rezultatele obținute (sub 5%), iar în cazul barajelor cu înălțime mare diferențele obținute fiind chiar sub 3%.  
 - Rezultatele obținute în cazul barajelor nedrenate sunt asemănătoare ca pondere raportată la nivelul apei în mișcarea cvasipermanenta.

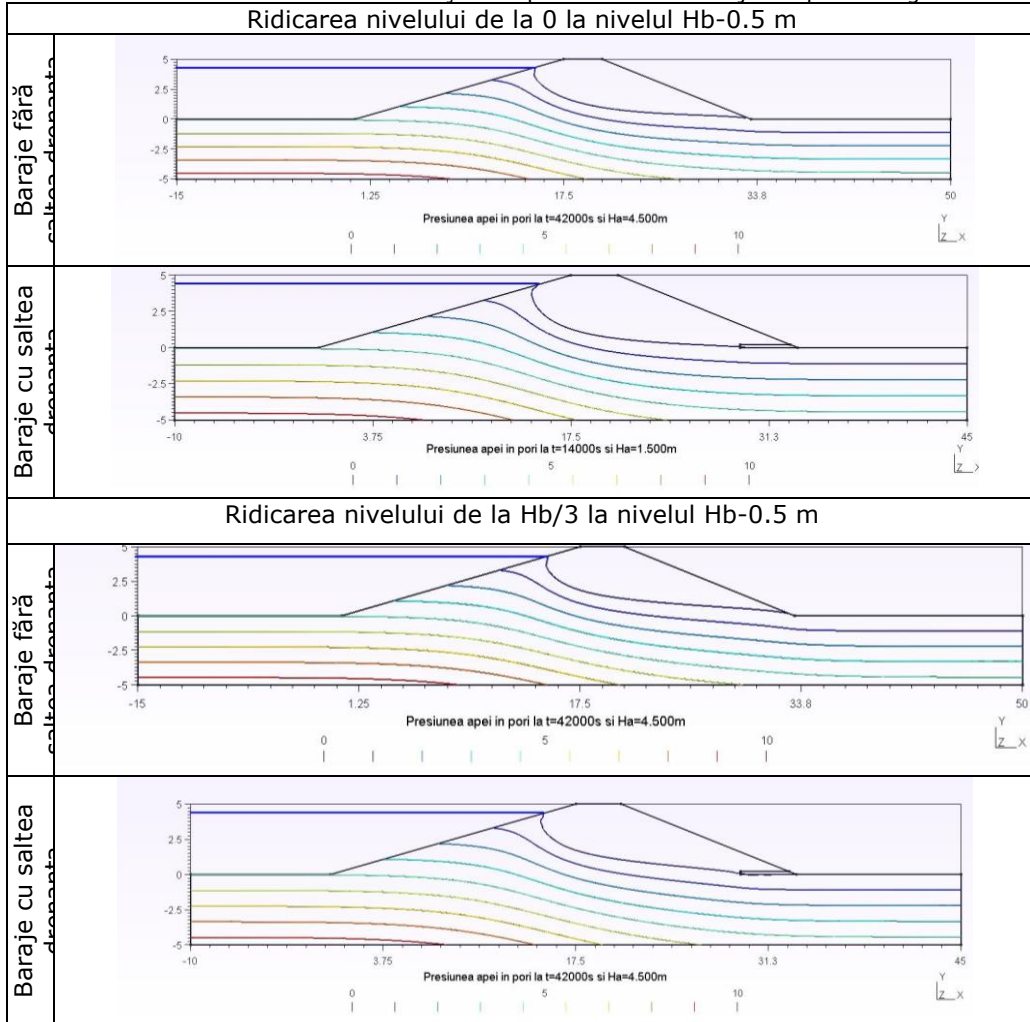
5.1.2. Baraje omogene din prafuri argiloase "MH"

Tabel 5.16 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din prafuri argiloase H=2 m

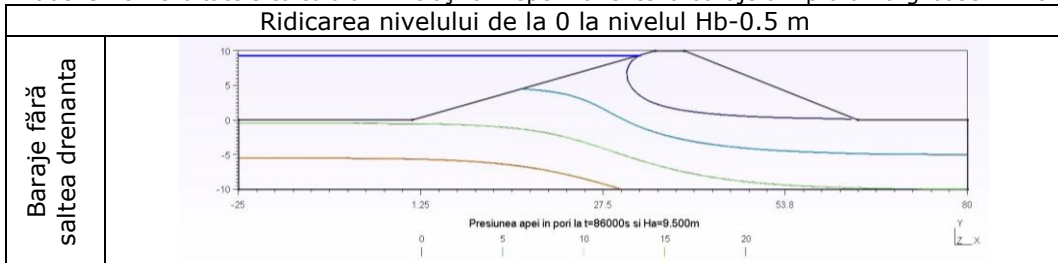


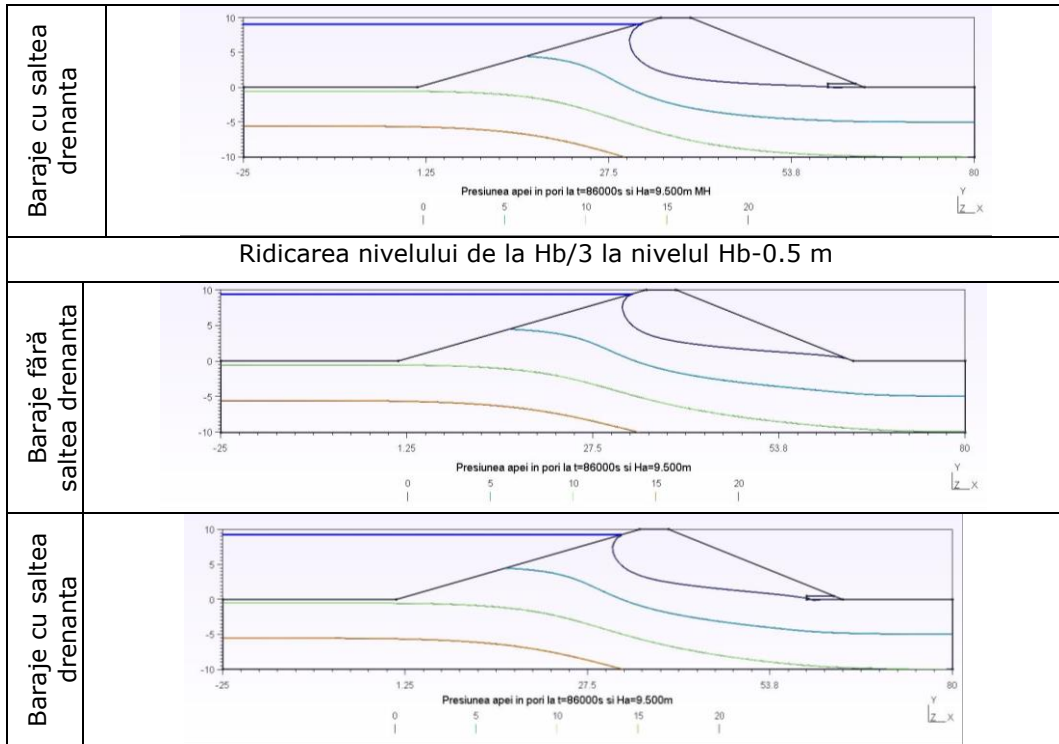


Tabel 5.17 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din prafuri argiloase H=5 m  
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul Hb-0.5 m



Tabel 5.18 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din prafuri argiloase H=10 m  
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul Hb-0.5 m

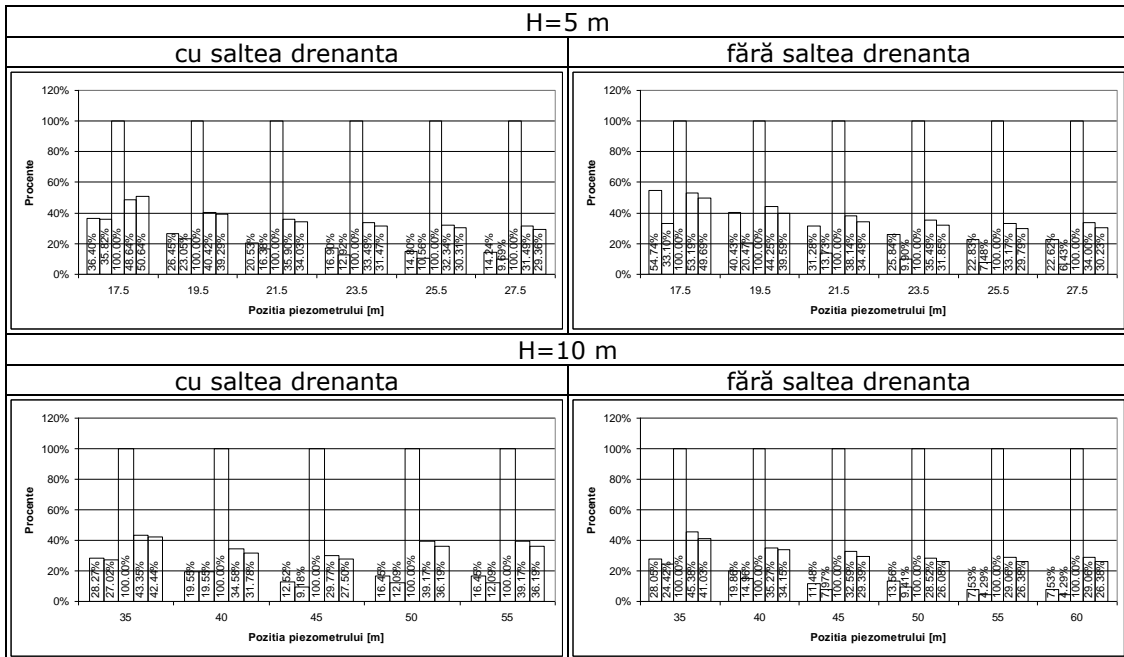




Raportarea sintetică a situației nivelului apei în piezometre, obținută în calculul infiltrațiilor nepermanentă la cele obținute în regim cvasipermanent este făcută în tabelul 5.19:

Tabel 5.19 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din prafuri argiloase

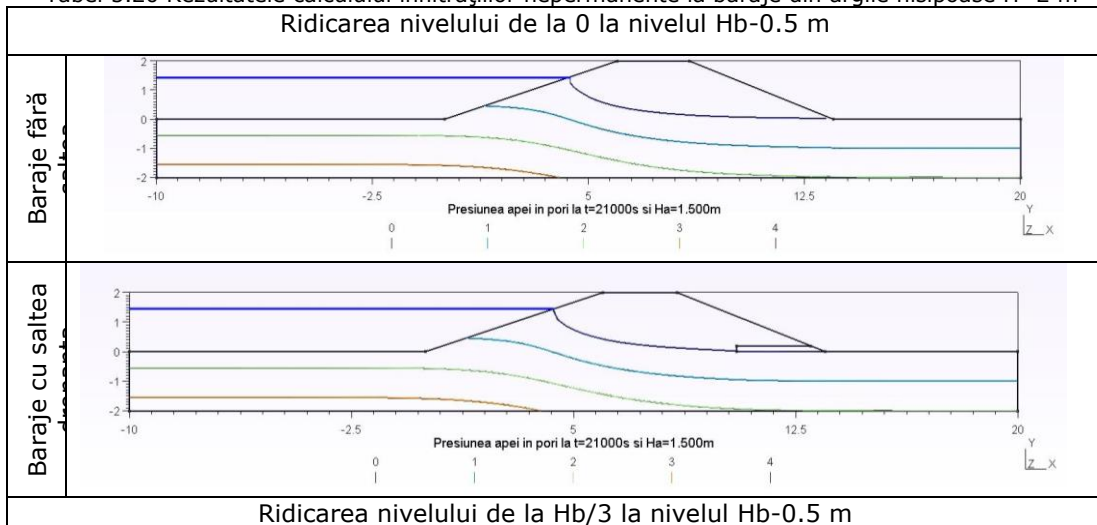
H=2 m																																																																																																											
cu saltea drenanta	fără saltea drenanta																																																																																																										
<table border="1"> <caption>Data for 'cu saltea drenanta' chart</caption> <thead> <tr> <th>Pozitia piezometrului [m]</th> <th>Procente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7</td><td>42.88%</td></tr> <tr><td>7</td><td>48.10%</td></tr> <tr><td>7</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>7</td><td>58.68%</td></tr> <tr><td>7</td><td>62.85%</td></tr> <tr><td>8</td><td>32.82%</td></tr> <tr><td>8</td><td>36.13%</td></tr> <tr><td>8</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>8</td><td>48.68%</td></tr> <tr><td>8</td><td>52.35%</td></tr> <tr><td>9</td><td>25.58%</td></tr> <tr><td>9</td><td>27.38%</td></tr> <tr><td>9</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>9</td><td>44.68%</td></tr> <tr><td>9</td><td>46.74%</td></tr> <tr><td>10</td><td>21.12%</td></tr> <tr><td>10</td><td>27.38%</td></tr> <tr><td>10</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>10</td><td>41.24%</td></tr> <tr><td>10</td><td>43.41%</td></tr> <tr><td>11</td><td>19.66%</td></tr> <tr><td>11</td><td>20.33%</td></tr> <tr><td>11</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>11</td><td>40.33%</td></tr> <tr><td>11</td><td>42.15%</td></tr> </tbody> </table>	Pozitia piezometrului [m]	Procente	7	42.88%	7	48.10%	7	100.00%	7	58.68%	7	62.85%	8	32.82%	8	36.13%	8	100.00%	8	48.68%	8	52.35%	9	25.58%	9	27.38%	9	100.00%	9	44.68%	9	46.74%	10	21.12%	10	27.38%	10	100.00%	10	41.24%	10	43.41%	11	19.66%	11	20.33%	11	100.00%	11	40.33%	11	42.15%	<table border="1"> <caption>Data for 'fără saltea drenanta' chart</caption> <thead> <tr> <th>Pozitia piezometrului [m]</th> <th>Procente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>7</td><td>39.35%</td></tr> <tr><td>7</td><td>39.18%</td></tr> <tr><td>7</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>7</td><td>58.03%</td></tr> <tr><td>7</td><td>59.42%</td></tr> <tr><td>8</td><td>27.65%</td></tr> <tr><td>8</td><td>27.03%</td></tr> <tr><td>8</td><td>49.52%</td></tr> <tr><td>8</td><td>50.13%</td></tr> <tr><td>9</td><td>20.72%</td></tr> <tr><td>9</td><td>13.83%</td></tr> <tr><td>9</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>9</td><td>44.22%</td></tr> <tr><td>9</td><td>44.74%</td></tr> <tr><td>10</td><td>16.07%</td></tr> <tr><td>10</td><td>12.76%</td></tr> <tr><td>10</td><td>11.84%</td></tr> <tr><td>10</td><td>41.07%</td></tr> <tr><td>11</td><td>13.14%</td></tr> <tr><td>11</td><td>11.84%</td></tr> <tr><td>11</td><td>39.33%</td></tr> <tr><td>11</td><td>39.51%</td></tr> <tr><td>12</td><td>13.14%</td></tr> <tr><td>12</td><td>11.84%</td></tr> <tr><td>12</td><td>39.48%</td></tr> <tr><td>12</td><td>39.63%</td></tr> </tbody> </table>	Pozitia piezometrului [m]	Procente	7	39.35%	7	39.18%	7	100.00%	7	58.03%	7	59.42%	8	27.65%	8	27.03%	8	49.52%	8	50.13%	9	20.72%	9	13.83%	9	100.00%	9	44.22%	9	44.74%	10	16.07%	10	12.76%	10	11.84%	10	41.07%	11	13.14%	11	11.84%	11	39.33%	11	39.51%	12	13.14%	12	11.84%	12	39.48%	12	39.63%
Pozitia piezometrului [m]	Procente																																																																																																										
7	42.88%																																																																																																										
7	48.10%																																																																																																										
7	100.00%																																																																																																										
7	58.68%																																																																																																										
7	62.85%																																																																																																										
8	32.82%																																																																																																										
8	36.13%																																																																																																										
8	100.00%																																																																																																										
8	48.68%																																																																																																										
8	52.35%																																																																																																										
9	25.58%																																																																																																										
9	27.38%																																																																																																										
9	100.00%																																																																																																										
9	44.68%																																																																																																										
9	46.74%																																																																																																										
10	21.12%																																																																																																										
10	27.38%																																																																																																										
10	100.00%																																																																																																										
10	41.24%																																																																																																										
10	43.41%																																																																																																										
11	19.66%																																																																																																										
11	20.33%																																																																																																										
11	100.00%																																																																																																										
11	40.33%																																																																																																										
11	42.15%																																																																																																										
Pozitia piezometrului [m]	Procente																																																																																																										
7	39.35%																																																																																																										
7	39.18%																																																																																																										
7	100.00%																																																																																																										
7	58.03%																																																																																																										
7	59.42%																																																																																																										
8	27.65%																																																																																																										
8	27.03%																																																																																																										
8	49.52%																																																																																																										
8	50.13%																																																																																																										
9	20.72%																																																																																																										
9	13.83%																																																																																																										
9	100.00%																																																																																																										
9	44.22%																																																																																																										
9	44.74%																																																																																																										
10	16.07%																																																																																																										
10	12.76%																																																																																																										
10	11.84%																																																																																																										
10	41.07%																																																																																																										
11	13.14%																																																																																																										
11	11.84%																																																																																																										
11	39.33%																																																																																																										
11	39.51%																																																																																																										
12	13.14%																																																																																																										
12	11.84%																																																																																																										
12	39.48%																																																																																																										
12	39.63%																																																																																																										



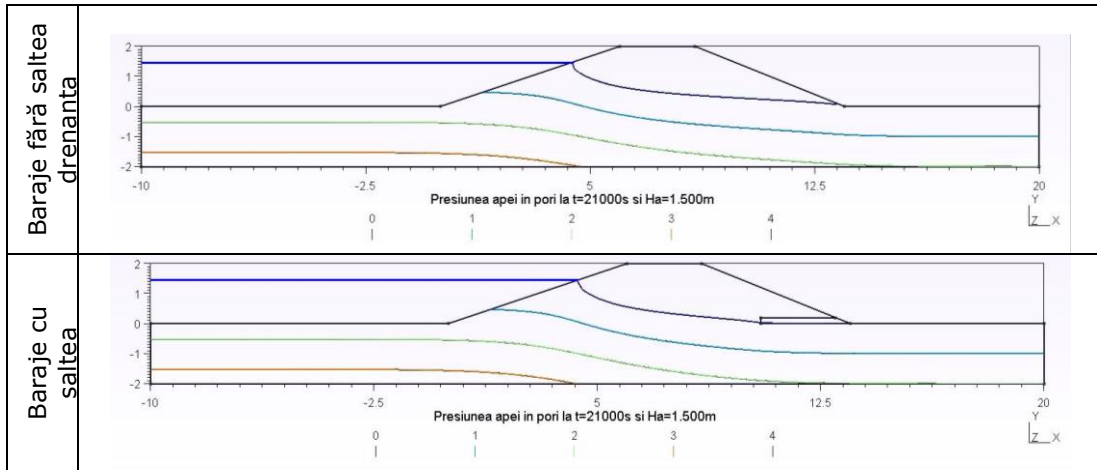
- Analizând rezultatele prezentate în tabelul 5.19 și comparându-le cu cele obținute în cazul barajului realizat din argile grase se poate concluziona că rezultatele sunt asemănătoare și diferențele sunt în marja de 5%.

### 5.1.3. Baraje omogene din argile nisipoase "CL"

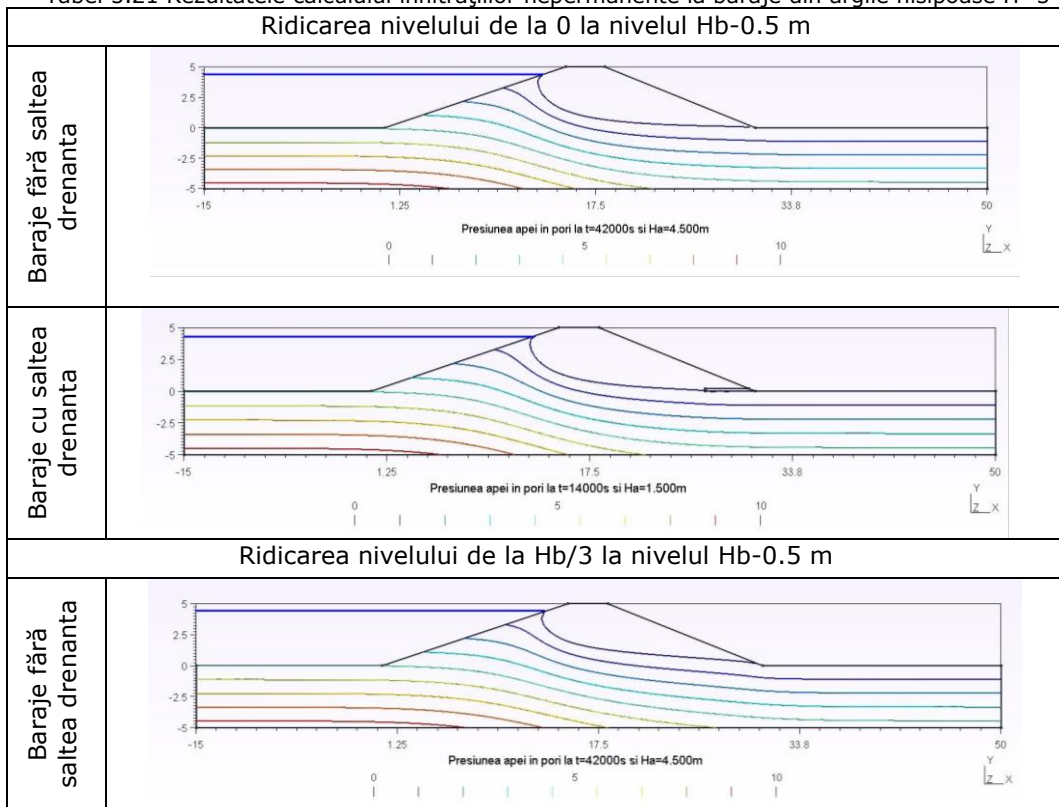
Tabel 5.20 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile nisipoase H=2 m  
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul Hb-0.5 m

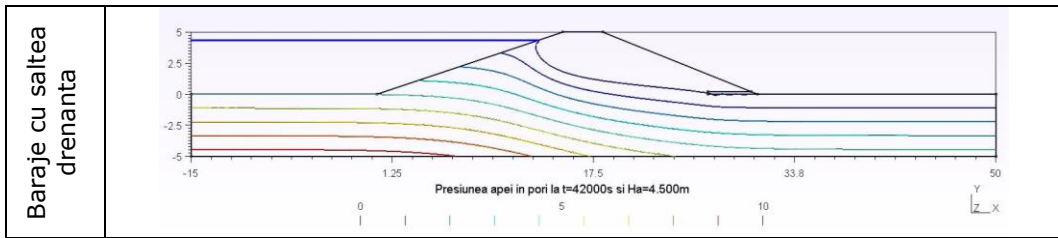


Ridicarea nivelului de la Hb/3 la nivelul Hb-0.5 m



Tabel 5.21 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile nisipoase  $H=5$  m  
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul  $H_b-0.5$  m



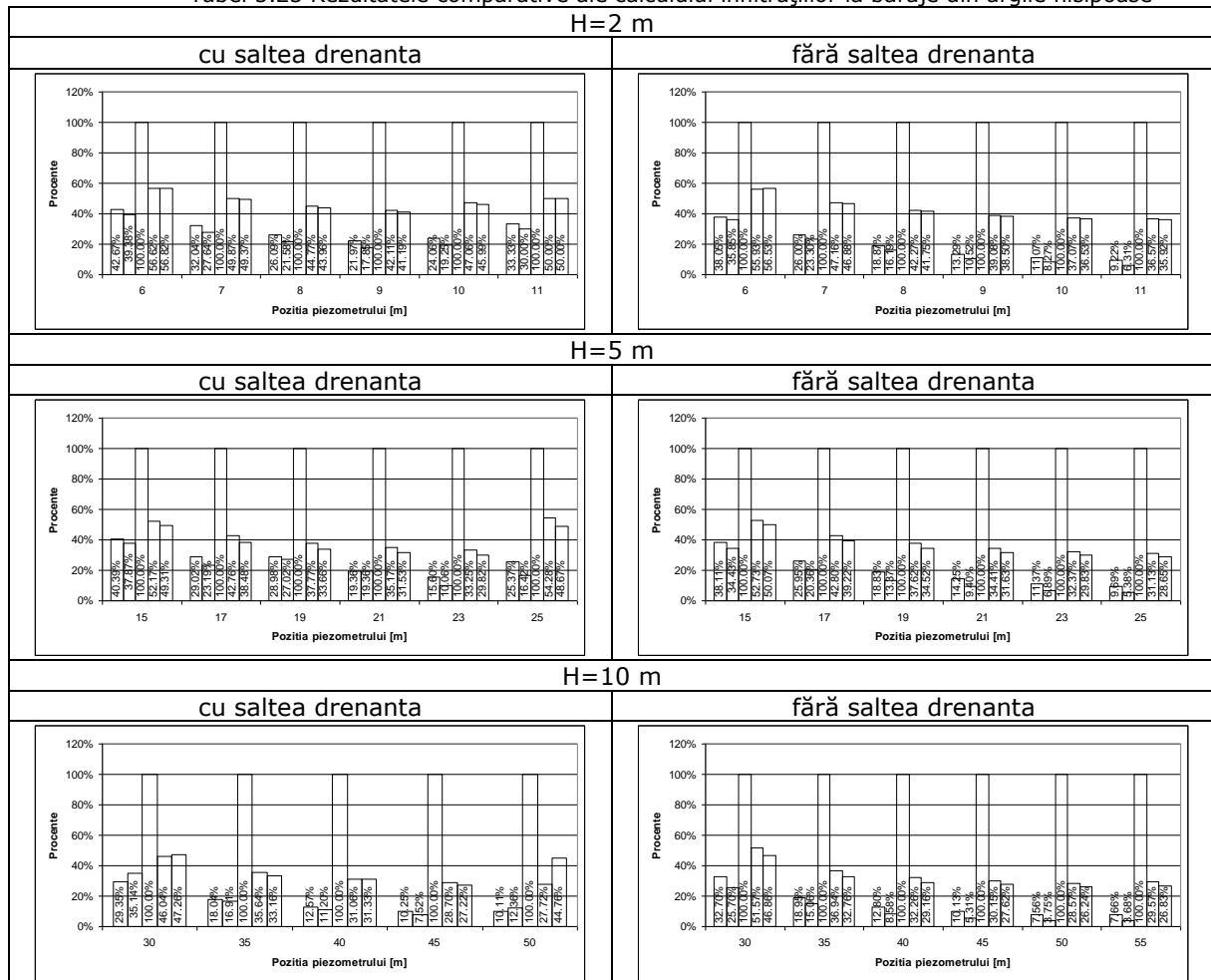


Tabel 5.22 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din argile nisipoase H=10 m  
Ridicarea nivelului de la 0 la nivelul Hb-0.5 m

Baraje fără saltea drenanta	
Baraje cu saltea drenanta	
Ridicarea nivelului de la Hb/3 la nivelul Hb-0.5 m	
Baraje fără saltea drenanta	
Baraje cu saltea drenanta	

În tabelul 5.23 sunt prezentate rezultatele comparative obținute în cele 4 ipoteze de calcul pentru diferite poziții ale piezometrelor.

Tabel 5.23 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din argile nisipoase



Analizând rezultatele în tabelul 5.23 pentru barajele omogene formate din argile nisipoase se poate concluziona:

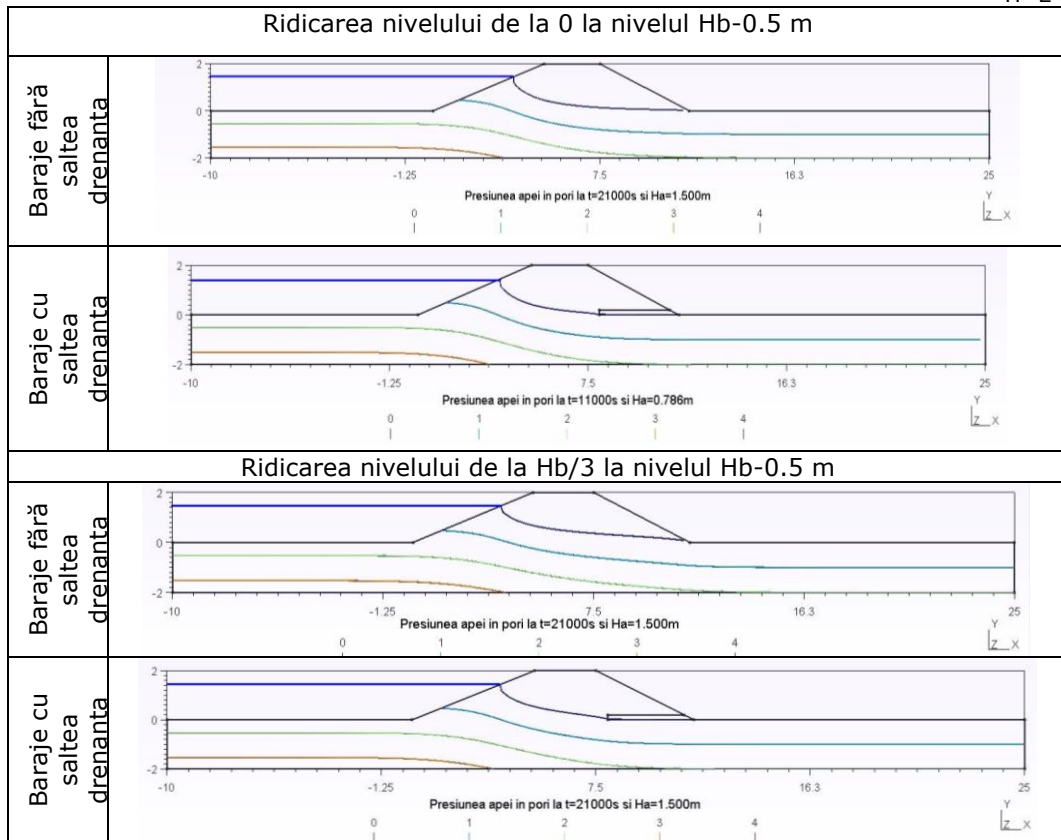
- rezultatele obținute în modelarea nepermanentă prin medii nesaturate pun în evidență diferențe semnificative la barajele medii și de mici dimensiuni (2 și 5 m), unde nivelul apei în piezometrele prezentate la barajele drenate cu acumulări nepermanente reprezintă între 42% și 15% din nivelul obținut în mișcarea staționară și între 56% și 33% în cazul barajului cu acumulare permanentă. Barajele drenate cu acumulări nepermanente din clasa de înălțime superioară se comportă diferit, nivelul în piezometre reprezintă între 29% și 10% și între 46% și 27% în cazul barajelor cu acumulări permanente.
- Modul în care este modelată variația nivelului apei în lac (brusc sau liniar pe perioada analizată) pune în evidență faptul ca diferențele obținute sunt sub 3%, în cazul barajelor cu înălțime mare

diferențele obținute sunt de 7% în piezometrele din zona amonte a barajului și sub 4-5% în piezometrele situate înspre taluzul aval.

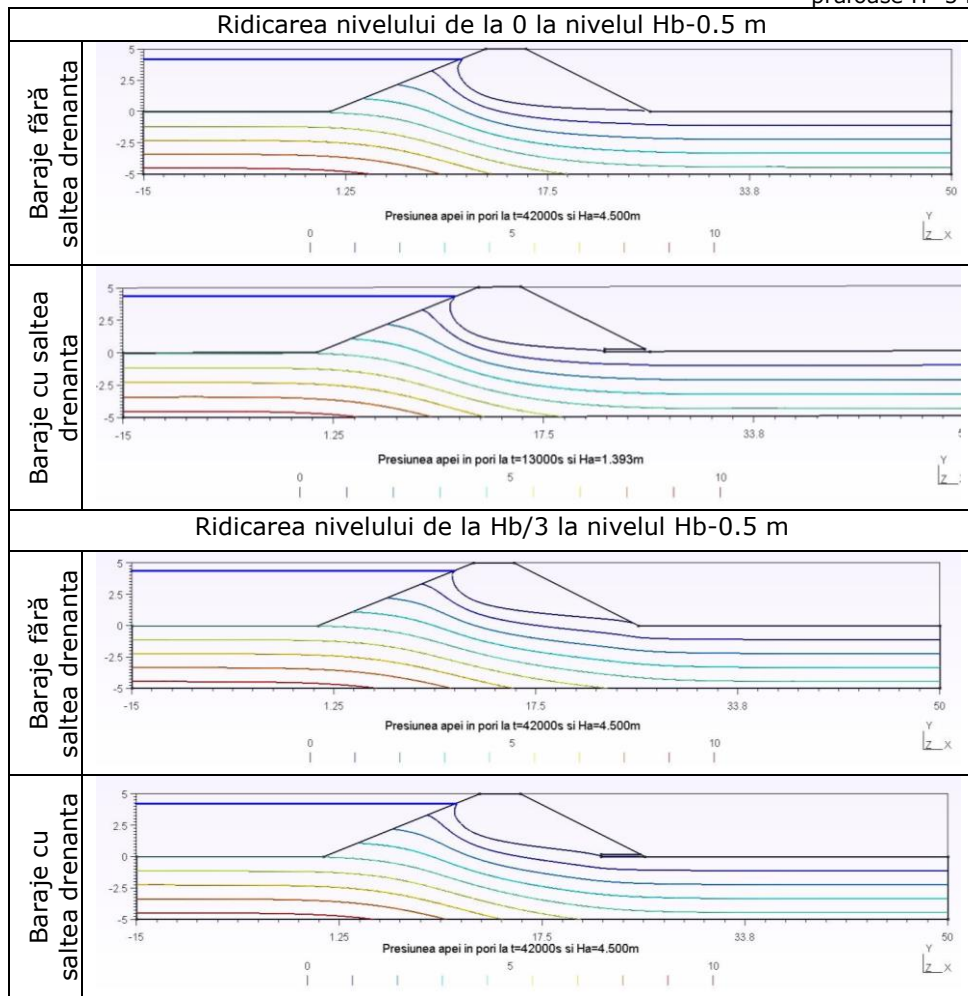
- Spre deosebire de cazurile anterioare se observa ca ponderea nivelului în piezometre este mai scăzuta spre piciorul aval.

### 5.1.4. Baraje omogene din nisipuri fine prăfoase "SM"

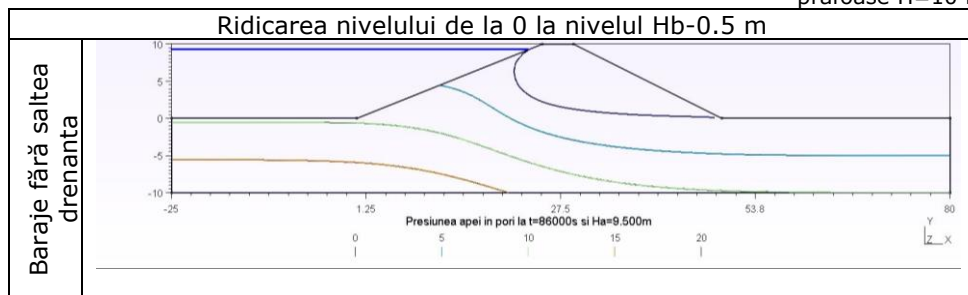
Tabel 5.24 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine prăfoase H=2 m



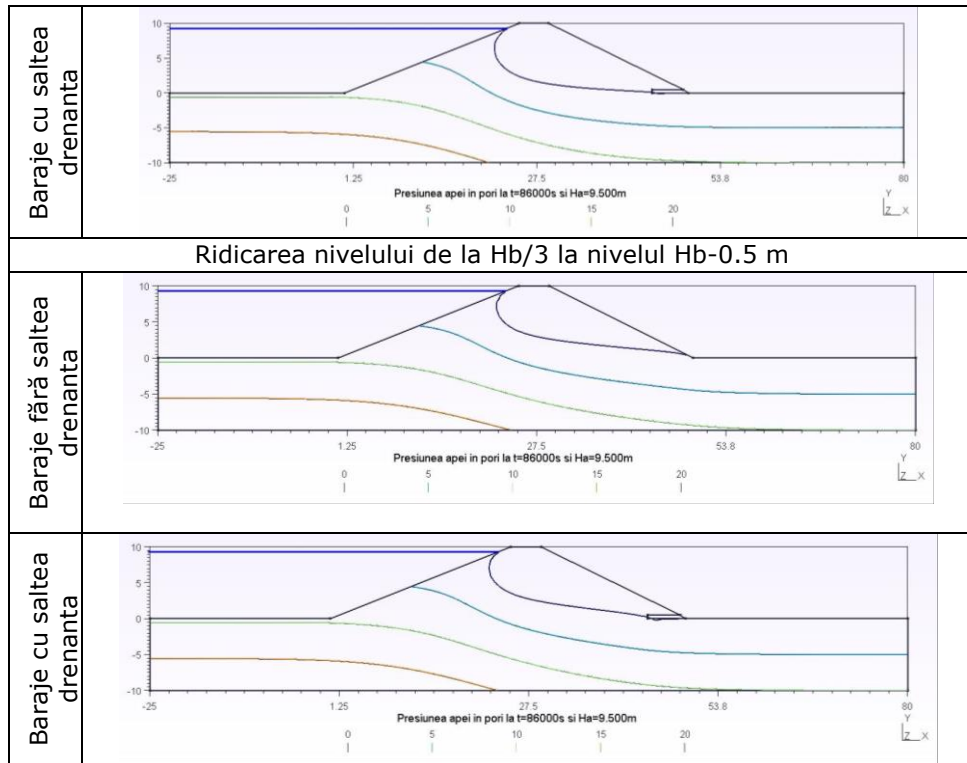
Tabel 5.25 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine prăfoase H=5 m



Tabel 5.26 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine prăfoase H=10 m



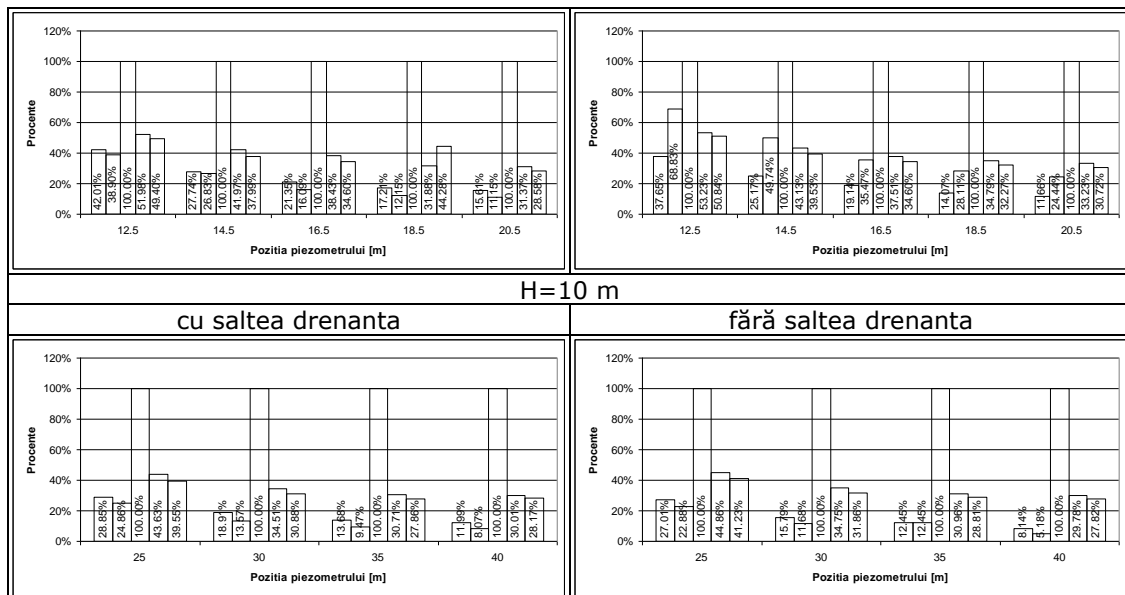




Rezultatele comparative între diferitele ipoteze de calcul a infiltrațiilor nepermanente sunt prezentate concentrat în variantă grafică în tabelul 5.27.

Tabel 5.27 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din nisipuri prăfoase

H=2 m																																																																																					
cu saltea drenanta	fără saltea drenanta																																																																																				
<table border="1"> <caption>Data for H=2m with drainage</caption> <thead> <tr> <th>Pozitia piezometrului [m]</th> <th>Procente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>48.68%</td></tr> <tr><td>5</td><td>47.22%</td></tr> <tr><td>5</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>5</td><td>60.73%</td></tr> <tr><td>5</td><td>62.08%</td></tr> <tr><td>6</td><td>40.51%</td></tr> <tr><td>6</td><td>37.03%</td></tr> <tr><td>6</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>6</td><td>53.80%</td></tr> <tr><td>6</td><td>53.80%</td></tr> <tr><td>7</td><td>34.34%</td></tr> <tr><td>7</td><td>30.81%</td></tr> <tr><td>7</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>7</td><td>50.25%</td></tr> <tr><td>7</td><td>50.00%</td></tr> </tbody> </table>	Pozitia piezometrului [m]	Procente	5	48.68%	5	47.22%	5	100.00%	5	60.73%	5	62.08%	6	40.51%	6	37.03%	6	100.00%	6	53.80%	6	53.80%	7	34.34%	7	30.81%	7	100.00%	7	50.25%	7	50.00%	<table border="1"> <caption>Data for H=2m without drainage</caption> <thead> <tr> <th>Pozitia piezometrului [m]</th> <th>Procente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>5</td><td>38.36%</td></tr> <tr><td>5</td><td>37.62%</td></tr> <tr><td>5</td><td>100.00%</td></tr> <tr><td>5</td><td>156.85%</td></tr> <tr><td>5</td><td>156.85%</td></tr> <tr><td>6</td><td>206.64%</td></tr> <tr><td>6</td><td>125.83%</td></tr> <tr><td>6</td><td>147.97%</td></tr> <tr><td>6</td><td>147.98%</td></tr> <tr><td>7</td><td>18.70%</td></tr> <tr><td>7</td><td>15.31%</td></tr> <tr><td>7</td><td>142.85%</td></tr> <tr><td>7</td><td>42.41%</td></tr> <tr><td>8</td><td>144.24%</td></tr> <tr><td>8</td><td>111.15%</td></tr> <tr><td>8</td><td>140.02%</td></tr> <tr><td>8</td><td>339.53%</td></tr> <tr><td>9</td><td>111.24%</td></tr> <tr><td>9</td><td>83.67%</td></tr> <tr><td>9</td><td>37.88%</td></tr> <tr><td>9</td><td>37.88%</td></tr> <tr><td>10</td><td>111.24%</td></tr> <tr><td>10</td><td>83.67%</td></tr> <tr><td>10</td><td>37.88%</td></tr> <tr><td>10</td><td>37.07%</td></tr> </tbody> </table>	Pozitia piezometrului [m]	Procente	5	38.36%	5	37.62%	5	100.00%	5	156.85%	5	156.85%	6	206.64%	6	125.83%	6	147.97%	6	147.98%	7	18.70%	7	15.31%	7	142.85%	7	42.41%	8	144.24%	8	111.15%	8	140.02%	8	339.53%	9	111.24%	9	83.67%	9	37.88%	9	37.88%	10	111.24%	10	83.67%	10	37.88%	10	37.07%
Pozitia piezometrului [m]	Procente																																																																																				
5	48.68%																																																																																				
5	47.22%																																																																																				
5	100.00%																																																																																				
5	60.73%																																																																																				
5	62.08%																																																																																				
6	40.51%																																																																																				
6	37.03%																																																																																				
6	100.00%																																																																																				
6	53.80%																																																																																				
6	53.80%																																																																																				
7	34.34%																																																																																				
7	30.81%																																																																																				
7	100.00%																																																																																				
7	50.25%																																																																																				
7	50.00%																																																																																				
Pozitia piezometrului [m]	Procente																																																																																				
5	38.36%																																																																																				
5	37.62%																																																																																				
5	100.00%																																																																																				
5	156.85%																																																																																				
5	156.85%																																																																																				
6	206.64%																																																																																				
6	125.83%																																																																																				
6	147.97%																																																																																				
6	147.98%																																																																																				
7	18.70%																																																																																				
7	15.31%																																																																																				
7	142.85%																																																																																				
7	42.41%																																																																																				
8	144.24%																																																																																				
8	111.15%																																																																																				
8	140.02%																																																																																				
8	339.53%																																																																																				
9	111.24%																																																																																				
9	83.67%																																																																																				
9	37.88%																																																																																				
9	37.88%																																																																																				
10	111.24%																																																																																				
10	83.67%																																																																																				
10	37.88%																																																																																				
10	37.07%																																																																																				
H=5 m																																																																																					
cu saltea drenanta	fără saltea drenanta																																																																																				

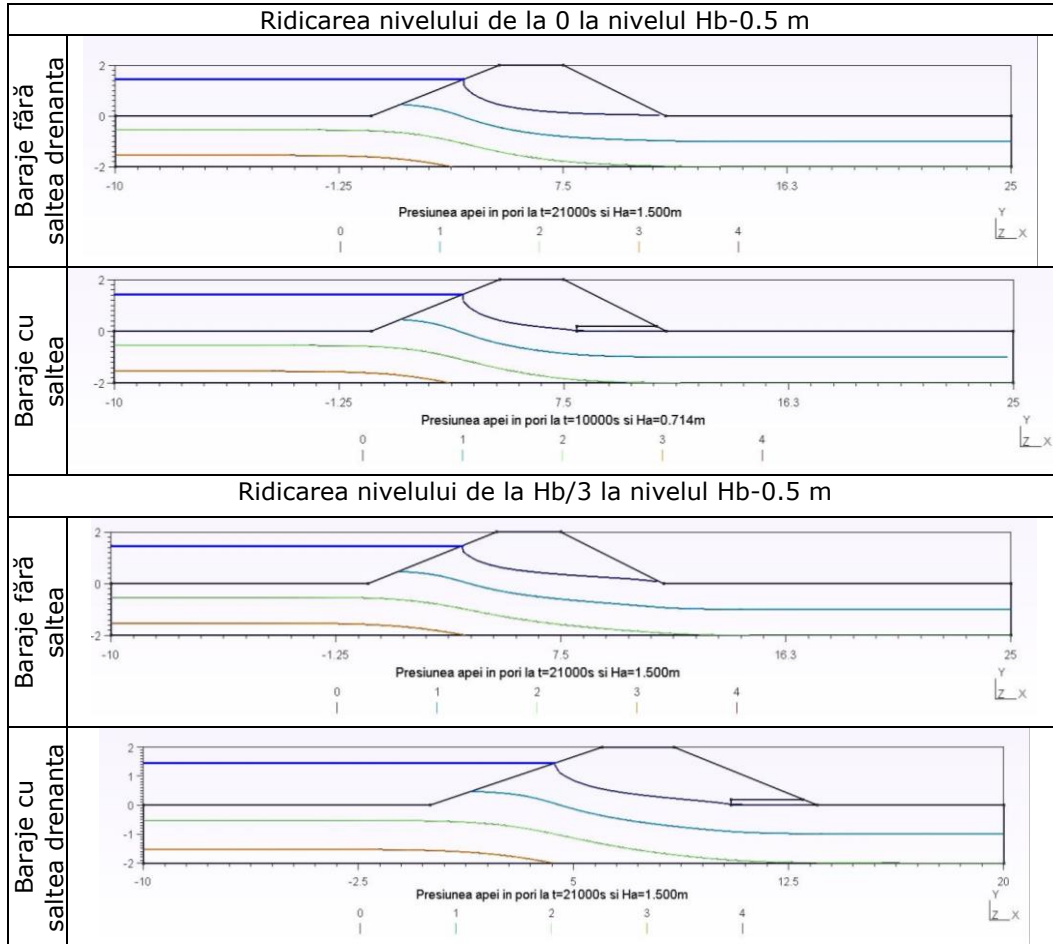


Pentru barajele formate din pământuri nisipos-prăfoase se pot trage următoarele concluzii:

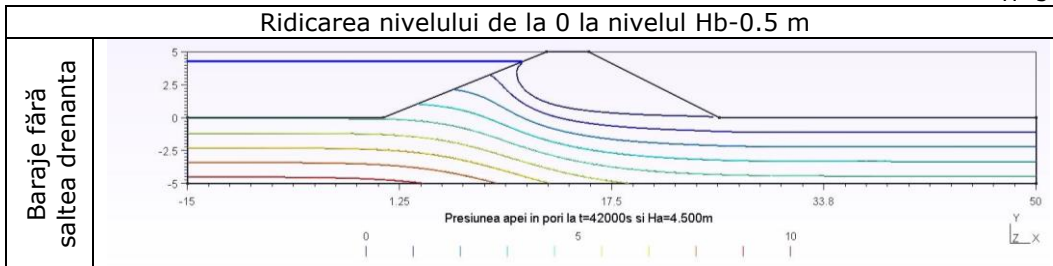
- rezultatele obținute în modelarea nepermanentă a infiltrațiilor prin medii nesaturate comparate cu cele obținute în regimul permanent pun în evidență diferențe semnificative la barajele medii și de mici dimensiuni (2 și 5 m), unde nivelul apei în piezometrele prezentate la barajele drenate cu acumulări nepermanente reprezintă între 48% și 15% din nivelul obținut în mișcarea permanentă și între 62% și 31% în cazul barajului cu acumulare permanentă. Ponderea este mai crescută datorită faptului că porii au dimensiuni mai mari și saturarea are loc mai rapid înspre taluzul amonte.
- Barajele drenate din clasa de înălțime superioară nivelul în piezometre reprezintă între 28% și 11% în cazul barajelor cu acumulări nepermanente și între 43 și 30% în cazul barajelor cu acumulări permanente. Faptul că apa este preluată cu prioritate în zona amonte face ca înspre aval nivelul să urce mai lent în fazele incipiente ale viiturii.
- Modul în care este introdusă în calcul variația nivelului apei în lac (brusc sau liniar pe perioada analizată) nu influențează semnificativ rezultatele, diferențele păstrându-se în marja (considerată acceptabilă) de 5%.

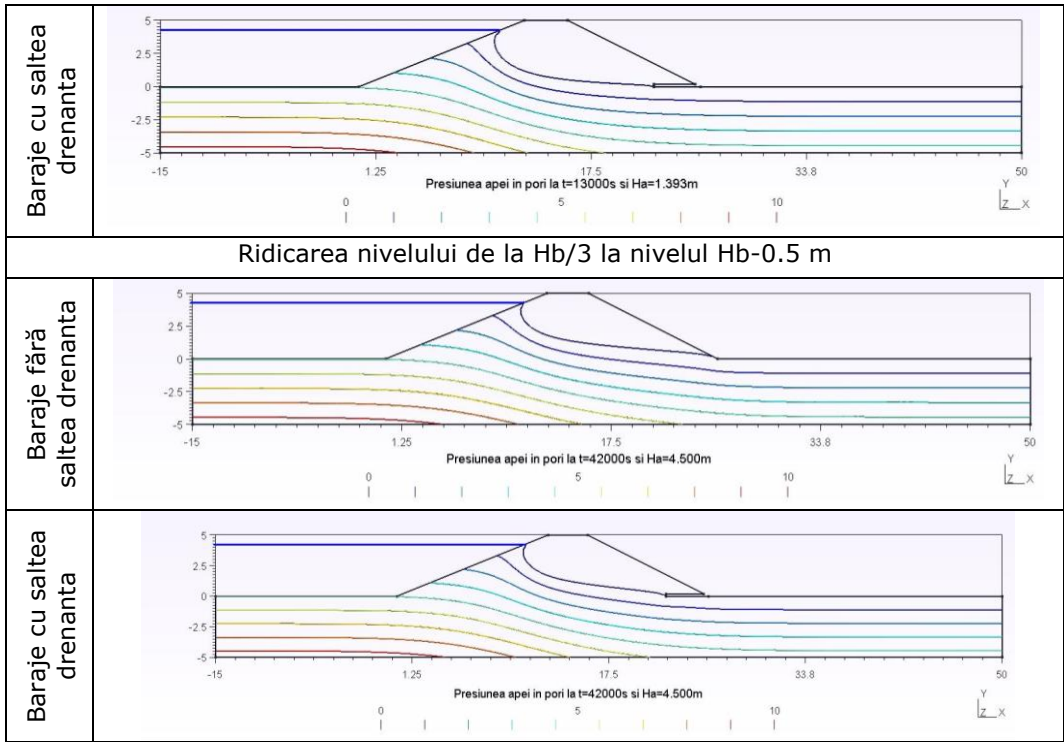
5.1.5. Baraje omogene din nisipuri fine argiloase "SC"

Tabel 5.28 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine argiloase H=2 m

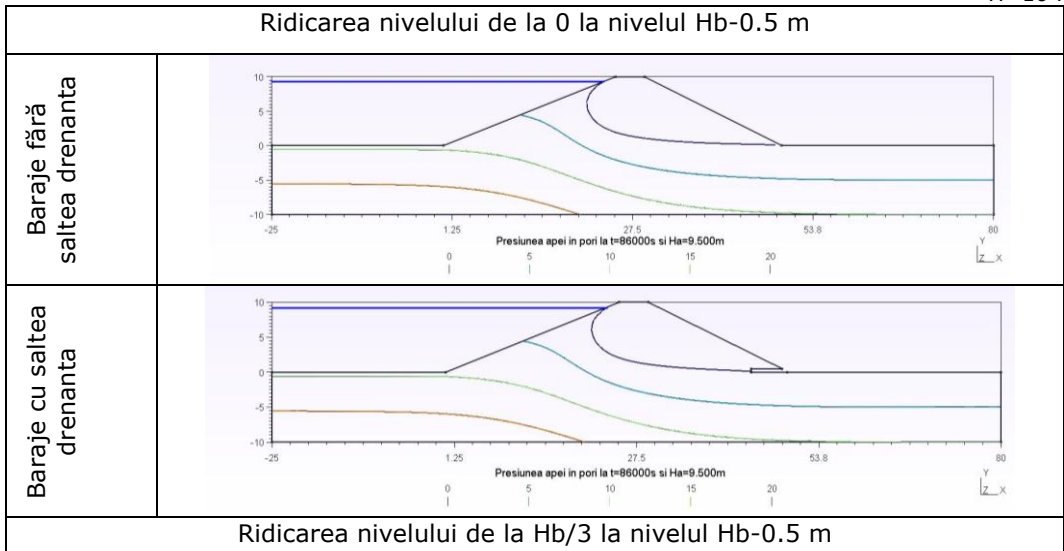


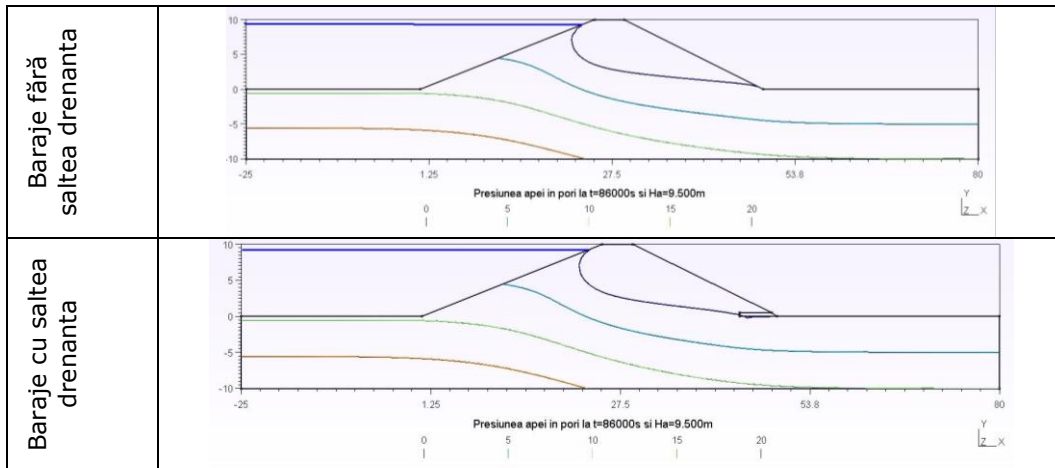
Tabel 5.29 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine argiloase H=5 m





Tabel 5.30 Rezultatele calculului infiltrațiilor nepermanente la baraje din nisipuri fine argiloase H=10 m

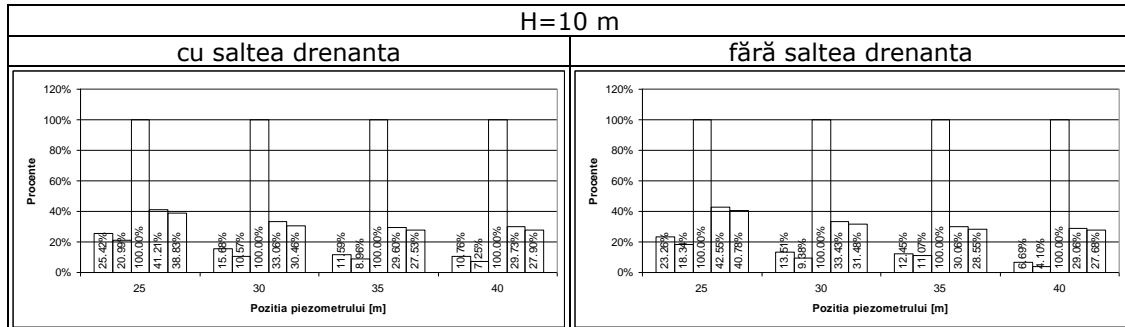




Raportarea procentuala a nivelului apei în piezometre obținut și prezentat în tabelul 5.31 la nivelul apei în regim cvasipermanent este prezentata în tabelul 5.31 (cu păstrarea semnificației culorilor din tabelul 5.16):

Tabel 5.31 Rezultatele comparative ale calculului infiltrațiilor la baraje din nisipuri argiloase

H=2 m	
cu saltea drenanta	fără saltea drenanta
H=5 m	
cu saltea drenanta	fără saltea drenanta



În cazul barajelor omogene formate din pământuri nisipos argiloase se poate concluziona:

- rezultatele obținute în modelarea nepermanentă prin medii nesaturate comparate cu cel obținute în regimul cvasipermanent pun în evidență diferențe semnificative la barajele medii și de mici dimensiuni (2 și 5 m), unde nivelul apei în piezometrele prezentate la barajele drenate reprezintă între 47% și 15% din nivelul obținut în mișcarea permanentă în condițiile în care barajul este exploatat în condițiile unei acumulări nepermanente și între 59% și 33% în cazul barajului cu acumulare permanentă.
- Barajele drenate din clasa de înălțime superioară nivelul în piezometre reprezintă între 25% și 10% în cazul barajelor cu acumulări nepermanente și între 41% și 38% în cazul barajelor cu acumulări permanente. Procentual rezultatele obținute pentru barajele nedrenante (raportat la mișcarea cvasipermanentă) sunt în marja de 2-4% comparativ cu cele obținute pentru barajele cu saltea drenanta.
- Modul în care este încărcat barajul cu nivelul apei în lac (brusc sau liniar pe perioada analizată) pune în evidență faptul că diferențele obținute sunt sub 5%.

În final se poate trage concluzia că modelarea nepermanentă a infiltrațiilor în cazul barajelor cu acumulări permanente sau nepermanente este foarte importantă având în vedere că aceste construcții odată permanentizate necesită urmărirea comportării în timp a infiltrațiilor prin corpul barajului indiferent de regimul de funcționare.

Compararea nivelurilor apei în piezometre în raport cu rezultatele obținute în cazul mișcării cvasipermanente la niveluri maxime sau normale în perioada viiturilor nu poate oferi o imagine fidelă a modului în care lucrarea se comporta în mod real, ba chiar oferă imaginea unei false stări de siguranță. Modul în care este interpretată curgerea apei prin corpul barajelor poate influența în continuare factorul de siguranță la stabilitatea taluzelor amonte și aval, modul în care masivul de pământ se deformează etc.

În capitolul 6 este studiată stabilitatea locală a taluzelor și o să fie prezentat în detaliu modul în care este influențat factorul de siguranță a taluzelor aval și amonte în mai multe ipoteze de calcul.

## 5.2. Evoluția curbei de infiltrații pentru barajele omogene din pământ

Pentru a ne face o imagine cu privire la modul în care piezometrele vor indica poziția curbei de infiltrații pe parcursul unei viituri și de condițiile necesare atingerii regimului cvasipermanent la nivel maxim programul MNPNS.exe a fost modificat în sensul calculării iterative a distribuției presiunii apei în barajul de pământ omogen și compararea cu distribuția sa în condiții cvasipermanente la nivelul maxim al apei în lac. În figura 5.1 este prezentată variația poziției curbei de infiltrații la diferite intervale de timp.

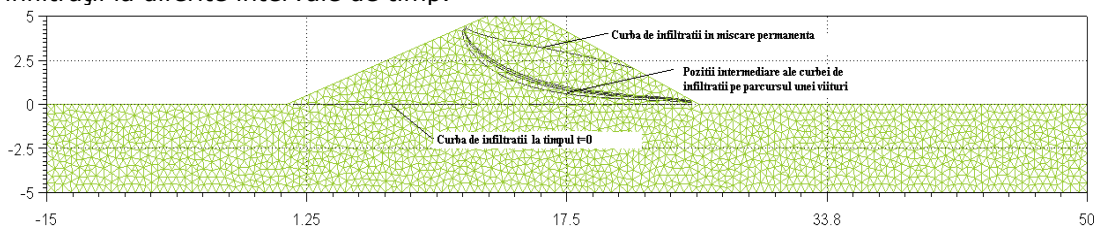


Figura 5.1 Rețea de calcul și evoluția curbei de infiltrații în timp

S-a fixat o toleranță admisă a procedurii iterative de 0,005 m și un increment de 1 ora.

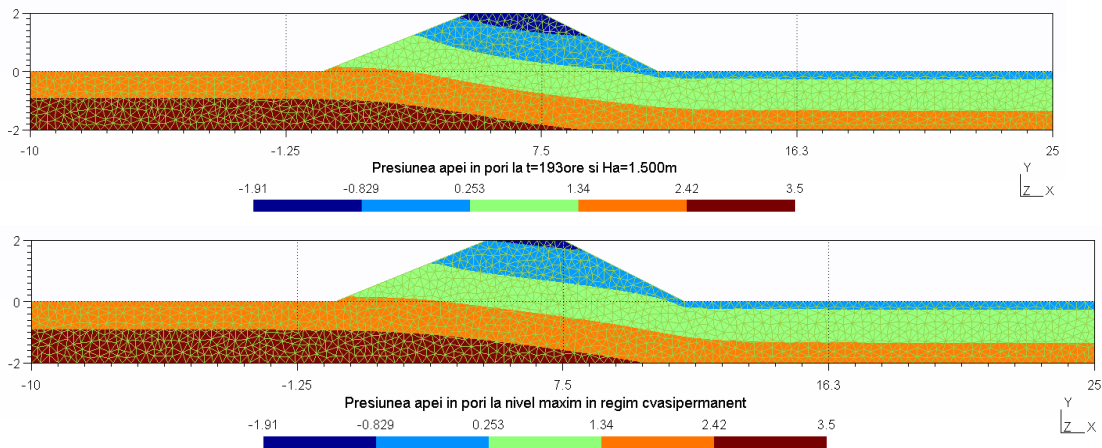


Figura 5.2 Distribuția presiunii apei în timp

Având în vedere rezultatele obținute cu privire la modul de comportare a infiltrațiilor în condițiile unei modelări diferite a variației nivelului apei în lac (diferențe de sub 2-5 % în funcție de înălțimea barajului și timpul de calcul), s-a considerat o variație bruscă a nivelului apei în lac și a fost păstrat la nivelul maxim pe toată perioada de calcul.

Indiferent de înălțimea barajului, de tipul pământului ori de prezența sau nu a saltelei drenante regimul cvasipermanent nu a fost atins nici după depășirea unui număr de (în medie) 2500 iterații. (aproximativ 100 zile).

S-a decis urmărirea comportării piezometrelor prin compararea nivelului de apă în timp:



Tabel 5.32 Timpii intermediari de calcul

Înălțime baraj	$t_0$ [ore]	$t_1$ [ore]	$t_2$ [zile]
2m	0	6	7
5m	0	12	14
10m	0	24	14

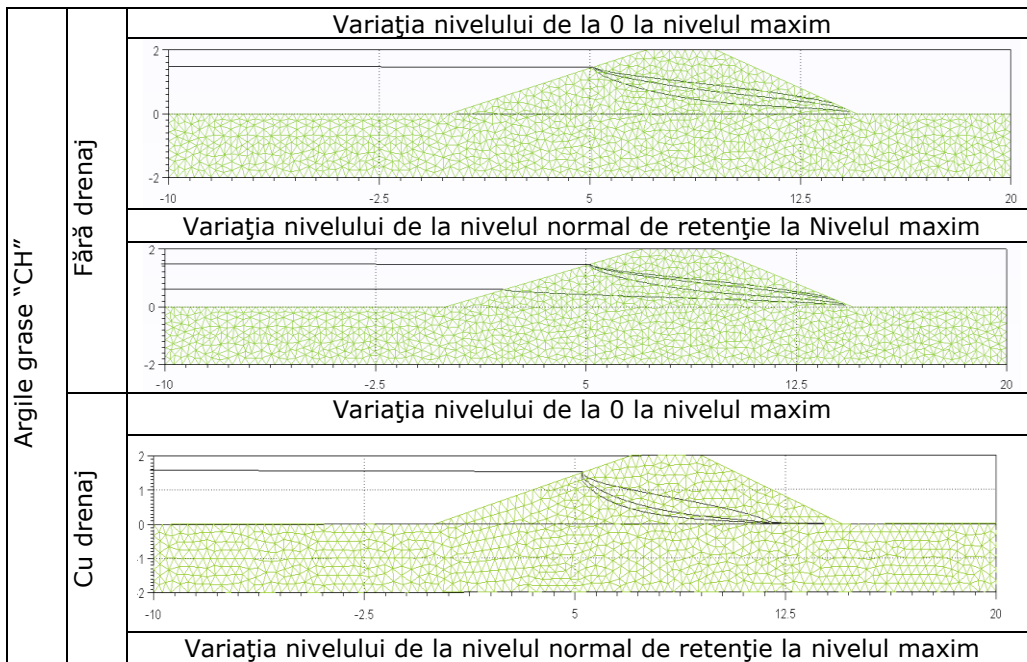
În cele ce urmează rezultatele obținute sunt prezentate grafic, fiecare figură cuprinde următoarele curbe de infiltrații:  $t_0=0$  ore, la  $t_1$ , la  $t_2$  și la nivelul obținut pentru mișcarea permanentă.

Rezultatele obținute au fost grupate pe clase de înălțimi în soluție drenată sau nedrenată.

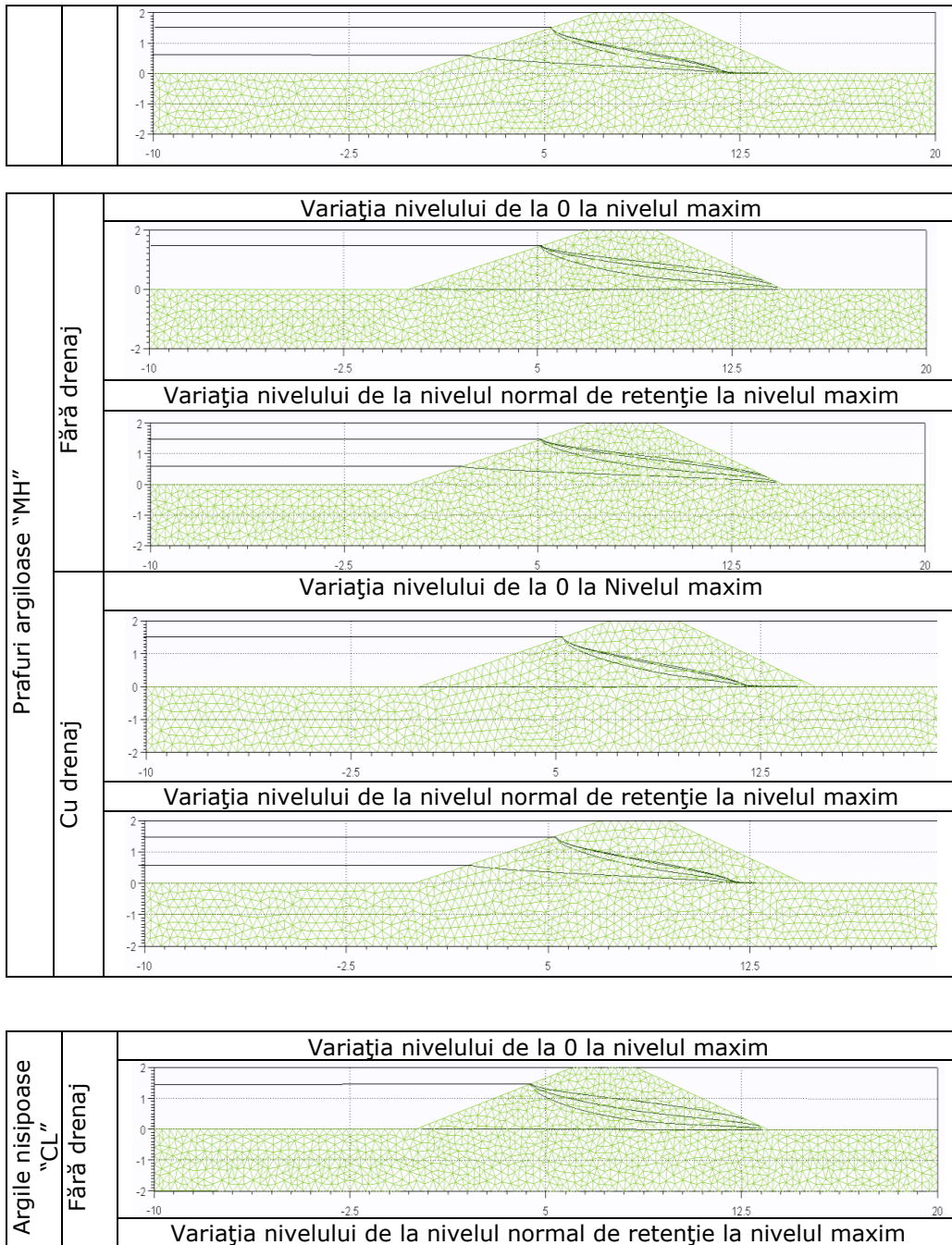
### 5.2.1. Evoluția curbei de infiltrații în timp pentru barajele omogene din pământ cu înălțimea de 2 m

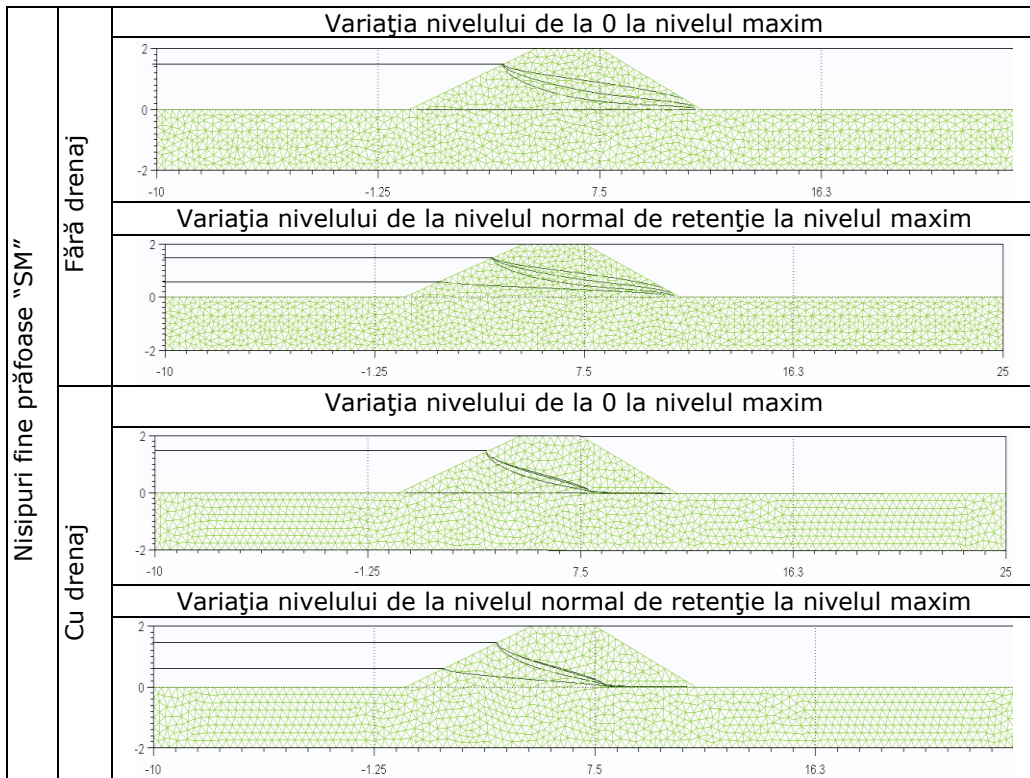
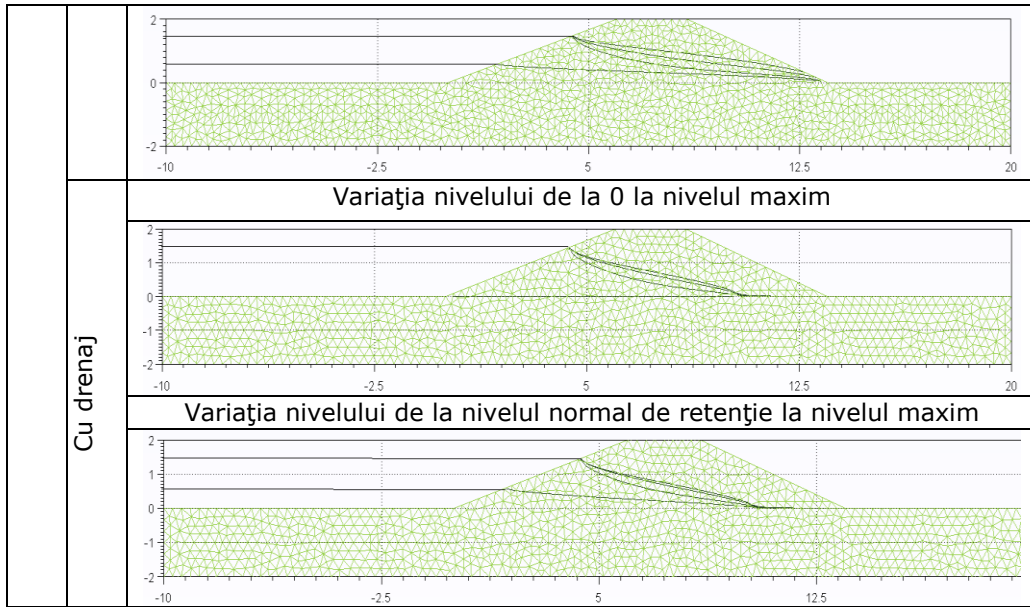
Folosind modelele prezentate în capitolul anterior (în care variația nivelului apei în lac s-a produs linear), și cu modificarea timpului  $\Delta t=3600s$  calculele efectuate la baraje de 2 m înălțime în două condiții de exploatare: baraj cu acumulare nepermanentă și preluarea undei de viitură în condițiile inițiale cu lac gol, și în ipoteza barajului permanentizat și preluarea viiturii în condițiile nivelului apei în lac la momentul inițial la o treime din înălțimea barajului.

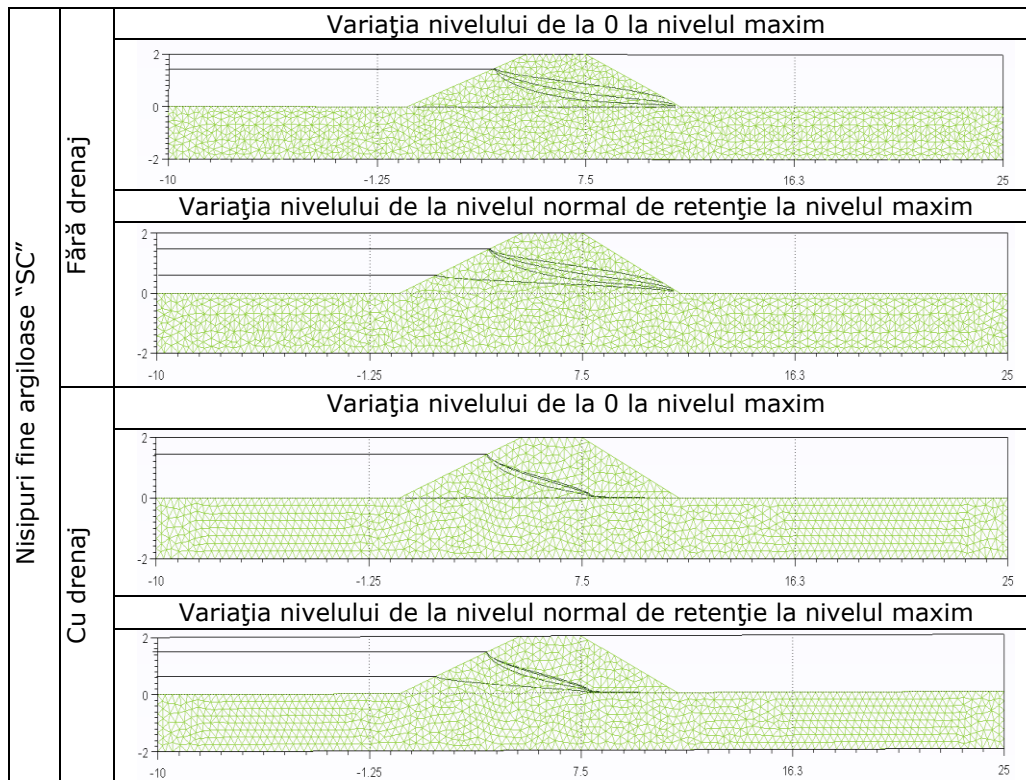
Tabel 5.33 Evoluția curbei de infiltrații în timp la baraje de 2m









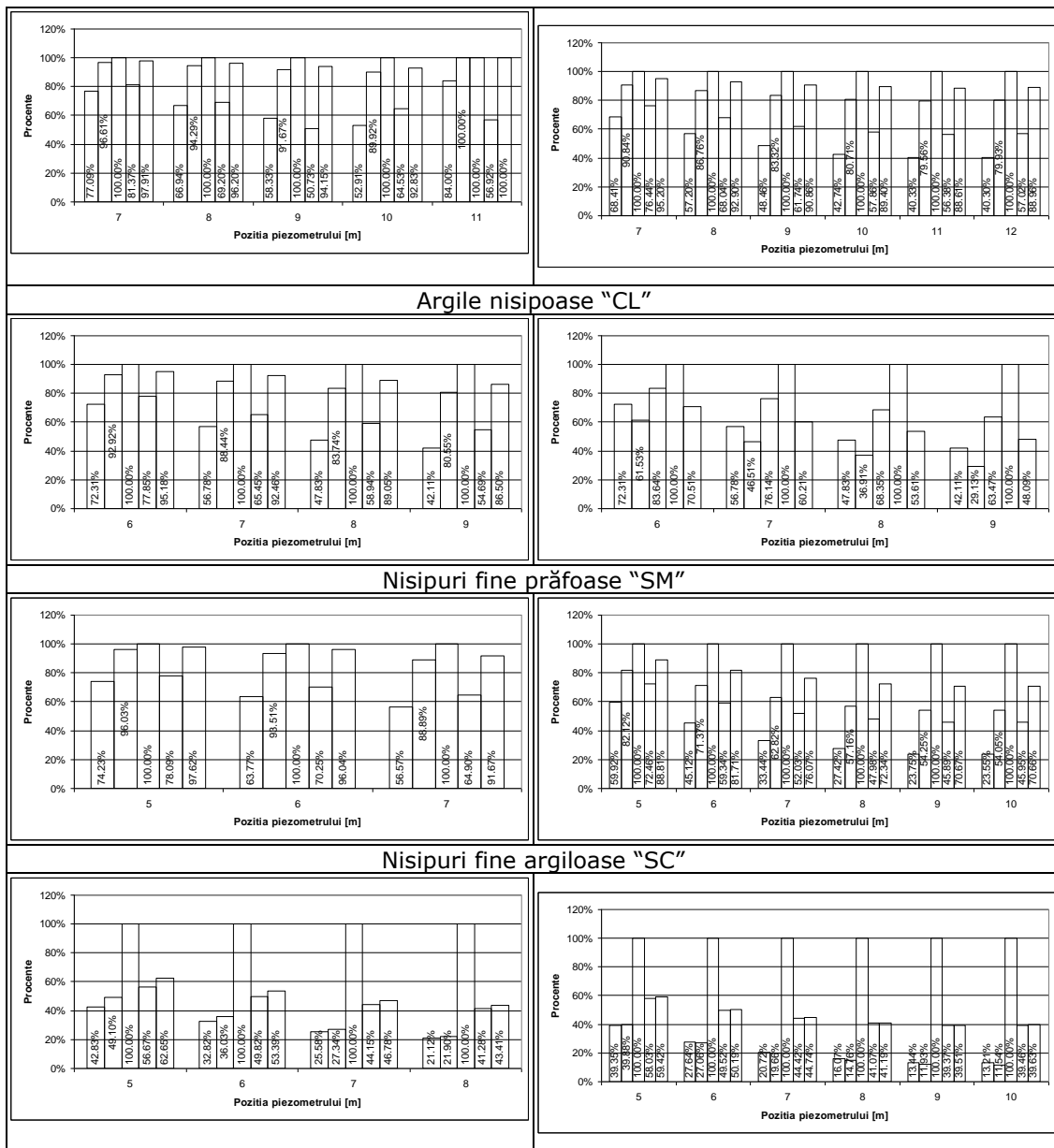


Pentru o comparare a rezultatelor s-a optat pe o raportare la nivelul apei de infiltrații în corpul barajului la niveluri atinse în condițiile unei mișcări cvasipermanente.

Primele două coloane indică procentul pe care îl reprezintă nivelul apei în piezometre în timp (la  $t_1=6$ ore și  $t_2=7$ zile) pentru baraje cu acumulări nepermanente în raport cu nivelul maxim pe care poate sa-l atingă în condițiile permanentizării mișcării; iar următoarele două sunt pentru barajele cu acumulări permanente.

Tabel 5.34 Comparații procentuale în timp raportate la infiltrațiile permanente la baraje de 2 m

Argile grase "CH"	
cu saltea drenanta	fără saltea drenanta
<p>44.42% 83.33% 100.00% 79.58% 87.21% 46.88% 58.77% 100.00% 70.87% 85.12% 32.16% 41.81% 100.00% 83.88% 82.88% 20.06% 36.43% 100.00% 89.68% 81.28%</p>	<p>65.53% 88.88% 100.00% 74.52% 83.88% 83.55% 83.40% 100.00% 65.74% 80.18% 44.42% 79.88% 100.00% 88.52% 88.52% 38.57% 76.07% 100.00% 85.24% 88.67% 35.88% 74.68% 100.00% 83.77% 85.67%</p>
Prafuri argiloase "MH"	



Rezultatele parțiale obținute au fost puse deja în valoare în subcapitolele anterioare, unde s-a arătat că nu există diferențe esențiale dacă variația nivelului este aplicată liniar sau brusc.

După o săptămână în poziția zonei saturate atinge un procent cuprins între 87% și 97% din valoarea maximă posibilă în condițiile în care barajul are acumulare nepermanentă și este dotat cu saltea de drenaj.



Dacă acumularea este permanentă și viitura surprinde nivelul apei în lac stabilizat la niveluri normale de retenție atunci procentele obținute după o săptămână de niveluri maxime a apei în lac ating valori de 90-98% din nivelul maxim ce poate fi obținut. Valoarea crește odată cu distanța la care este situat piezometrul față de apa din lac.

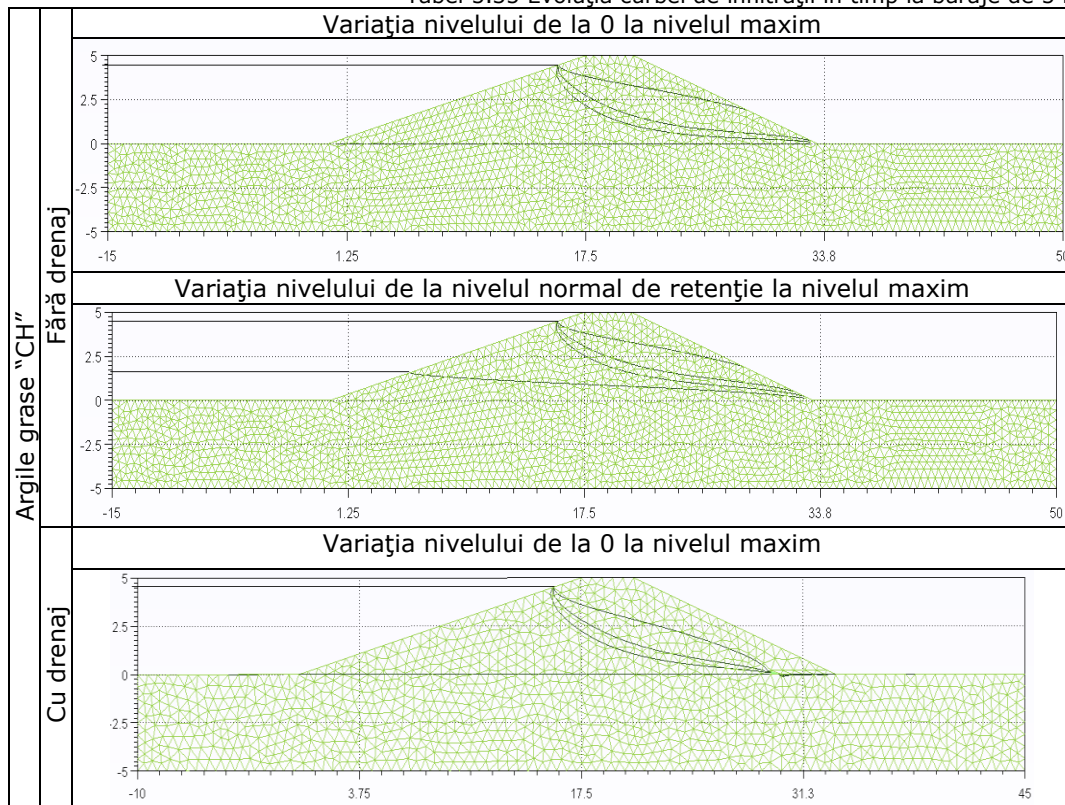
În cazul barajelor fără saltea drenantă, nivelul apei în piezometre comparativ cu nivelul maxim este mai redus și se situează la valori cuprinse între 52% și 90% în cazul barajelor cu acumulare nepermanentă și între 70% și 95% la barajele cu acumulare permanentă.

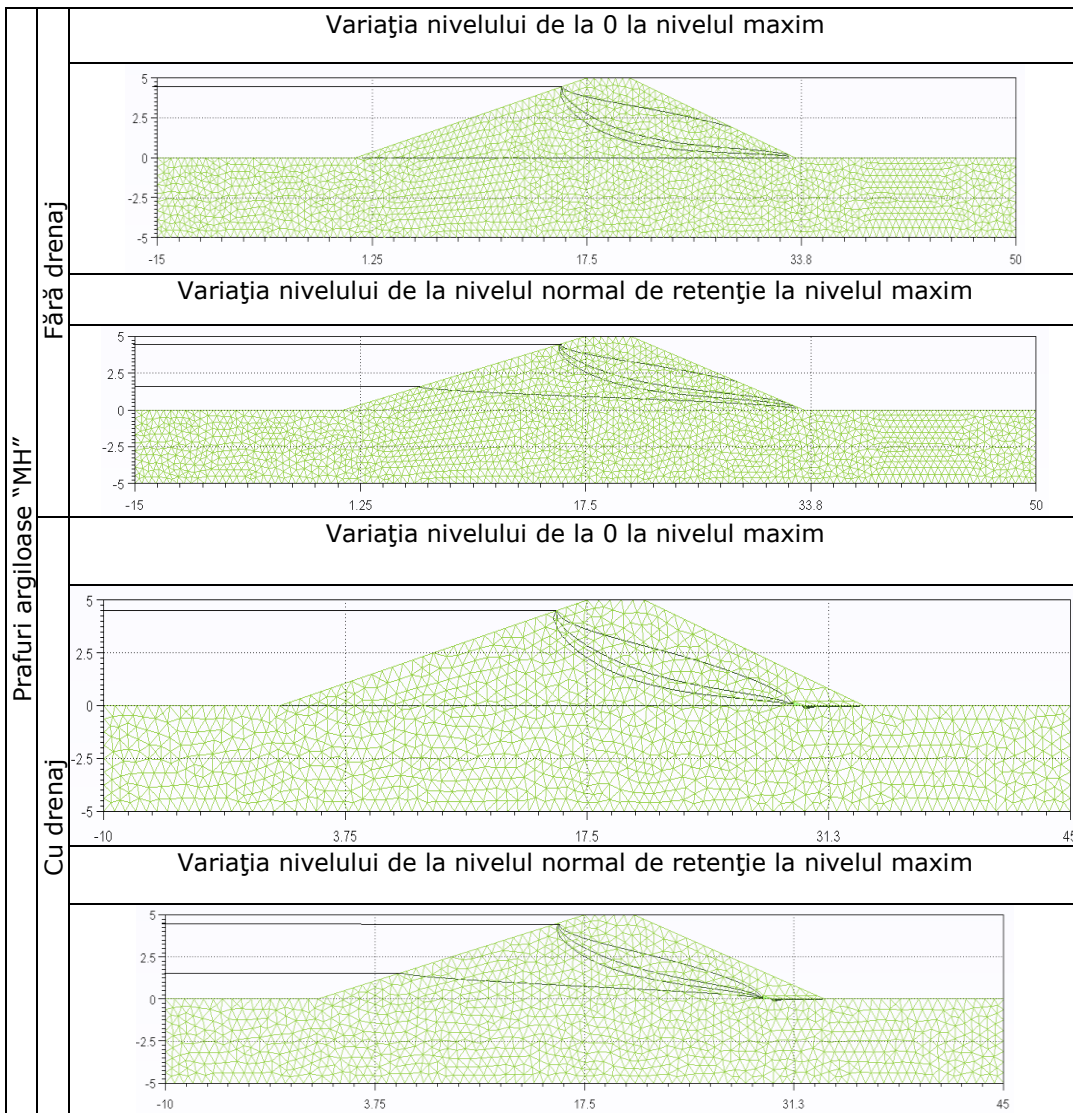
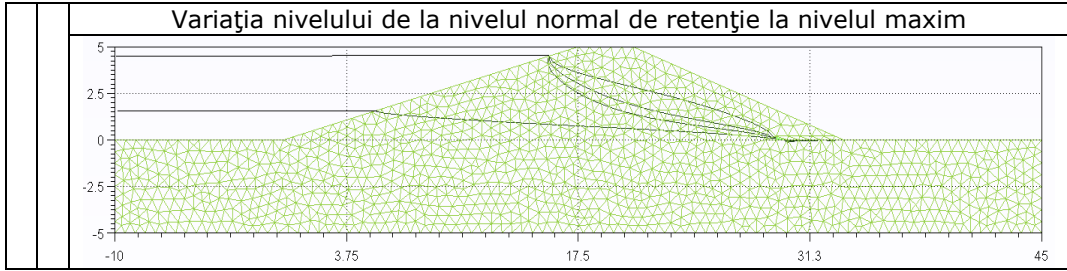
### 5.2.2. Evoluția curbei de infiltrații în timp pentru barajele omogene din pământ cu înălțimea de 5 m

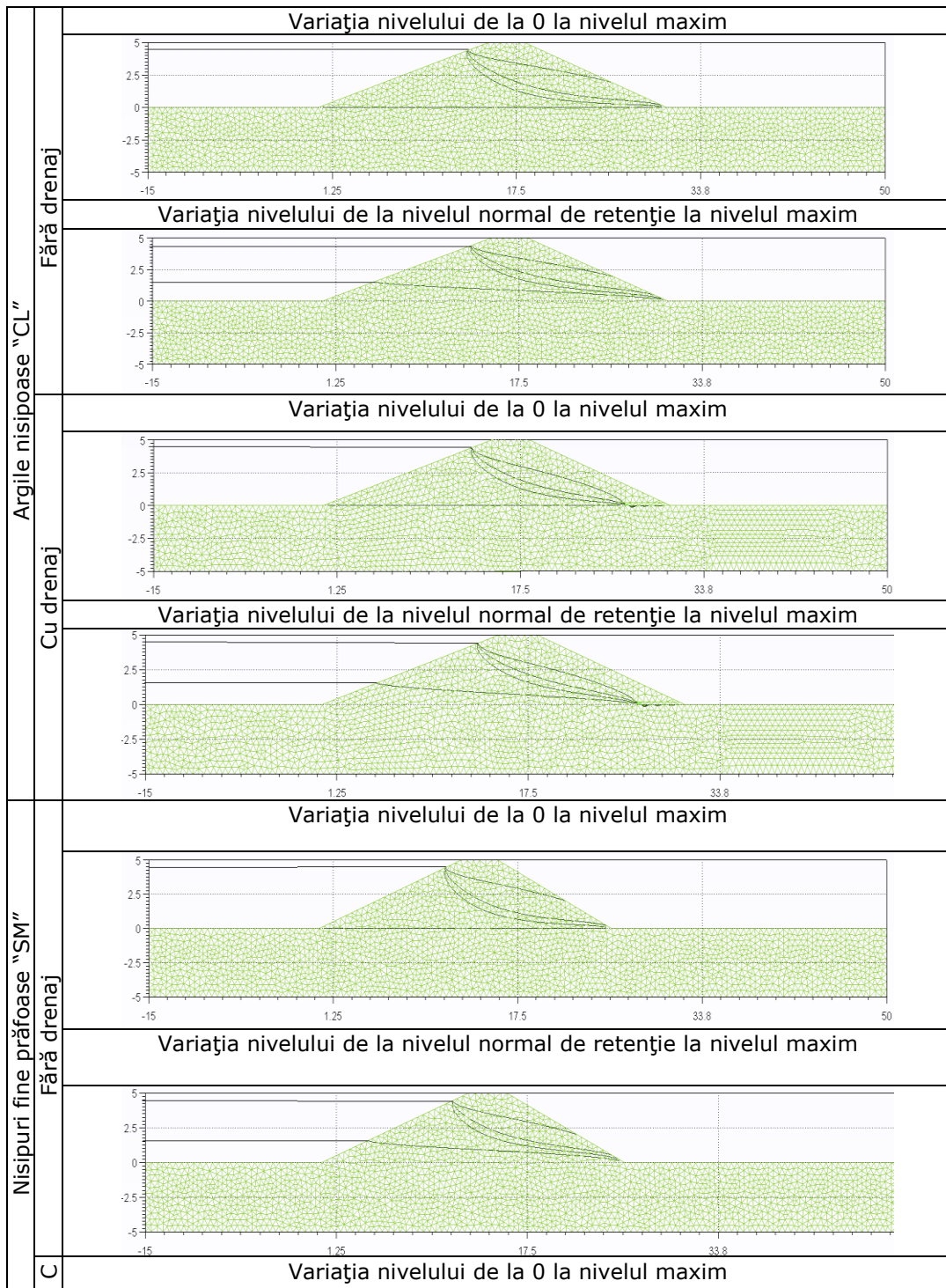
Calculule efectuate la baraje de 5 m înălțime au fost făcute în două ipoteze de exploatare: baraj cu acumulare nepermanentă și preluarea undei de viitura în condițiile inițiale cu lac gol, respectiv în ipoteza barajului permanentizat și preluarea viiturii în condițiile nivelului apei în lac la momentul inițial la o treime din înălțimea barajului. Valoarea pasului de calcul a fost fixat și în acest caz la 1 ora.

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 5.35 pentru toate clasele principale de pământuri studiate în aceasta lucrare.

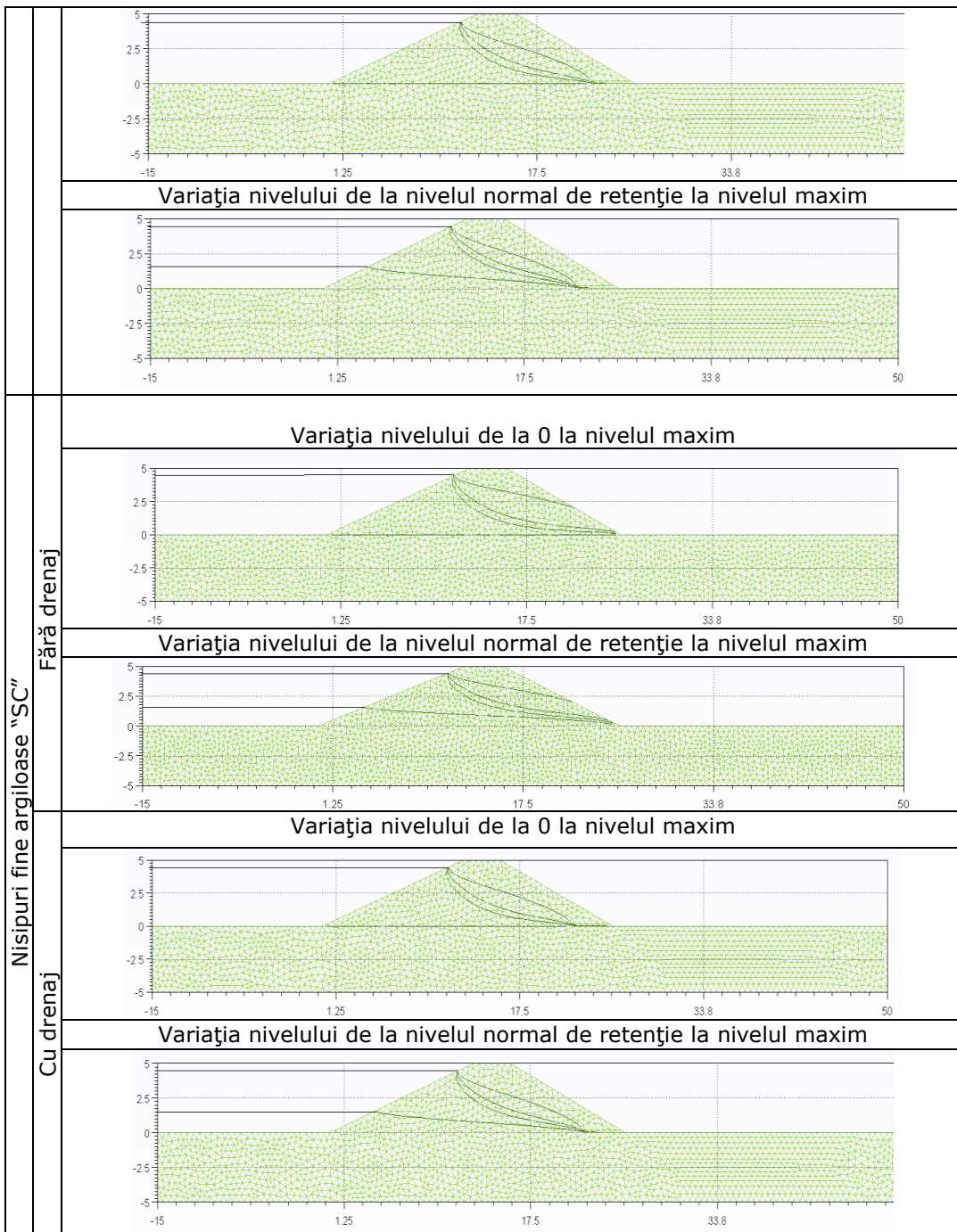
Tabel 5.35 Evoluția curbei de infiltrații în timp la baraje de 5 m









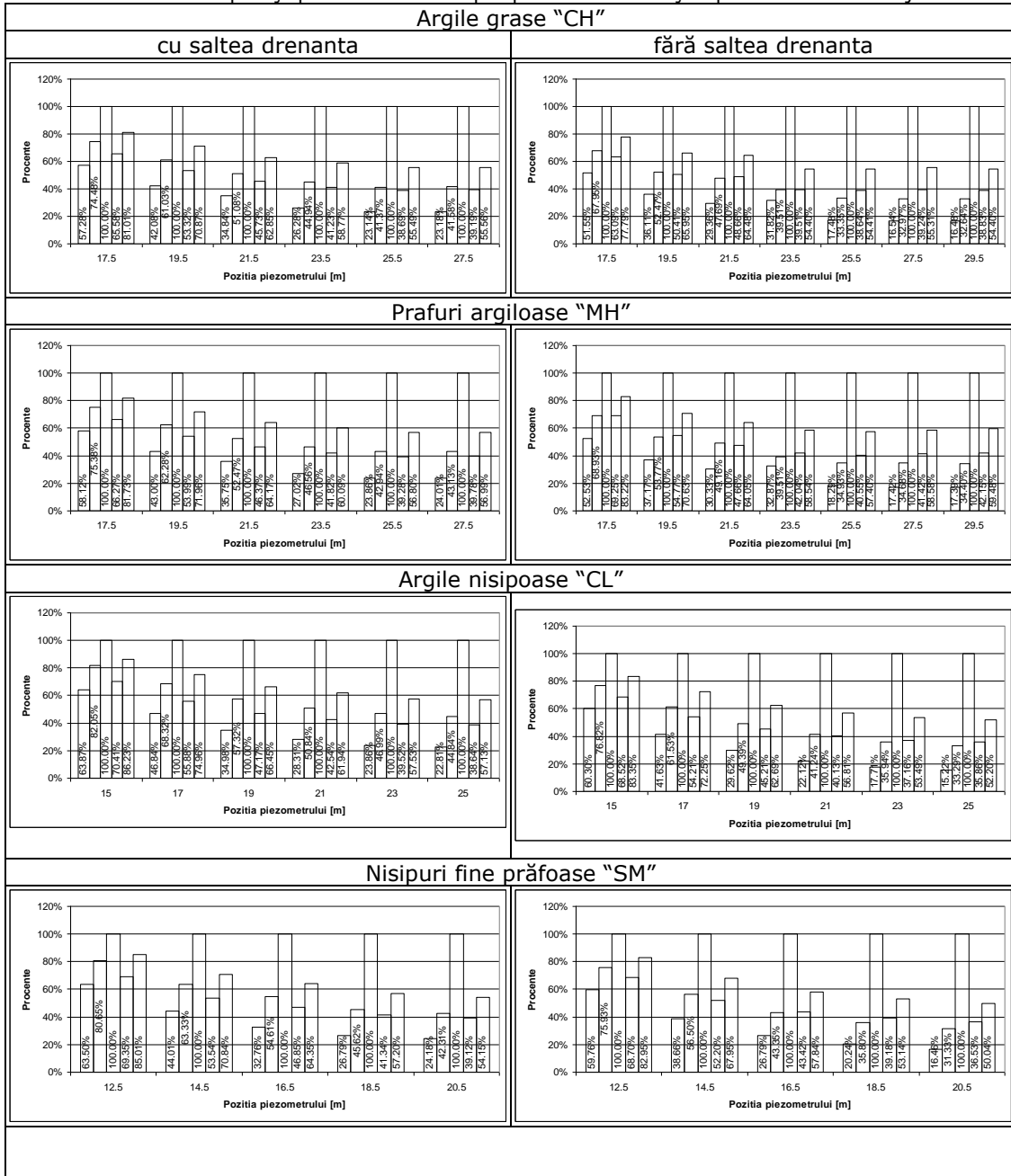


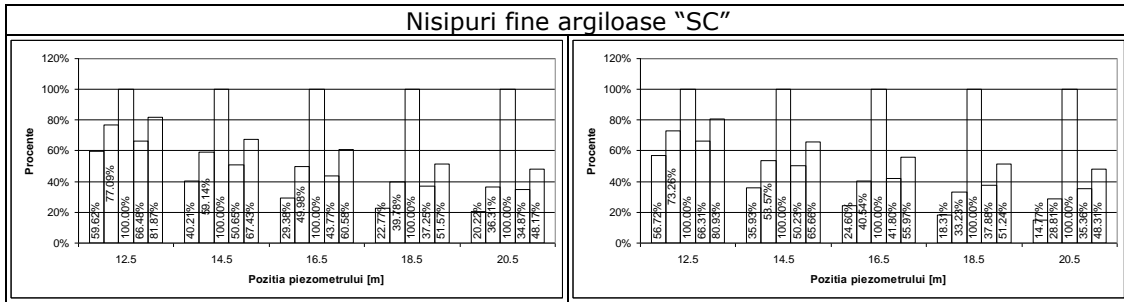
Primele două coloane indică procentul pe care îl reprezintă nivelul apei în piezometre (situate la distanța reprezentată pe ordonată și măsurată față de piciorul



amonte al barajelor) în timp (la  $t_1=12$ ore și  $t_2=14$ zile) pentru baraje cu acumulări nepermanente în raport cu nivelul maxim pe care poate sa-l atingă în condițiile permanentizării mișcării; iar următoarele două sunt pentru barajele cu acumulări permanente.

Tabel 5.36 Comparații procentuale în timp raportate la infiltrațiile permanente la baraje de 5 m



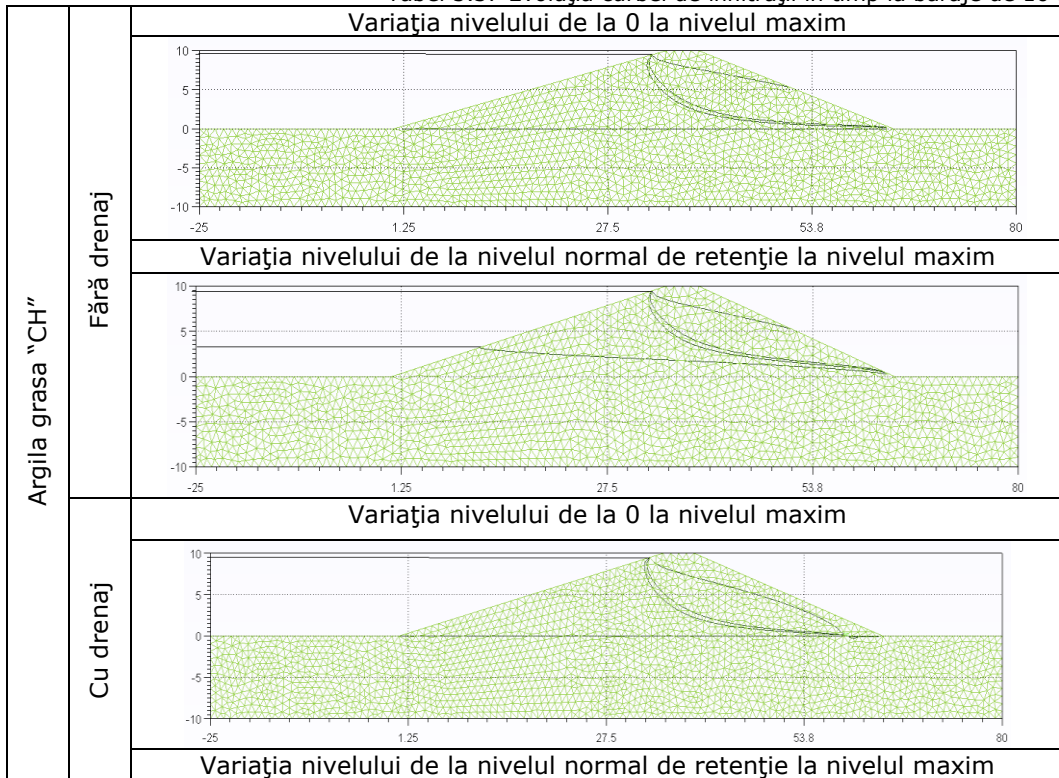


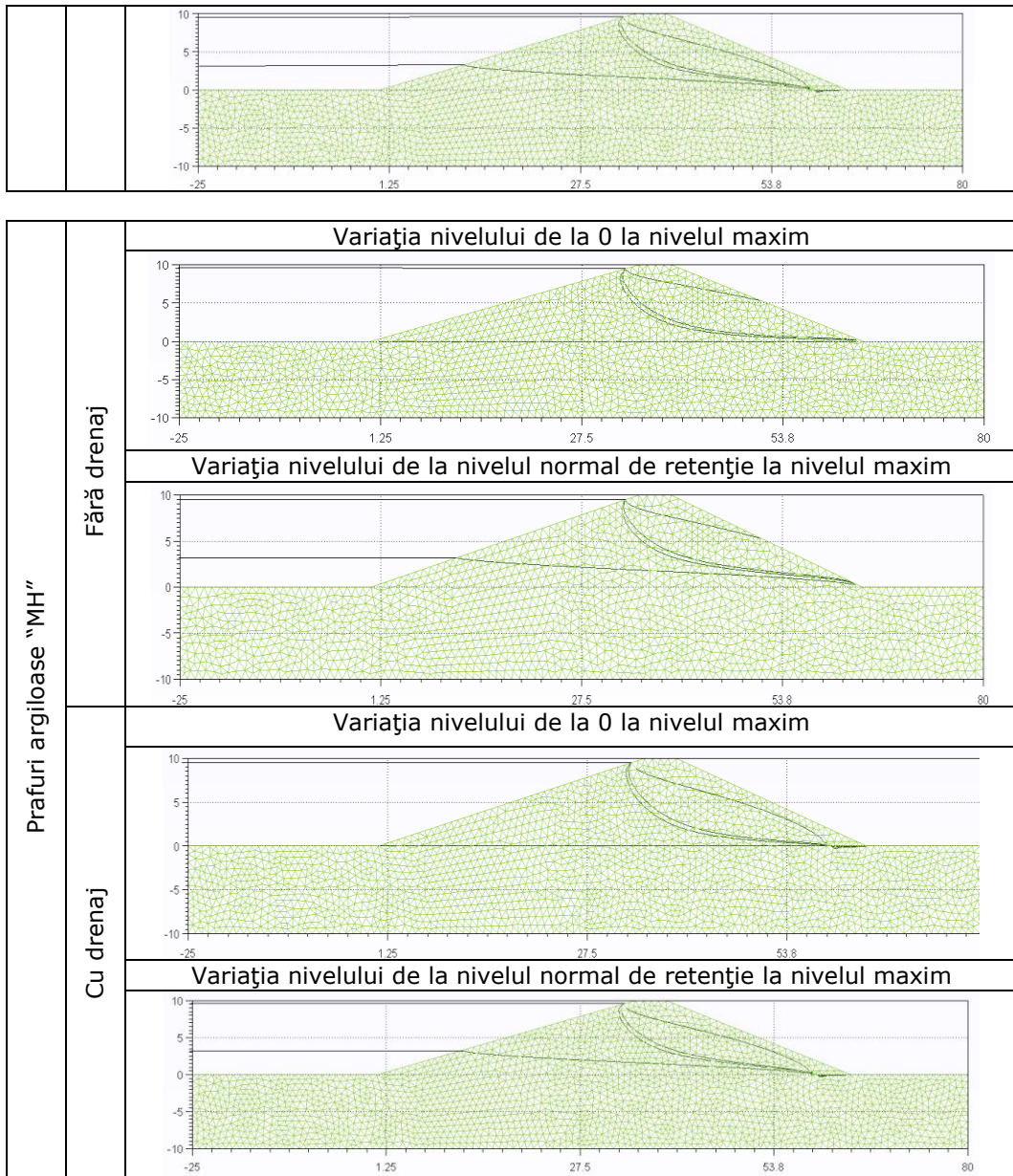
În acest caz influența mișcării nepermanente în medii nesaturate își face simțită prezența indiferent de ipoteza de calcul sau de soluția constructivă folosită. Procentele maxime obținute sunt situate sub 85% în toate cazurile studiate și se obțin pentru cel mai apropiat piezometru de lac.

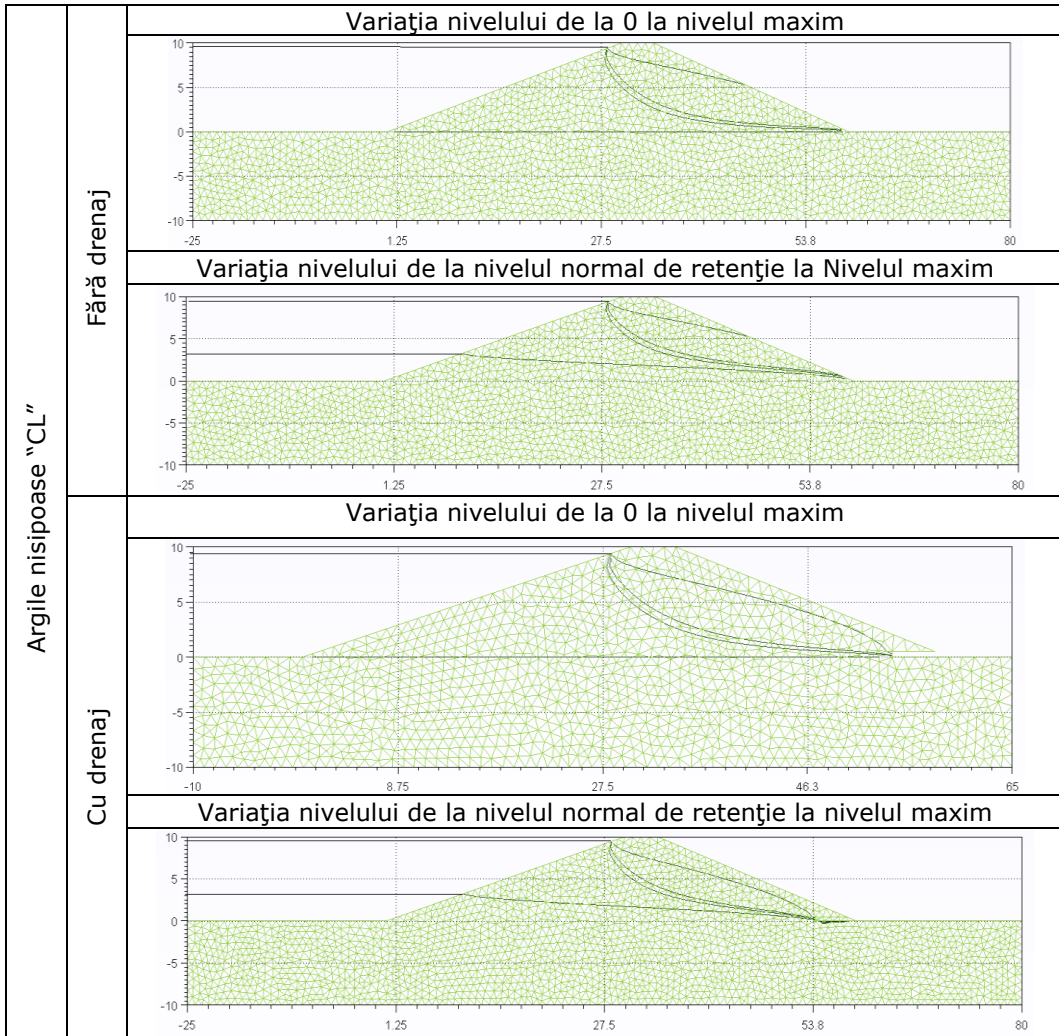
În câmp, în corpul barajului acest procent scade în intervalul 65-40%, influența drenului nu mai influențează atât de mult rezultatele ca și în cazul barajelor de 2m.

### 5.2.3. Evoluția curbei de infiltrații în timp pentru barajele omogene din pământ cu înălțimea de 10 m

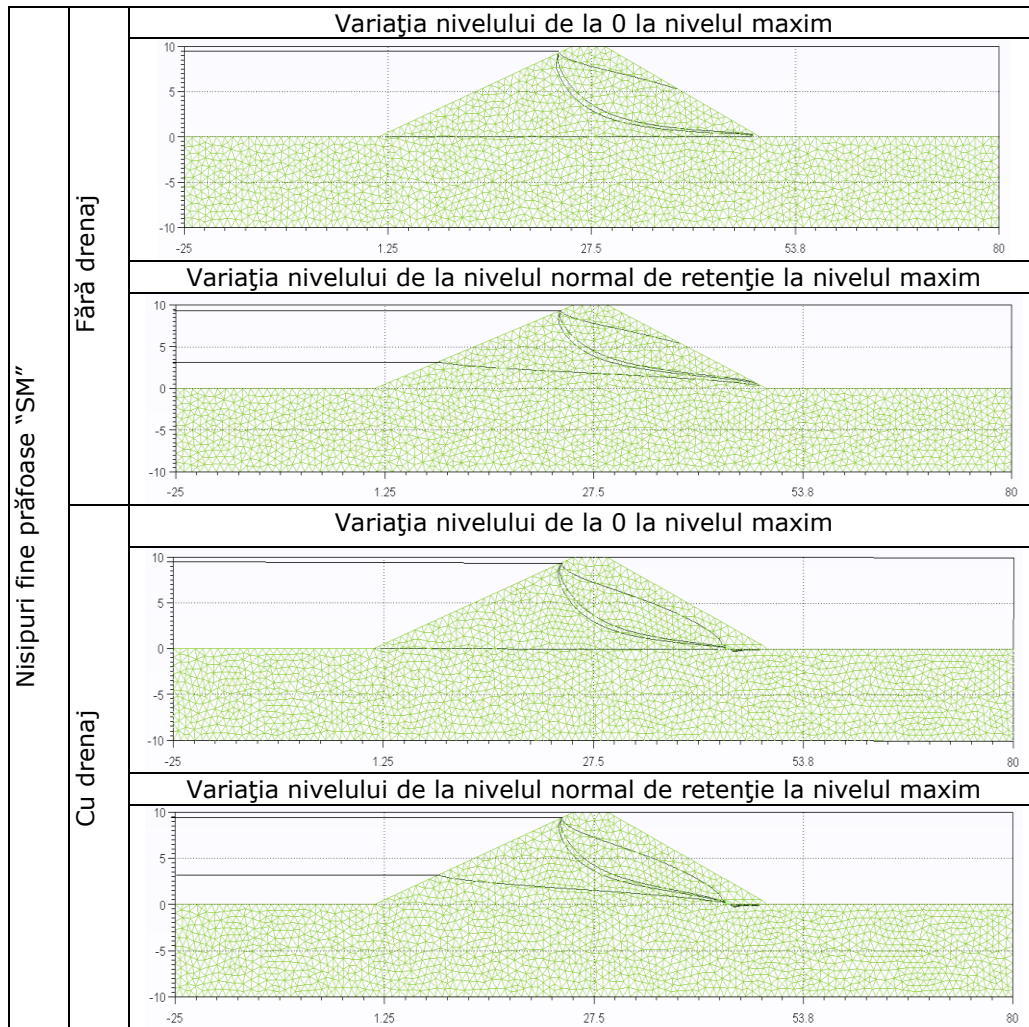
Tabel 5.37 Evoluția curbei de infiltrații în timp la baraje de 10 m

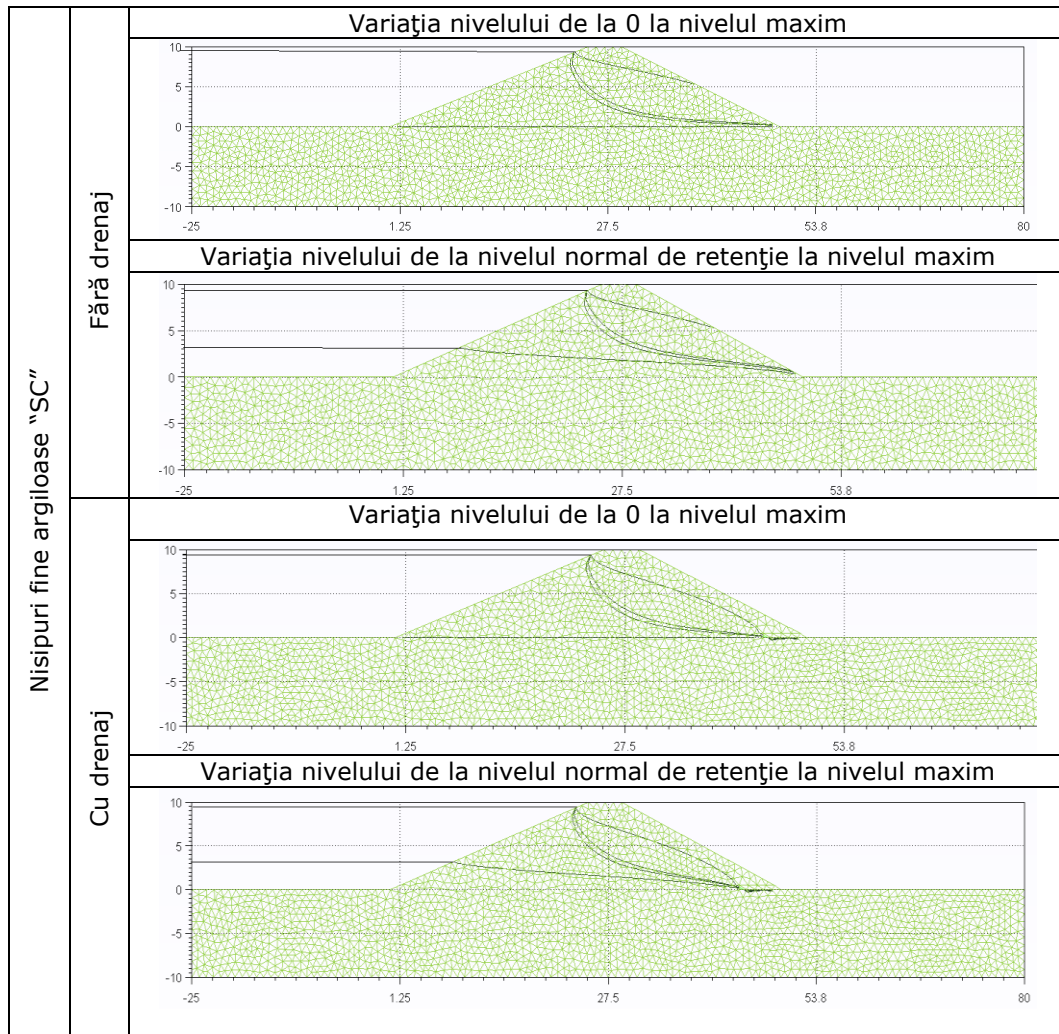








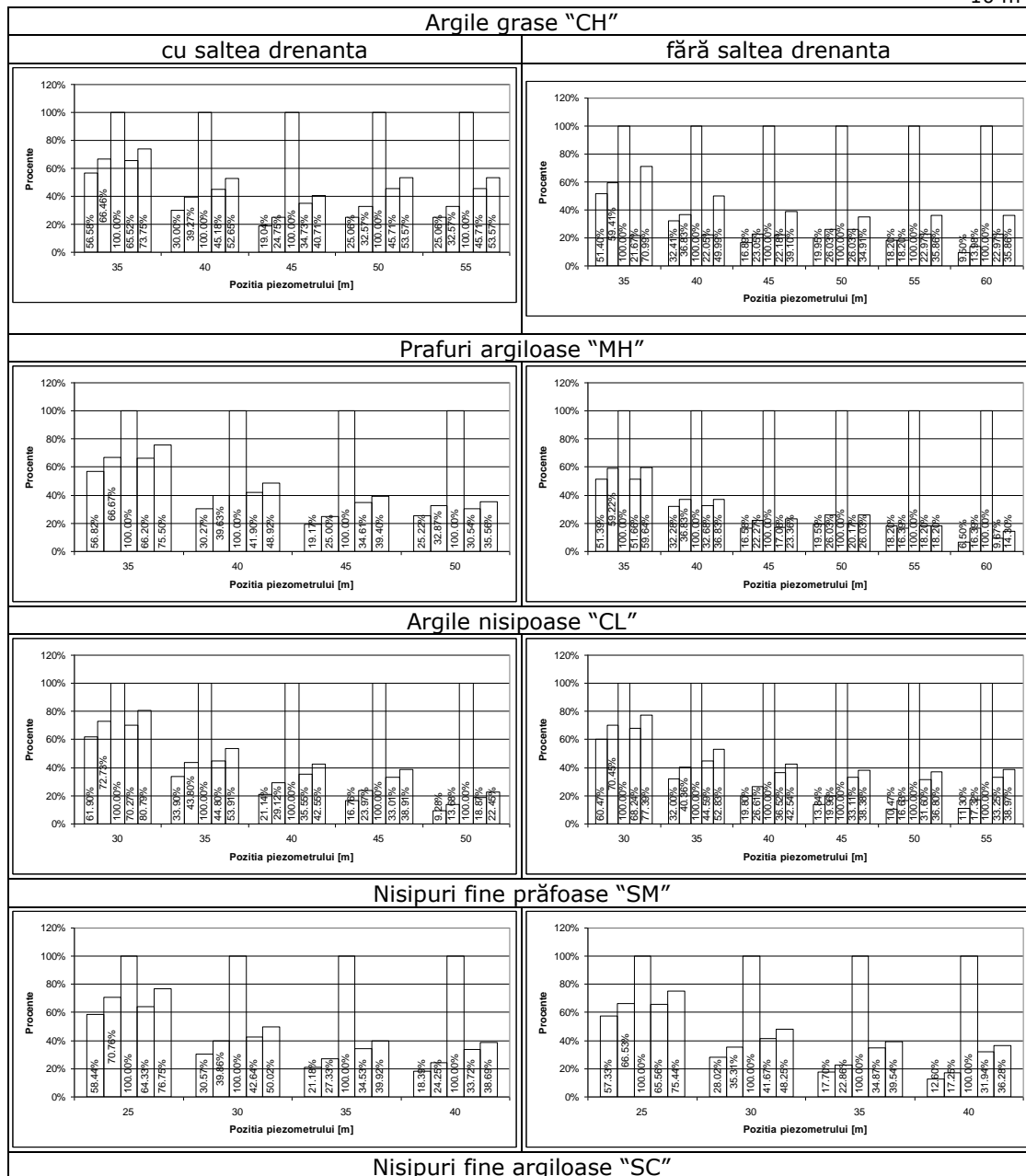


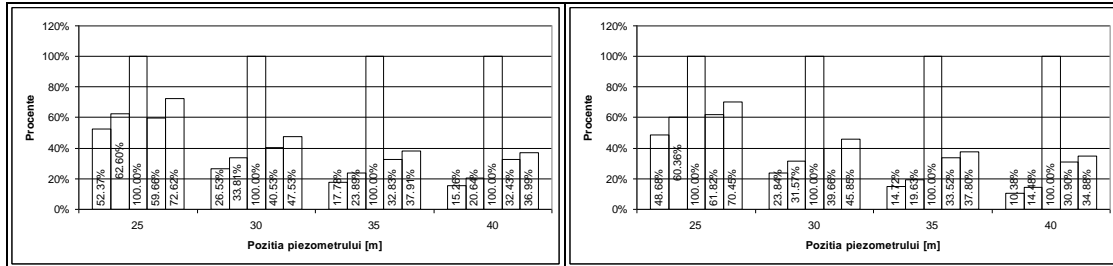


Prima coloană este reprezentată valoarea nivelului în cazul unei exploatare nepermanente după menținerea nivelului apei la valoarea maximă timp de 24 ore, a doua coloană pentru baraje cu acumulări nepermanente ce au menținut nivel apei în lac la valoarea maximă timp de 14 zile. Colanele 4 și 5 reprezintă raportul dintre valoarea obținută în piezometre la infiltrațiile nepermanente (în condițiile unei viituri preluate de un baraj cu acumulare permanentă) și valoarea maximă în cazul mișcării permanente după 24 ore respectiv 2 săptămâni.

Tabel 5.38 Comparații procentuale în timp raportate la infiltrațiile permanente la baraje de

10 m





Pentru barajele cu înălțime de 10 m nivelul apei din piezometre după 14 zile de la începutul viiturii atinge valori sub 70% pentru cele apropiate de piciorul amonte, nivelul apei spre piciorul aval reprezentând mai puțin de 35% din nivelul maxim ce poate fi atins în piezometrele respective.



## 6. VERIFICAREA STABILITĂȚII TALUZELOR LA BARAJE OMOGENE DIN PĂMÂNT

Analiza stabilității taluzelor unui baraj din pământ poate să fie făcută în două moduri: folosind metoda echilibrului limită sau folosind metoda de estimare a deformațiilor. Având în vedere rezultatele obținute și prezentate în capitolul anterior cu privire la mișcarea apei de infiltrații în diferite ipoteze, în acest capitol dorim să vedem modul în care ele influențează stabilitatea taluzelor. În cele ce urmează o să prezint pe scurt principalele metode de estimare a factorului de siguranță pentru taluzele barajelor omogene din pământ.

### 6.1. Metode de analiză bazate pe echilibru limită

Metodele de analiză a stabilității taluzelor bazate pe echilibrul limită admit existența unei suprafețe de alunecare cunoscute și se presupune că pe toată suprafața de alunecare factorul de stabilitate este constant ( $F_s=1$ ).

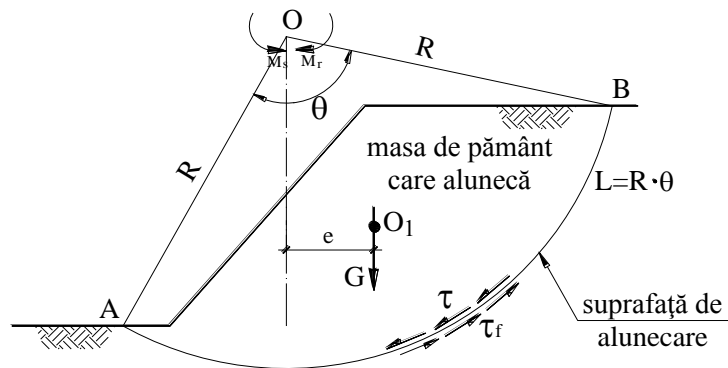
Metodele clasice sau tradiționale bazate pe echilibrul limită, constau în alegerea unei suprafețe potențiale de alunecare și verificarea echilibrului pe acestea. În urma analizei, suprafața posibilă de alunecare este aceea în care factorul de siguranță este subunitar sau are valoarea cea mai mică.

Metodele bazate pe echilibrul sunt de două feluri: metodele simple satisfac echilibrul de momente sau de forțe, dar nu în același timp; și metode riguroase care satisfac atât echilibrul de momente cât și cel de forțe. [74]

În metodele care consideră echilibrul limită, factorul de siguranță se poate calcula numai dacă se cunoaște suprafața de alunecare, motiv pentru care trebuie analizate mai multe suprafețe de alunecare.

Una din metodele cele mai simple este metoda ce poartă și denumirea de analiza  $\varphi_u = 0$ , în care se analizează stabilitatea unui taluz imediat după realizarea umpluturilor în corpul barajului. Aceasta presupune că taluzul este alcătuit dintr-un pământ saturat, cu o anumită presiune a apei din pori, datorată operațiilor de compactare mecanică.

Să considerăm schema din Figura 6.1. În care masa de teren instabilă este delimitată de arcul AB cu raza R. Fie G - greutatea volumului de teren,  $O_1$  poziția centrului său de greutate. Se consideră  $\varphi_u = 0$ , iar componenta rezistenței la forfecare datorită coeziunii este notată cu  $c_u$ .

Figura 6.1 Analiza în eforturi totale  $\varphi_u = 0$  [74]

Scriind momentele de stabilitate și de răsturnare față de centrul de rotație O, rezultă factorul de stabilitate:

$$F_s = \frac{M_s}{M_r} = \frac{c_u \cdot r^2 \cdot \theta}{G \cdot e} \quad (6.1)$$

Poziția centrului de greutate  $O_1$  nu este necesară, fiind suficient să se determine numai verticala forței G. Acest lucru poate fi obținut împărțind sectorul într-un grup de fâșii verticale și făcând calculul momentelor acestor fâșii față de o axă verticală convenabilă.

Majoritatea metodelor de calcul a stabilității se bazează pe împărțirea masei de pământ în fâșii care pot fi: verticale, orizontale sau înclinate.

Prima metodă bazată pe împărțirea masei de pământ în fâșii (Fellenius, 1927) [34] este bazată mai mult pe intuiția inginerescă decât pe principiile mecanicii. Aceste metode s-au dezvoltat mult în anii 1950 și 1960 de către: Bishop (1955) [8], Janbu (1956), Morgenstern și Price (1965) și Spencer (1967) [90].

Toate metodele au la bază următoarele ipotezele:

- masa de pământ alunecătoare (situată deasupra suprafeței de alunecare presupusă) este împărțită într-un număr finit de fâșii, de obicei verticale, dar se utilizează și împărțirea în fâșii orizontale sau înclinate;
- rezistența la forfecare a pământului este constantă pe întreaga suprafață de alunecare, ceea ce conduce la valoarea unui factor de stabilitate ( $F_s$ ) constant pe toată lungimea suprafeței de alunecare;
- problema fiind static nedeterminată, se fac diferite presupuneri în vederea calculului forțelor de legătură dintre fâșii, pentru a reduce problema la una static determinată;
- factorul de stabilitate este un raport dintre forțe sau momente.

Rezistența la forfecare mobilizată pe întreaga suprafață de forfecare se poate defini astfel:

$$\tau_m = \frac{\tau_f}{F_s} \quad (6.2)$$

unde:  $F_s$  - este factorul de stabilitate (calculat ca raport de sume de momente sau sume de forțe),  
 $\tau_f$  - este rezistența la forfecare a pământului exprimată de relația:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi' + c', \text{ în care:}$$

$\sigma'$  - este efortul unitar normal efectiv,

$\varphi'$  - unghiul de frecare interioară efectiv al pământului,

$c'$  - este coeziunea efectivă a pământului.

Diferența dintre aceste metode de analiză bazate pe împărțirea masei alunecătoare în fâșii este dată de forțele care se consideră că acționează pe frontierele dintre fâșii.

## 6.2. Metode care consideră suprafețe circulare de alunecare

În Figura 6.2 se poate observă o formulare generală a metodelor de analiză a stabilității bazate pe echilibrul limită și împărțirea masei alunecătoare în fâșii utilizând următoarele ipoteze:

- masa alunecătoare este considerată un corp rigid;
- forțele normale de la baza fâșiilor acționează în mijlocul acestora;
- criteriul de rupere utilizat este criteriul Mohr-Coulomb.

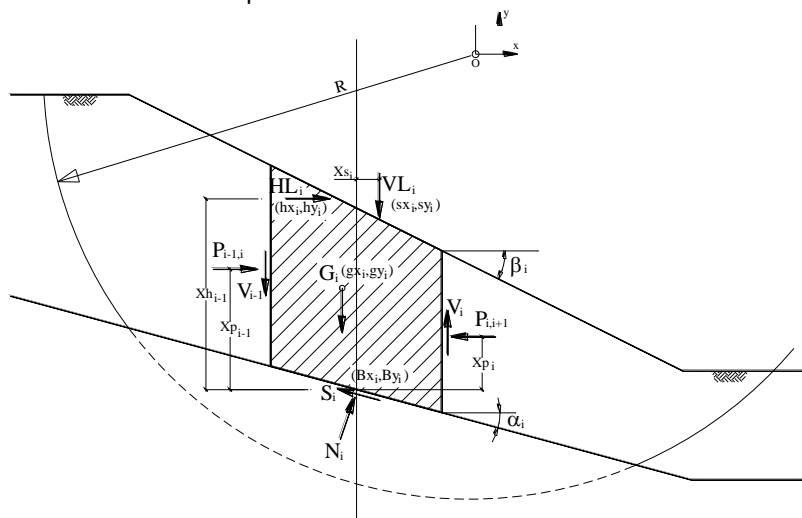


Figura 6.2 Forțele care acționează pe o fâșie a unui taluz[74]

În care:

$\alpha$  - unghiul făcut de baza fâșiei cu orizontala;

$\beta$  - unghiul înclinării versantului (taluzului);

$G_i$  - greutatea fâșiei  $i$ ;

$P_i, P_{i-1}$  - componentele orizontale ale forțelor dintre fâșii (forțe normale);

$V_i, V_{i-1}$  - componentele verticale ale forțelor dintre fâșii (forțe de frecare);

$N_i$  - componenta normală pe baza fâșiei a greutateii;

$S_i$  - rezistența la forfecare pe baza fâșiei;

$l_i$  - lățimea bazei fâșiei.

În această situație se pot scrie două ecuații de echilibru pentru forțe, pe verticală și pe orizontală:

$$N_i \sin \alpha_i - S_i \cos \alpha_i + HL_i = P_{i,i+1} - P_{i-1,i} \quad (6.3)$$

$$G_i + VL_i - N_i \cos \alpha_i - S_i \sin \alpha_i = P_{i,i+1} \tan \varphi_{i,i+1} - P_{i-1,i} \tan \varphi_{i-1,i} \quad (6.4)$$

Unde,  $S_i$  reprezintă rezistența la forfecare disponibilă a terenului aplicând criteriul de cedare Mohr-Coulomb, la baza fâșiei  $i$ .

$$S_i = \frac{N_i \tan \varphi_i + c_i l_i}{F_s} \quad (6.5)$$

În Tabelul 6.1 se prezintă diferitele metode de analiză cu ipotezele simplificatoare aferente, pornind de la problema generală a stabilității și verificând echilibrul forțelor și al momentelor.

Tabel 6.1 Ipotezele simplificatoare pentru diferite metode de analiză [74]

Metoda	Ipoteze	Echilibrul de forțe		Echilibrul de momente
		Orizontala	verticală	
1. Suedeza (Fellenius)	$P=V=0$	X	X	✓
2. Bishop simplificat	$V=0$ sau $\Phi=0$	X	X	✓
3. Janbu simplificat	$V=0$ sau $\Phi=0$	✓	✓	X
5. Spencer	$\varphi = \text{constant}$	✓	✓	✓
6. Morgenstern-Price	$\varphi = \lambda f(x)$	✓	✓	✓

### 6.2.1. Metoda Fellenius

Plecând de la formularea generală a metodei bazată pe echilibrul limită a fost dezvoltată metoda Fellenius ce mai este cunoscută și sub denumirea de metoda momentelor sau metoda fâșiilor.

La elaborarea inițială a acestei metode de calcul, care este prima metodă teoretică cunoscută în literatura de specialitate, au contribuit inginerii suedezi Petterson K. E. și Hultin S. Metoda a fost elaborată în Suedia, unde alunecările de teren și taluzuri care s-au produs în primele decenii ale secolului XX au forțat

progresul științei. Metoda suedeză a fost elaborată în 1916 cu ocazia studierii unei alunecări din portul Goteborg.

Metoda suedeză a fost elaborată pentru roci argiloase omogene, nestratificate, deși în prezent unii autori o folosesc și pentru formațiuni stratificate, eterogene din punct de vedere litologic.

În metoda suedeză, suprafața de alunecare are o formă cilindrică-circulară, un arc de cerc pentru cazurile mai simple. Modul de aplicare practică a acestei metode este exemplificat pentru un taluz (Figura 6.3), cu înălțimea  $h$  și panta exprimată prin unghiul  $\alpha$  sau sub forma (l:m)

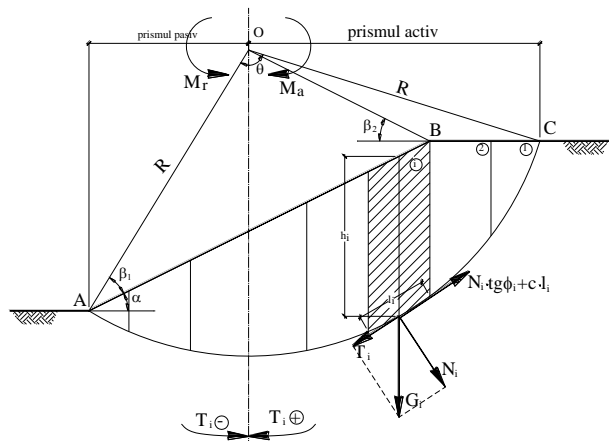


Figura 6.3 Schema de calcul în metoda Fellenius

Metoda suedeză are la bază în următoarele ipoteze:

- alunecarea se produce după o suprafață de formă circular-cilindrică;
- forțele luate în considerare sunt greutatea masivului de pământ care alunecă și rezistența la forfecare a pământului exprimată cu ajutorul unghiului de frecare interioară și coeziunii.

Plecând de la formularea generală a metodei generale bazate pe echilibrul limită a fost dezvoltată și metoda suedeză.

Pentru determinarea poziției centrului cercurilor posibile de alunecare se poate folosi construcția grafică din Figura 6.4. Dreptele care delimitează unghiurile  $\beta_1$  și  $\beta_2$ , se intersectează în punctul O, care reprezintă centrul suprafeței de alunecare. Cu raza  $R=OA$  se duce arcul de cerc AC, care reprezintă suprafața de alunecare. După trasarea suprafeței de alunecare, se va trece la împărțirea prismelor în fâșii, lățimea unei fâșii fiind  $b \approx 0,1 \cdot R$ . În continuare se va calcula greutatea fiecărei fâșii. Astfel, greutatea fâșiei "i" este:

$$G_i = b_i \cdot h_i \cdot \gamma \quad (6.6)$$

în care:  $G_i$  - este greutatea fâșiei;

$b_i$  - este lățimea fâșiei;

$h_i$  - este înălțimea fâșiei, măsurată pe planul ei median;

$\gamma$  - este greutatea volumică a terenului.

La mijlocul arcului  $l_i$ , corespunzător fâșiei  $i$ , forța  $G_i$  se descompune în componentele sale: una normală  $N_i$ . Forțele  $N_i$  din toate fâșiile se opun alunecării prin forțele de rezistență pe care le generează (notate cu -), iar forțele  $T_i$  din prismul activ sunt forțe de alunecare (notate cu +). Cele două componente ale greutateii sunt exprimate astfel:

$$N_i = G_i \cdot \cos \theta_i \quad (6.7)$$

$$T_i = G_i \cdot \sin \theta_i \quad (6.8)$$

Factorul de siguranță al taluzului are expresia:

$$F_s = \frac{M_r}{M_a} \quad (6.9)$$

în care:  $M_r$  este momentul forțelor rezistente,

$M_a$  este momentul forțelor de alunecare.

Aceste momente se iau în raport cu centrul  $O$  al suprafeței de alunecare. Momentul forțelor de rezistență pentru toate fâșiile este:

$$M_r = (\tan \phi \sum N_i + c \sum l_i) R = (\tan \phi \sum N_i + cL) R \quad (6.10)$$

în care:  $L$  - este lungimea totală a suprafeței de alunecare.

Făcând suma algebrică a forțelor  $T_i$ , se ia momentul acestei sume în raport cu centrul  $O$ , care reprezintă momentul forțelor de alunecare:

$$M_a = R \cdot \sum \pm T_i \quad (6.11)$$

Expresia factorului de siguranță devine:

$$F_s = \frac{\tan \phi \sum G_i \cdot \cos \theta_i + cL}{\sum \pm G_i \cdot \sin \theta_i} \quad (6.12)$$

în care:  $G_i$  - este greutatea unei fâșii;

$N_i$  - este forța normală pe suprafața de alunecare;

$T_i$  - este forța tangențială la suprafața de alunecare;

$\theta_i$  - este unghiul dintre forțele  $N_i$  și direcția verticală;

$\phi$  - este unghiul de frecare interioară;

$c$  - este coeziunea pământului;

$R$  - este raza suprafeței de alunecare;

$L$  - este lungimea suprafeței de alunecare.

Pe cele două fețe laterale ale fâșiei, considerate pe direcția de alunecare, mai acționează încă două categorii de forțe: forțele  $X_i$ , care sunt forțe verticale de forfecare și forțele orizontale  $E_i$ . În echilibrul general al masei alunecătoare, forțele  $X_i$  au fost neglijate pentru că ele sunt foarte apropiate ca mărime și sunt de sens contrar.

În 1954, Bishop, considerând forțele  $X_i$  în analiza stabilității a constatat că acestea nu au o valoare practică, deoarece factorul de siguranță diferă de cel obținut prin metoda suedeză cu circa 1 %.

În 1926, W. Fellenius [34] a arătat că dacă forțele orizontale  $E_i$ , nu sunt considerate în metoda suedeză, nu se produce o eroare mai mare de 5 % a factorului de siguranță, iar Beichman în 1937, adoptând 13 ipoteze diferite asupra forțelor  $E_i$ , a dovedit că diferența maximă în factorul de siguranță este de 4 %.

Pentru că taluzul să nu alunece, factorul de siguranță calculat trebuie să fie supraunitar, adică  $Fs > 1$ . Pentru valori  $Fs \leq 1$  masivul își pierde stabilitatea naturală și are loc alunecarea taluzului examinat.[74]

Pentru baraje din pământ de mică și medie înălțime taluzele barajului trebuie să verifice următoarele valori ale factorilor de siguranță ICOLD (2011):

Tabel 6.2 Factori minim de siguranța pentru taluzele barejelor în diferite ipoteze de exploatare[54]

Etapa	Factor de siguranța minim	Aplicabil pentru
Sfârșitul construcției	1.3	Taluzul amonte și aval
Scăderea brusca a nivelului în lac de la nivelul maxim	1.2	Taluzul amonte și aval
Operare normala	1.5	Taluzul amonte
Forte seismice	1.1	Taluzul amonte și aval

Determinarea celei mai probabile suprafețe de alunecare (Fig.6.4), denumită și „suprafața critică de alunecare” sau „suprafața cea mai periculoasă de alunecare”, se poate face printr-o construcție grafică, în care se determină punctul O ca punct de intersecție al dreptelor trasate conform unghiurilor  $\beta_1$  și  $\beta_2$ . Valorile unghiurilor  $\beta_1$  și  $\beta_2$  depind de panta taluzului și sunt prezentate în Tabelul 6.3.

Tabel 6.3 Valorile unghiurilor  $\beta_1$  și  $\beta_2$  (Popa A., 1987)[82]

Panta	Unghiul taluzului	$\beta_1$	$\beta_2$
1:0,58	60°	29°	40°
1:1	45°	28°	37°
1:1,5	33,79°	26°	35°
1:2	26,57°	25°	35°
1:3	18,43°	25°	35°
1:5	11,32°	25°	37°

Se construiește linia OB numită „dreapta centrelor”, unind centrul O cu punctul B, situat în interiorul masivului, la adâncimea  $2H$  față de vârful taluzului și la o distanță de  $4,5H$  față de baza acestuia. Pe „dreapta centrelor” se aleg diferite alte

centre  $O_1, O_2.. O_n$ , distanța dintre două centre alăturate fiind  $0,3H$ , și pentru fiecare dintre ele se construiește suprafața de alunecare, care trece de fiecare dată prin baza taluzului, calculându-se pentru fiecare situație factorul de siguranță.

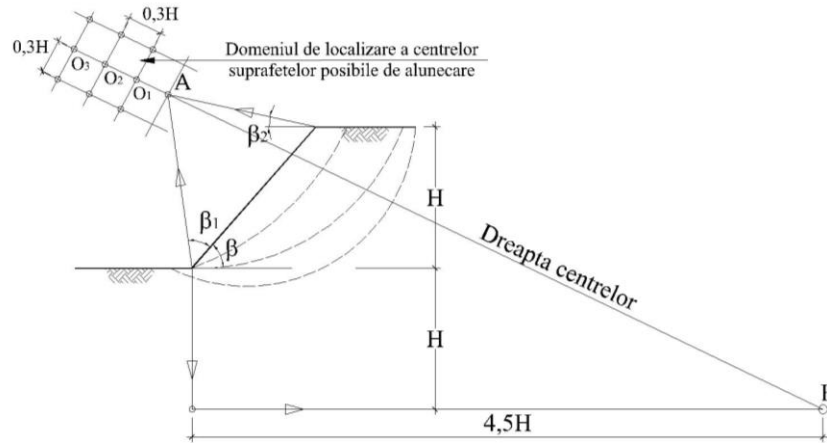


Figura 6.4 Construirea dreptei centrelor în metoda Fellenius

Cu valorile obținute  $F_{S1}..F_{S2}$  se construiește curba de variație a factorului de siguranță. Ducând o tangentă la această curbă, care trebuie să fie în același timp și paralelă la linia centrelor OB, se identifică factorul minim de siguranță, care corespunde centrului suprafeței critice de alunecare.

În cazul în care factorul minim de siguranță determinat de tangenta la curbă se înscrie între două valori  $F_S$  cunoscute, pe linia centrelor se figurează centrul suprafeței critice de alunecare, se construiește această suprafață care trece tot prin baza taluzului, se împarte în fâșii și se calculează apoi factorul minim de siguranță.

### 6.2.2. Metoda Bishop simplificată

Metodele de analiză a eforturilor efective au fost dezvoltate de Bishop în 1955. Figura 6.5 ilustrează o suprafață circulară de cedare (ABCD) și forțele care acționează asupra unei fâșii verticale din masa alunecătoare.

Fie  $E_n$  și  $E_{n+1}$  reacțiunile laterale egale care acționează pe sectoarele  $n$ , respectiv  $n+1$ . Diferența dintre  $E_n$  și  $E_{n+1}$  este mică și efectul acestor forțe poate fi neglijat. Alte forțe care acționează asupra fâșiei sunt:

$G_i$  - greutatea fâșiei;

$N_i$  - forța normală totală care acționează la baza fâșiei;

$T_i$  - forța tăietoare care acționează la baza fâșiei;

Iar:

$z_i$  - înălțimea fâșiei;

$b_i$  - lățimea fâșiei;



$l_i$  - lungimea suprafeței de alunecare aferent fâșiei  $i$ ;

$\theta_i$  - unghiul dintre forța  $N_i$  și verticală;

$x_i$  - distanța pe orizontală dintre centrul suprafeței de alunecare aferent fâșiei și centrul de rotație  $O$ .

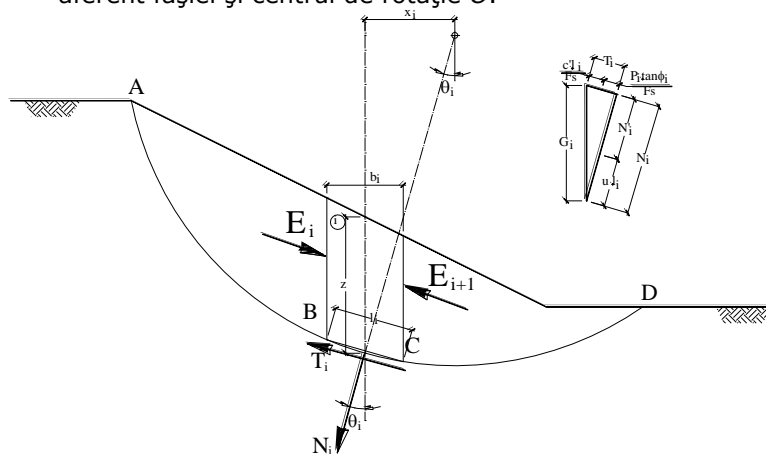


Figura 6.5 Forțele care acționează asupra fâșiei verticale

În termeni de eforturi efective, rezistența la forfecare mobilizată este:

$$\tau = \frac{c' + (\sigma_u - u) \operatorname{tg} \varphi}{F_S} \quad (6.13)$$

Efortul normal total la baza fâșiei:

$$\sigma_i = \frac{N_i}{l_i} \quad (6.14)$$

$$\tau_i = \frac{1}{F_S} \left( c' + \left[ \frac{N_i}{l_i} - u_i \right] \tan \varphi' \right) \quad (6.15)$$

Forța tăietoare la baza fâșiei este  $T_i = \tau_i \cdot l_i$ . Pentru echilibru, momentul de stabilitate trebuie să fie egal cu momentul de rezistență:

$$\sum G_i \cdot x_i = \sum T_i \cdot R = \sum \tau_i \cdot l_i \cdot N_i = \frac{R}{F_S} \left[ c' \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \tan \varphi' \right] \quad (6.16)$$

respectiv:

$$F_S = \frac{R}{\sum G_i \cdot x_i} \sum [c' \cdot l_i (N_i - u_i \cdot l_i) \operatorname{tg} \varphi] \quad (6.17)$$

Dacă neglijăm efectele forțelor  $E_n$  și  $E_{n+1}$ , singura forță verticală care acționează asupra fâșiei este  $G_i$ . Astfel:

$$N_i = G_i \cdot \cos \theta_i \quad (6.18)$$

$$F_s = \frac{R}{\sum G_i \cdot x_i} \sum [c' \cdot l_i (G_i \cos \theta_i - u_i \cdot l_i) \operatorname{tg} \varphi] \quad (6.19)$$

### 6.2.3. Metoda Bishop exactă

Formula pentru analiza prin metoda simplificată poate da erori de până la 15 % ale factorului de siguranță obținut.

Se va folosi relația:

$$F_s = \frac{R}{\sum G_i \cdot x_i} \sum [c' \cdot l_i + N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi] \quad (6.20)$$

Conform Figurii 6.5 forța normală efectivă este:

$$N_i' = N_i - u_i \cdot l_i \quad (6.21)$$

iar greutatea  $G_i$  poate fi scrisă astfel:

$$G_i = N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i \quad (6.22)$$

Cele două componente,  $N_i$  și  $T_i$ , se pot exprima:

$$N_i = N_i' + u_i \cdot l_i \quad (6.23)$$

$$T_i = \frac{1}{F_s} (c' \cdot l_i + N_i' \cdot \operatorname{tg} \varphi) \quad (6.24)$$

Introducând în expresia (6.22), forța normală efectivă și greutatea se obține factorul de stabilitate:

$$F_s = \frac{R}{\sum G_i \cdot x_i} \sum \left[ c' \cdot l_i + \frac{G_i - l_i \left( u_i \cdot \cos \theta_i + \frac{c'}{F_s} \sin \theta_i \right)}{\cos \theta_i + \frac{\tan \varphi' \cdot \sin \theta_i}{F_s}} \tan \varphi' \right] \quad (6.25)$$

### 6.2.4. Metoda Bishop – Morgenstern

Bishop și Morgenstern (1960) au folosit ecuația pentru determinarea factorului de siguranță, ( $F_s$ ) pentru taluzuri, dată de metoda Bishop simplificată pentru a realiza tabele folositoare, sub formă adimensională. Întocmirea acestor tabele se bazează pe schema din Figura 6.6, cu ajutorul căreia se pot defini parametri considerați în calcul.

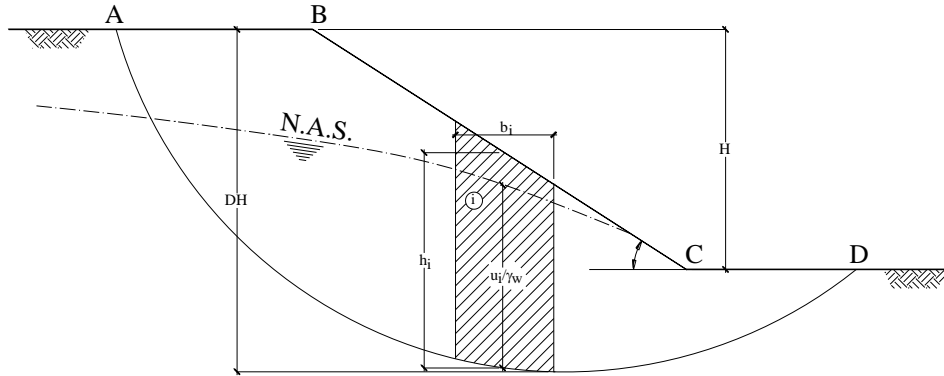


Figura 6.6 Metoda Bishop - Morgenstern

Se pornește de la următoarea relație de calcul a factorului de stabilitate:

$$F_S = \sum_{n=1}^{n=m} \frac{c \cdot b_i + (G_i - u_i \cdot b_i) \tan \theta}{m_{a(i)} \cdot G_i \cdot \sin \theta_n} \quad (6.26)$$

Mărimile  $G_i$  și  $r_{ui}$  se pot exprima prin relațiile:

$$G_i = \gamma \cdot b_i \cdot h_i, \quad r_{ui} = \frac{u_i}{\gamma \cdot h_i} \quad (6.27)$$

Înlocuind aceste ecuații în relația (6.26), factorul de stabilitate ( $F_S$ ) poate fi definit în felul următor:

$$F_S = \left[ \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} \frac{b_i}{H} \frac{h_i}{H} \sin \theta_n} \right] \sum_{n=1}^{n=m} \left\{ \left[ \frac{c}{\gamma \cdot H} \frac{b_i}{H} + \frac{b_i}{H} \frac{h_i}{H} (1 - r_{u_i}) \tan \theta \right] \frac{1}{m_{a(i)}} \right\} \quad (6.28)$$

Poate fi observat din relațiile precedente că pentru valori cunoscute  $\frac{c}{\gamma \cdot H}$

și  $r_u$ , valoarea factorului de stabilitate depinde de geometria corpului alunecător dacă presiunea apei din pori este considerată constantă.

Astfel, factorul de stabilitate  $F_S$  poate fi dat de expresia:

$$F_S = m' - n' \cdot r_u \quad (6.29)$$

unde  $m'$  și  $n'$  reprezintă coeficienții de stabilitate. Valorile  $m'$  și  $n'$  în funcție raportul  $\frac{c}{\gamma \cdot H}$  și panta taluzului.

### 6.3. Calculul factorului de siguranță la baraje omogene din pământ

Rezultatele obținute în modelarea infiltrațiilor este folosită în acest subcapitol pentru a estima factorul de siguranță a taluzelor folosind metodele clasice prezentate mai sus.

Secțiunile transversale au geometria prezentată și folosită pentru modelarea infiltrațiilor nepermanentă.

Scopul acestor calcule este de a pune în evidența modul în care regimul infiltrațiilor, dar și prezența saltelei drenante influențează factorul de siguranță.

S-a folosit programul de calcul GEO5 v16 [47], la modelarea plană a masivelor s-a optat pentru păstrarea geometriei folosite în capitolul 5.

Factorul de siguranță a fost estimat pentru taluzele amonte și aval a barajelor de 2, 5 și 10 metri cu și fără saltea drenantă, folosind metodele Bishop, Fellenius și Morgestern-Price. În urma efectuării calculelor s-a constatat că rezultatele obținute nu diferă semnificativ în cazul metodei Bishop și Morgestern – Price. Astfel în tabelele ce concentrează rezultatele calculelor o să prezint doar factorii de siguranță obținuți prin metoda Fellenius și Bishop.

Suprafața de alunecare s-a considerat circulară, iar poziția ei a fost obținută prin efectuarea de iterații prin metoda Bishop. În continuare s-a verificat factorul de siguranță obținut prin celelalte metode de calcul pentru această suprafață.

Coefficienții geotehnici folosiți în calcul au valori medii pentru grupele principale de pământuri prezentate în clasificarea USC[2]:

Tabel 6.4 Coeficienții folosiți în calculul stabilității

Denumire material	Cod	$\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	$C$ KPa
Argile grase	CH	20.50	22.10	15	5
Prafuri argiloase	MH	20	21.80	21	12
Argile nisipoase	CL	21	22.40	19	12
Nisipuri fine prăfoase	SM	18	20.6	29	5
Nisipuri fine argiloase	SC	18.50	20.90	27	8

Se pleacă de la ipoteza că barajul este consolidat, funcționează în condiții normale, iar terenul de fundare are aceleași caracteristici cu corpul barajului, adâncimea stratului de fundare fiind egal cu înălțimea barajului.

Exploatarea se consideră în mai multe ipoteze constructive și de exploatare: baraj drenat sau nedrenat cu acumulare nepermanentă și baraj drenat sau nedrenat cu acumulare permanentă.

#### 6.3.1. Baraj cu acumulare nepermanentă. Lac gol

Prima ipoteză consideră barajul cu funcționarea normală în condițiile unei acumulări nepermanente – nivelul apei în lac este 0.

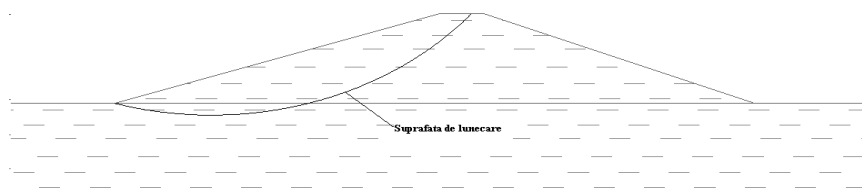


Figura 6.7 Model calcul stabilitate în ipoteza lac gol

Se calculează factorul de siguranță pentru taluzele amonte și aval, rezultatele nefiind influențate de prezența drenului la piciorul aval al barajului. În tabelul 6.6 sunt prezentate valorile pentru factorul de siguranță obținut pentru taluzele amonte și aval.

Tabel 6.5 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 1

Înălțime baraj		2m		5m		10m		
Ipoteza de calcul		Ha=0 m						
Teren	Panta taluz amonte aval	Metoda de calcul	Amont e	Aval	Amont e	Aval	Amont e	Aval
			F <sub>s</sub>					
SM	1:2.5 1:2	Bishop	2.99	2.62	2.21	1.89	1.89	1.61
		Fellenius	2.84	2.49	2.11	1.80	1.83	1.54
SC	1:2.5 1:2	Bishop	3.48	3.12	2.38	2.07	1.95	1.67
		Fellenius	3.30	2.97	2.27	1.97	1.86	1.60
CL	1:3 1:2.5	Bishop	3.65	3.38	2.32	2.10	1.81	1.60
		Fellenius	3.46	3.21	2.20	1.99	1.72	1.52
CH	1:3.5 1:2.5	Bishop	2.26	1.89	1.61	1.29	1.35	1.04
		Fellenius	2.14	1.80	1.53	1.22	1.29	1.00
MH	1:3.5 1:2.5	Bishop	2.80	2.38	1.95	1.57	2.21	1.75
		Fellenius	2.65	2.26	1.85	1.49	2.10	1.66

Această ipoteză descrie condițiile de funcționare curentă a barajelor cu acumulare nepermanentă.

Se observă că în cazul barajelor foarte mici și medii (din categoria barajelor cu înălțimi până în 10 m), formele geometrice recomandate sunt acoperitoare în cazul barajelor cu acumulări nepermanente. Valori apropiate de limita inferioară, din punctul de vedere al stabilității taluzului aval, se obțin în cazul barajelor de la limita superioară.

În cazul argilelor grase (special alese pentru a arăta cazul cel mai defavorabil din punct de vedere al stabilității), unghiul de frecare scăzut duce la stabilitatea la limita taluzului aval în cazul barajelor cu înălțimi sub medii și nesatisfăcător în cazul barajelor din clasa superioară.

Prezența unei berme în acest caz și îndulcirea pantei pe porțiunea inferioară ar putea încadra barajele formate din pământuri argiloase cu înălțimi de 10 m în limita de 1.5 pentru condiții normale.

### 6.3.2. Baraj cu acumulare permanentă. Lac cu nivelul apei la NNR. Mișcare cvasipermanentă

A doua ipoteză consideră barajul cu funcționare normală în condițiile unei acumulări permanente – nivelul apei în lac este la valori normale de operare, la o treime din înălțimea barajului.

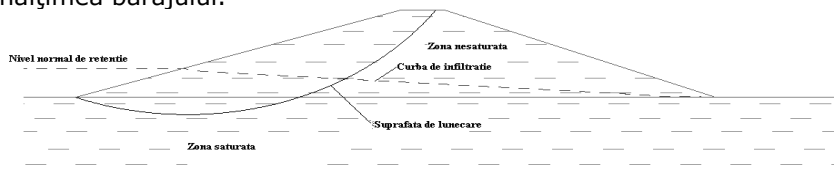


Figura 6.8 Model calcul stabilitate în ipoteza nivel apa în lac la nivel normal de retenție

Se calculează factorul de siguranță pentru taluzele amonte și aval, rezultatele fiind influențate de prezența drenului la piciorul aval al barajului. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 6.7 în funcție de soluția constructivă, material și de înălțime.

Tabel 6.6 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 2

Înălțimea barajului			2 m	2 m	5 m	5 m	10 m	10 m						
			fără drenaj	cu drenaj	fără drenaj	cu drenaj	fără drenaj	cu drenaj						
Ipoteza de calcul			Ha=H/3=0.6m											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	Permanent											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	2.87	2.52	2.89	2.55	2.11	1.84	2.11	1.87	1.78	1.57	1.82	1.61
	1:2	Fellenius	2.68	2.32	2.69	2.35	1.98	1.70	1.98	1.72	1.68	1.45	1.72	1.50
SC	1:2.5	Bishop	3.39	2.95	3.41	2.99	2.31	1.99	2.31	2.01	1.84	1.61	1.88	1.65
	1:2	Fellenius	3.19	2.75	3.21	2.78	2.19	1.84	2.16	1.85	1.73	1.49	1.77	1.53
CL	1:3	Bishop	3.58	3.13	3.59	3.15	2.22	1.93	2.22	1.93	1.70	1.47	1.72	1.50
	1:2.5	Fellenius	3.35	2.94	3.39	2.95	2.08	1.79	2.08	1.79	1.59	1.36	1.60	1.38
CH	1:3.5	Bishop	2.14	1.75	2.14	1.77	1.49	1.20	1.49	1.20	1.24	0.96	1.24	0.99
	1:2.5	Fellenius	1.99	1.63	2.00	1.64	1.39	1.10	1.39	1.10	1.17	0.89	1.17	0.92
MH	1:3.5	Bishop	2.69	2.21	2.70	2.23	1.81	1.46	1.81	1.46	2.05	1.59	2.06	1.64
	1:2.5	Fellenius	2.52	2.05	2.52	2.07	1.69	1.34	1.69	1.34	1.91	1.47	1.92	1.51

Prezența apei în lac în condițiile unui nivel permanent de apă nu înseamnă întotdeauna o creștere a siguranței taluzului amonte, deoarece prezența apei modifică unghiul de frecare internă în zona de alunecare a prismului pasiv, iar presiunea apei acționează de jos în sus pe fâșiile acestor zone făcându-le mai ușoare și diminuând efectul stabilizator. Comparativ cu varianta lac gol, stabilitatea taluzului amonte pentru niveluri normale de retenție nu înregistrează creșteri.

Prezența în una din ipoteze a zonei drenante la piciorul aval duce la o coborâre a nivelului apei, ducând la o creștere a factorului de siguranță obținut pentru taluzul aval în condiții drenate. Efectul saltelei drenante este mai important în cazul barajelor din clasele superioare de înălțime

### 6.3.3. Baraj cu acumulare permanenta. Lac cu nivelul apei la valoarea maximă. Mișcare cvasipermanentă

A treia ipoteză consideră nivelul apei în lac la nivelul maxim, iar infiltrațiile sunt permanente, regim ce se obține foarte greu (aproape imposibil de obținut) în cazul unei exploatări normale.

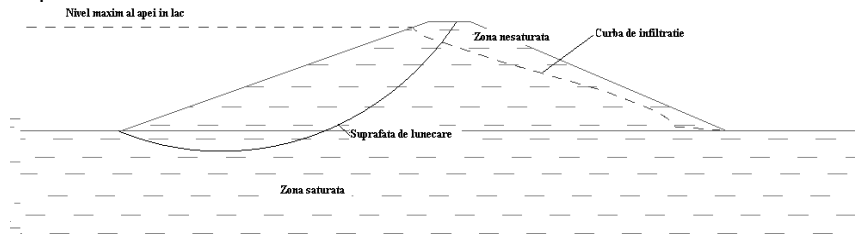


Figura 6.9 Model calcul stabilitate în ipoteza nivel apă în lac la nivel maxim. Mișcare cvasipermanenta

Factorul de siguranța a fost calculat pentru cea mai defavorabilă suprafața de alunecare, obținută prin metoda Bishop, pentru taluzul amonte și aval. Metoda Fellenius a fost folosită pentru aceasta suprafață la compararea rezultatelor obținute și trecute pentru analizare în tabelul 6.8.

Tabel 6.7 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 3

Înălțime baraj			2 m	2 m	5 m	5 m	10 m	10 m						
			fără drenaj	cu drenaj	fără drenaj	cu drenaj	fără drenaj	cu drenaj						
Ipoteza de calcul			Ha=H-0.5m											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	Permanent											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
Fs														
SM	1:2.5	Bishop	3.49	2.28	3.62	2.53	2.61	1.47	2.61	1.66	2.11	1.15	2.15	1.30
	1:2	Fellenius	3.28	2.11	3.40	2.33	2.49	1.37	2.49	1.50	2.01	1.09	2.06	1.20
SC	1:2.5	Bishop	4.41	2.72	4.35	2.96	2.92	1.63	2.92	1.79	2.26	1.22	2.30	1.35
	1:2	Fellenius	3.99	2.54	4.12	2.75	2.78	1.53	2.77	1.64	2.15	1.15	2.18	1.24
CL	1:3	Bishop	4.49	2.94	4.52	3.05	2.93	1.68	2.93	1.68	2.19	1.20	2.19	1.26
	1:2.5	Fellenius	4.26	2.77	4.29	2.86	2.77	1.58	2.77	1.58	2.08	1.13	2.08	1.17
CH	1:3.5	Bishop	2.67	1.65	2.71	1.72	1.91	1.01	1.92	1.10	1.54	0.77	1.54	0.83
	1:2.5	Fellenius	2.52	1.53	2.55	1.59	1.81	0.94	1.82	1.00	1.47	0.73	1.47	0.76
MH	1:3.5	Bishop	3.32	2.08	3.36	2.16	2.33	1.25	2.34	1.34	2.63	1.31	2.64	1.38
	1:2.5	Fellenius	3.13	1.94	3.17	2.01	2.21	1.16	2.22	1.23	2.50	1.22	2.51	1.28

Aceste rezultate sunt interesant de urmărit și folosit ca termen de comparație cu mișcarea nepermanentă și pentru a interpreta modul în care barajele mici din pământ se comportă în mod real în cazul tranzitării unor viituri importante.

În cazul acestei ipoteze presiunea apei în pori devine importantă și în cazul prismului activ, reducând împingerile ce duc la destabilizarea taluzului amonte. Influența saltelei drenante se resimte în ceea ce privește stabilitatea taluzului amonte, și în felul în care se comportă taluzul aval (creșteri ale lui Fs de 10-15% în

cazul barajelor din nisipuri argiloase și prăfoase și între 3-10% pentru pământurile argiloase).

#### 6.3.4. Baraj cu acumulare nepermanentă. Lac cu nivelul apei la valoarea maxima. Mișcare nepermanentă în care se consideră creșterea nivelului apei de la 0 la NMAX

Ipoțea consideră nivelul apei în lac la nivelul maxim, mișcarea apei de infiltrații este nepermanentă, iar nivelul apei crește liniar în 6 ore, 12 ore și 24 ore pentru barajele cu înălțimile de 2, 5 și 10m. Creșterea nivelului apei este de la zero la nivelul maxim, considerat egal cu înălțimea barajului minus o gardă de 0.50m.

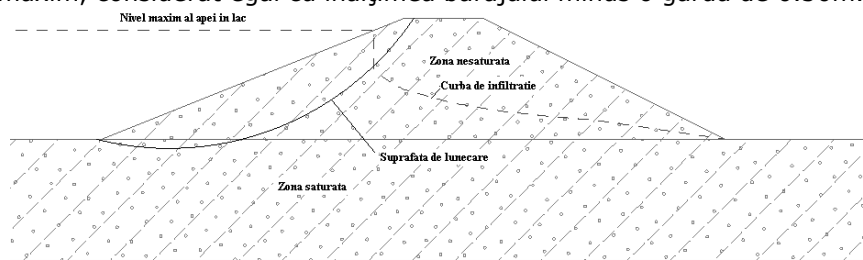


Figura 6.10 Model calcul stabilitate în ipoteza nivel apă în lac la nivel maxim. Mișcare nepermanentă liniară de la 0-NMAX

Tabel 6.8 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 4

Înălțime baraj			2 m fără drenaj		2 m cu drenaj		5 m fără drenaj		5 m cu drenaj		10 m fără drenaj		10 m cu drenaj	
Ipoțea de calcul			H=Hb-0.50m											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	0-NMAX											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am.	Aval	Am.	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	3.77	2.54	3.77	2.57	2.75	1.86	2.75	1.87	2.21	1.61	2.20	1.61
	1:2	Fellenius	3.54	2.34	3.55	2.37	2.63	1.72	2.62	1.73	2.12	1.55	2.11	1.55
SC	1:2.5	Bishop	4.51	2.98	4.52	3.01	3.08	2.01	3.08	2.02	2.38	1.66	2.38	1.66
	1:2	Fellenius	4.29	2.78	4.31	2.81	2.95	1.86	2.96	1.86	2.28	1.54	2.28	1.57
CL	1:3	Bishop	4.71	3.15	4.71	3.16	3.16	1.95	3.16	1.95	2.26	1.51	2.27	1.52
	1:2.5	Fellenius	4.46	2.95	4.47	2.96	3.00	1.80	3.00	1.80	2.16	1.39	2.17	1.40
CH	1:3.5	Bishop	2.79	1.77	2.80	1.77	1.98	1.15	1.99	1.21	1.58	1.00	1.58	1.00
	1:2.5	Fellenius	2.64	1.64	2.64	1.65	1.88	1.06	1.90	1.12	1.51	0.92	1.51	0.92
MH	1:3.5	Bishop	3.47	2.22	3.47	2.23	2.44	1.44	2.43	1.47	2.71	1.65	2.72	1.64
	1:2.5	Fellenius	3.29	2.07	3.29	2.07	2.31	1.33	2.31	1.36	2.58	1.52	2.59	1.52

În cea ce privește stabilitatea taluzului amonte având în vedere că încărcarea la fața taluzului rămâne aceeași cu cea de la ipoteza precedentă și poziția zonei saturate este mai jos decât în cazul mișcării cvasipermanente, prismul activ, destabilizator este mai ușor și deci factorii de siguranță sunt mai mari.

Procentul cu care crește factorul de siguranță comparativ cu ipoteza anterioară nu este foarte important, deoarece taluzul amonte este stabil, ipoteza cu



lac plin nefiind una defavorabilă, indiferent de modul în care s-a ajuns la acest nivel al apei.

În cazul taluzului aval însă rezultatele sunt importante, această ipoteză este una de lucru și din punctul de vedere al stabilității locale este cea mai defavorabilă ipoteză (mai puțin cea în care avem și seism).

În condițiile unei mișcări nepermanente comparativ cu condițiile mișcării cvasipermanente factorul de siguranță pentru taluzul aval, este mult mai favorabil în prima situație. Procentele sunt cuprinse între 12% și 7 % pentru barajele de 2 m nedrenate și 4-2% în cazul soluției drenate, între 27% și 15% pentru barajele de 5 m nedrenate și 16-9% în cazul soluției drenate și între 43% și 25% pentru barajele de 10 m nedrenate și 30-19% în cazul soluției drenate.

Se observă că rezultatele sunt mult alterate în cazul barajelor cu acumulare nepermanentă fără drenaj (așa cum ele sunt executate și exploatare în prezent). Aceste baraje au în realitate o rezervă imensă de stabilitate (până la 40%), procentul acesta crescând odată cu înălțimea barajului.

Prezența saltelei însă nu are efectul scontat în creșterea gradului de siguranță pentru taluzul aval și deci nu este neapărat justificat de o creștere a siguranței la lunecare.

Însă prezența saltelei drenante în cazul barajelor cu acumulări nepermanente nu le oferă acest plus de siguranță obținut în cazul barajelor nedrenate. Rezerva de stabilitate este între 2 și 15% în cazul barajelor cu înălțimi de până la 5 m și de până în 30% în cazul barajelor cu înălțime de 10m.

### 6.3.5. Baraj cu acumulare permanentă. Lac cu nivelul apei la valoarea maximă. Mișcare nepermanentă în care se consideră creșterea nivelului de la NNR la NMAX

Se nivelul apei în lac la nivelul maxim, mișcarea apei de infiltrații este nepermanentă și nivelul apei crește liniar în timpii de 6 ore, 12 ore și 24 ore pentru barajele cu înălțimile de 2, 5 și 10 m. Creșterea nivelului apei este de la nivelul normal de retenție considerat la o treime din înălțimea barajului, la nivelul maxim egal cu înălțimea barajului minus o gardă de 0.50 m.

Tabel 6.9 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 5

Înălțime baraj			2 m fără drenaj		2 m cu drenaj		5 m fără drenaj		5 m cu drenaj		10 m fără drenaj		10 m cu drenaj	
Ipoteza de calcul			H=Hb-0.50m											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	NNR-NMAX											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	3.71	2.46	3.75	2.57	2.75	1.78	2.75	1.84	2.20	1.53	2.19	1.60
	1:2	Fellenius	3.49	2.27	3.53	2.37	2.63	1.64	2.62	1.74	2.12	1.42	2.10	1.48
SC	1:2.5	Bishop	4.46	2.90	4.49	3.01	3.08	1.92	3.15	1.98	2.36	1.57	2.36	1.63
	1:2	Fellenius	4.25	2.70	4.29	2.81	2.95	1.77	3.01	1.83	2.22	1.45	2.26	1.50
CL	1:3	Bishop	4.66	3.08	4.69	3.14	3.12	1.89	3.06	1.92	2.26	1.44	2.26	1.48
	1:2.5	Fellenius	4.41	2.89	4.44	2.94	2.97	1.75	2.91	1.77	2.15	1.33	2.15	1.36
CH	1:3.5	Bishop	2.76	1.72	2.77	1.76	1.97	1.12	1.98	1.19	1.57	0.96	1.57	0.96
	1:2.5	Fellenius	2.61	1.60	2.62	1.63	1.87	1.04	1.89	1.09	1.50	0.88	1.50	0.89

MH	1:3.5	Bishop	3.43	2.17	3.45	2.21	2.45	1.41	2.47	1.47	2.70	1.57	2.72	1.60
	1:2.5	Fellenius	3.25	2.02	3.26	2.06	1.33	1.30	2.34	1.36	2.57	1.45	2.58	1.47

În această ipoteză stabilitatea taluzului amonte rămâne aceeași cu cea de la ipoteza precedentă având în vedere ca încărcarea pe paramentul amonte, dar ponderea zonei saturate este mai mare în prismul destabilizator, factorii de siguranță înregistrează scăderi nesemnificative. În cazul barajelor de 10 m această diferență se reduce și tinde spre 0.

Pentru taluzul aval factorul de siguranță nu scade nici un caz sub 95% din valoarea obținută în cazul exploatării în condiții nepermanente.

Rezultatele obținute ne permit să spunem că în cazul în care barajele nepermanente au fost dimensionate din condiția de stabilitate a taluzului aval, pentru nivelul de apa la nivelul maxim (mișcare staționară), vor îndeplini aceasta condiție și în cazul unei exploatări permanente, prezența saltelei drenante având un efect de creștere a factorului de siguranță de maxim 5% și în medie de 3% și nicidecum de 10-15% cum avem în cazul considerării infiltrațiilor staționare la nivel maxim.

### 6.3.6. Baraj cu acumulare permanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la NNR după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în mișcare cvasipermanentă la NMAX

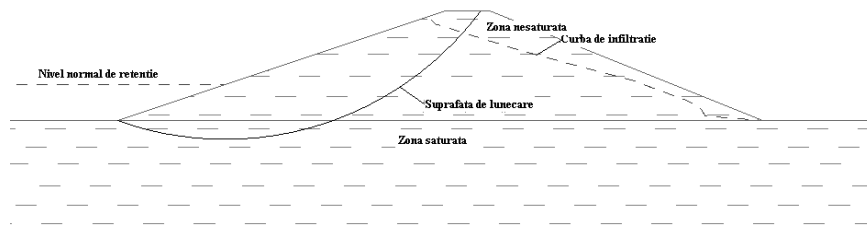


Figura 6.11 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la nivelul normal de retenție. Mișcare anterioară scăderii este considerată cvasipermanentă

Tabel 6.10 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 6

Înălțime baraj			2 m fără drenaj		2 m cu drenaj		5 m fără drenaj		5 m cu drenaj		10 m fără drenaj		10 m cu drenaj	
Ipoteza de calcul			Scădere brusca a nivelului apei în lac de $H_a=H-0.5m$ la $H_a=H/3m$											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	Permanent											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am.	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	2.40	2.28	2.48	2.28	1.61	1.47	1.61	1.66	1.25	1.66	1.26	1.66
	1:2	Fellenius	2.26	2.11	2.34	2.11	1.51	1.37	1.51	1.50	1.18	1.50	1.19	1.50
SC	1:2.5	Bishop	2.92	2.72	3.00	2.72	1.82	1.63	1.81	1.79	1.37	1.79	1.38	1.79
	1:2	Fellenius	2.80	2.54	2.87	2.54	1.71	1.53	1.71	1.64	1.29	1.64	1.30	1.64
CL	1:3	Bishop	3.29	2.94	3.31	2.94	1.89	1.68	1.90	1.76	1.38	1.76	1.38	1.76

	1:2.5	Fellenius	3.15	2.77	3.16	2.77	1.79	1.58	1.80	1.63	1.30	1.63	1.31	1.63
CH	1:3.5	Bishop	1.91	1.65	1.93	1.65	1.22	1.01	1.22	1.10	0.96	1.10	0.96	1.10
	1:2.5	Fellenius	1.81	1.53	1.82	1.53	1.15	0.94	1.15	1.00	0.91	1.00	0.91	1.00
MH	1:3.5	Bishop	2.42	2.08	2.44	2.08	1.51	1.25	1.51	1.34	1.63	1.34	1.64	1.34
	1:2.5	Fellenius	2.29	1.94	2.31	1.94	1.42	1.16	1.42	1.23	1.53	1.23	1.54	1.23

Rezultatele obținute în acest paragraf, dar le vom folosi mai departe pentru a face comparații cu situația ce se apropie de realitate. Factorul de siguranță pentru taluzele aval nu sunt influențate în aceste ultime 6 ipoteze.

### 6.3.7. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la o treime din înălțimea barajului, după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare de la 0 la NMAX

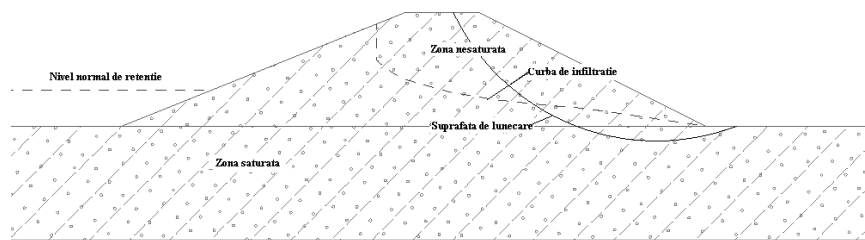


Figura 6.12 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la nivelul normal de retenție. Mișcare anterioară scăderii este nepermanentă (de la 0 la NMAX)

Tabel 6.11 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 7

Înălțime baraj			2 m fără drenaj	2 m cu drenaj	5 m fără drenaj	5 m cu drenaj	10 m fără drenaj	10 m cu drenaj						
Ipoteza de calcul			Scădere brusca a nivelului apei în lac de $H_a=H-0.5m$ la $H_a=H/3m$											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	0-NMAX											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	2.53	2.54	2.54	2.57	1.63	1.86	1.66	1.86	1.27	1.86	1.27	1.86
	1:2	Fellenius	2.41	2.34	2.42	2.37	1.55	1.72	1.56	1.72	1.21	1.72	1.20	1.72
SC	1:2.5	Bishop	3.10	2.98	3.10	3.01	1.87	2.01	1.88	2.01	1.41	2.01	1.41	2.01
	1:2	Fellenius	2.96	2.78	2.97	2.91	1.78	1.86	1.78	1.86	1.33	1.86	1.33	1.86
CL	1:3	Bishop	3.43	3.15	3.43	3.15	1.98	3.15	1.97	3.15	1.41	3.15	1.42	3.15
	1:2.5	Fellenius	3.28	2.95	3.28	2.95	1.88	2.95	1.88	2.95	1.34	2.95	1.34	2.95
CH	1:3.5	Bishop	1.99	1.77	1.98	1.77	1.25	1.77	1.26	1.77	0.97	1.77	0.97	1.77
	1:2.5	Fellenius	1.89	1.64	1.88	1.64	1.18	1.64	1.19	1.64	0.92	1.64	0.92	1.64
MH	1:3.5	Bishop	2.50	2.22	2.52	2.23	1.55	2.23	1.56	2.23	1.67	2.23	1.67	2.23
	1:2.5	Fellenius	2.38	2.07	2.39	2.07	1.46	2.07	1.47	2.07	1.58	2.07	1.58	2.07

Această ipoteză este una intermediară în cazul barajelor cu acumulare nepermanentă, nivelul apei în lac nefiind controlat, urmând să scadă până la golirea totală a lacului.

Dacă factorul de stabilitate la baraje de 2 m este influențat cu 5% (mai mare) în această ipoteză față de ipoteza în care în baraj nivelul zonei saturate este stabilit în condițiile unor infiltrații staționare, pentru barajele de 10 m înălțime aceasta diferență scade sub 2%.

Diferențele nu sunt importante și nu ar duce la o modificare a deciziei cu privire la panta taluzului amonte.

### 6.3.8. Baraj cu acumulare permanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la NNR după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare de la NNR la NMAX

Această ipoteză este cea mai defavorabilă (pentru taluzul amonte și aval deopotrivă) și reprezintă momentele de după tranzitarea viiturii în lac în condiții de exploatare normală (la momentul începerii viiturii nivelul apei este la valori normale, începe viitura și nivelul apei în lac atinge valori maxime, mișcare prin corpul barajului este nepermanentă, viitura este tranzitat și nivelul apei în lac revine rapid la valoarea inițială normală).

Tabel 6.12 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 8

Înălțime baraj			2 m fără drenaj	2 m cu drenaj	5 m fără drenaj	5 m cu drenaj	10 m fără drenaj	10 m cu drenaj					
Ipoteza de calcul			Scădere brusca a nivelului apei în lac de $H_a=H-0.5m$ la $H_a=H/3m$										
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	NNR-NMAX										
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	
Fs													
SM	1:2.5	Bishop	2.53	2.46	2.53	2.56	1.64	1.78	1.64	1.78	1.27	1.78	1.27
	1:2	Fellenius	2.40	2.27	2.40	2.36	1.54	1.64	1.55	1.64	1.21	1.64	1.20
SC	1:2.5	Bishop	3.06	2.90	3.09	3.01	1.87	1.92	1.87	1.92	1.40	1.92	1.40
	1:2	Fellenius	2.93	2.70	2.95	2.81	1.78	1.77	1.78	1.77	1.33	1.77	1.33
CL	1:3	Bishop	3.41	3.08	3.42	3.14	1.99	3.14	1.97	3.14	1.41	3.14	1.41
	1:2.5	Fellenius	3.25	2.89	3.26	3.94	1.87	3.94	1.86	3.94	1.33	3.94	1.33
CH	1:3.5	Bishop	1.96	1.72	1.97	1.76	1.25	1.76	1.26	1.76	0.97	1.76	0.97
	1:2.5	Fellenius	1.86	1.60	1.87	1.63	1.18	1.63	1.19	1.63	0.91	1.63	0.92
MH	1:3.5	Bishop	2.48	2.17	2.49	2.21	1.55	2.21	1.55	2.21	1.66	2.21	1.66
	1:2.5	Fellenius	2.35	2.02	2.36	2.06	1.47	2.06	1.47	2.06	1.57	2.06	1.57

Comparând rezultatele obținute pentru taluzul amonte în această ipoteză cu cele obținute la baraje nepermanente se observă faptul variațiile sunt de maxim 1% în favoarea exploatării nepermanente. Deoarece este de presupus ca barajul a fost exploatat în condiții nepermanente schimbarea folosinței este defavorabilă pentru stabilitatea taluzului amonte.

### 6.3.9. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la 0 după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în mișcare cvasipermanentă la NMAX

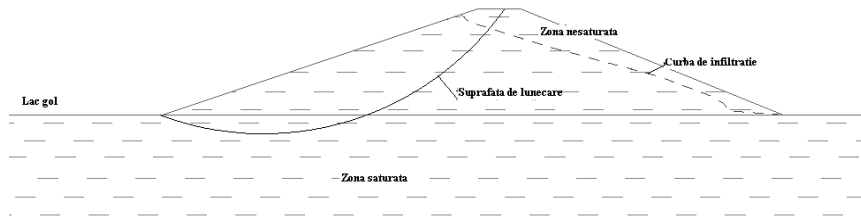


Figura 6.13 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la 0. Mișcare anterioară scăderii este considerată cvasipermanentă

Această ipoteză poate fi una luată în cazul barajelor cu acumulări nepermanente în condițiile unui calcul clasic al infiltrațiilor. Factorul de siguranță pentru taluzul amonte trebuie să fie peste 1.10, această ipoteză fiind una excepțională (și după cum am arătat în capitolul de calcul al evoluției nivelului curbei de infiltrații este dificil de atins în condițiile unei funcționari libere).

Tabel 6.13 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 9

Înălțime baraj			2 m fără drenaj	2 m cu drenaj	5 m fără drenaj	5 m cu drenaj	10 m fără drenaj	10 m cu drenaj						
Ipoteza de calcul			Scădere brusca a nivelului apei în lac de $H_a=H-0.5m$ la $H_a=0m$											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	Permanent											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	2.18	2.27	2.24	2.53	1.42	1.47	1.42	1.65	1.14	1.15	1.15	1.65
	1:2	Fellenius	2.08	2.11	2.15	2.33	1.35	1.37	1.35	1.51	1.04	1.09	1.04	1.51
SC	1:2.5	Bishop	2.66	2.71	2.73	2.96	1.63	1.63	1.62	1.63	1.24	1.22	1.24	1.63
	1:2	Fellenius	2.57	2.54	2.63	2.75	1.55	1.53	1.54	1.79	1.17	1.15	1.17	1.79
CL	1:3	Bishop	2.99	2.93	3.01	3.05	1.73	1.68	1.73	1.76	1.25	1.2	1.25	1.76
	1:2.5	Fellenius	2.85	2.76	2.87	2.86	1.65	1.58	1.64	1.63	1.18	1.13	1.19	1.63
CH	1:3.5	Bishop	1.74	1.64	1.75	1.72	1.1	1.01	1.11	1.10	0.87	0.77	0.87	1.10
	1:2.5	Fellenius	1.64	1.53	1.66	1.59	1.04	0.94	1.05	1.00	0.82	0.73	0.83	1.00
MH	1:3.5	Bishop	2.20	2.07	2.22	3.36	1.37	1.25	1.37	1.34	1.46	1.31	1.48	1.31
	1:2.5	Fellenius	2.08	1.94	2.1	3.17	1.29	1.16	1.30	1.23	1.38	1.22	1.40	1.22

Rezultatele obținute le vom folosi mai departe pentru a face comparații cu situația calculului curbei de infiltrații ce precede această scădere bruscă a nivelului prin metoda infiltrațiilor nepermanente prin terenuri nesaturate.

### 6.3.10. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la 0, după ce în corpul barajului nivelul apei

de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare a nivelului de la 0 la NMAX

Aceasta ipoteză este excepțională pentru barajele cu acumulări nepermanente în condițiile preluării în acumulare unei viituri de calcul.

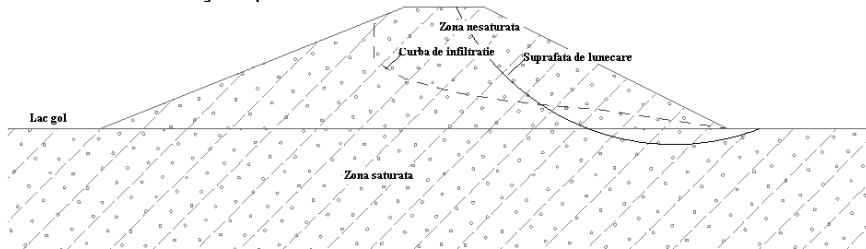


Figura 6.14 Model calcul stabilitate în ipoteza scăderii bruște a nivelului apei în lac de la nivelul maxim la 0. Mișcare anterioară scăderii este nepermanentă (de la 0 la NMAX)

Tabel 6.14 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 10

Înălțime baraj			2 m fără drenaj	2 m cu drenaj	5 m fără drenaj	5 m cu drenaj	10 m fără drenaj	10 m cu drenaj						
Ipoteza de calcul			Scădere brusca a nivelului apei în lac de $H_a=H-0.5m$ la $H_a=0m$											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	0-NMAX											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	2.29	2.54	2.29	2.57	1.45	1.86	1.48	1.87	1.15	1.61	1.15	1.61
	1:2	Fellenius	2.19	2.34	2.19	2.37	1.38	1.72	1.40	1.73	1.09	1.55	1.09	1.55
SC	1:2.5	Bishop	2.80	2.98	2.81	3.01	1.68	2.01	1.68	2.02	1.24	1.66	1.25	1.66
	1:2	Fellenius	2.68	2.78	2.69	2.91	1.6	1.86	1.60	1.86	1.18	1.54	1.19	1.54
CL	1:3	Bishop	3.11	3.15	3.11	3.15	1.78	1.95	1.78	1.95	1.27	1.51	1.27	1.51
	1:2.5	Fellenius	2.96	2.95	2.96	2.95	1.7	1.8	1.70	1.80	1.2	1.39	1.21	1.39
CH	1:3.5	Bishop	1.79	1.77	1.79	1.77	1.13	1.15	1.13	1.21	0.87	1	0.87	1.00
	1:2.5	Fellenius	1.70	1.64	1.7	1.64	1.07	1.06	1.07	1.12	0.83	0.92	0.83	0.92
MH	1:3.5	Bishop	2.27	2.22	2.27	2.23	1.39	1.44	1.40	1.47	1.48	1.65	1.48	1.65
	1:2.5	Fellenius	2.15	2.07	2.15	2.07	1.32	1.33	1.33	1.36	1.41	1.52	1.41	1.52

Dacă factorul de stabilitate pentru taluzul amonte la baraje de 2m este influențat cu procente cuprinse între 2 și 7% (mai mare) decât în cazul în care, în baraj nivelul zonei saturate este stabilită în condițiile unei mișcări cvasipermanente, în cazul barajelor de 10m înălțime aceasta diferență scade sub 3%. Diferențele obținute nu sunt importante și nu ar duce la o modificare a deciziei cu privire la panta taluzului amonte.

**6.3.11. Baraj cu acumulare nepermanentă. Scăderea bruscă a nivelului apei în lac la 0, după ce în corpul barajului nivelul apei de infiltrații este stabilit în urma unei creșteri liniare a nivelului de la o treime din înălțimea barajului la NMAX**

Această ipoteză este una excepțională (imposibil de obținut în exploatarea curentă, având în vedere că se pornește de la o mișcare cvasipermanentă cu nivelul apei în la o treime din înălțimea barajului, în condițiile în care barajul are acumulare nepermanentă) și poate interveni în condițiile unui baraj cu acumulare permanentă ce preia o viitura de calcul și pe parcursul exploatării apare necesitatea urgentă a deschiderii stavelor golirii de fund.

Tabel 6.15 Factorii de siguranță obținuți în ipoteza 11

Înălțime baraj			2 m fără drenaj		2 m cu drenaj		5 m fără drenaj		5 m cu drenaj		10 m fără drenaj		10 m cu drenaj	
Ipoteza de calcul			Scădere brusca a nivelului apei în lac de $H_a=H-0.5m$ la $H_a=0m$											
Teren	Panta taluz	Metoda de calcul	NNR-NMAX											
			Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval	Am	Aval
			Fs											
SM	1:2.5	Bishop	2.27	2.46	2.28	2.56	1.45	1.78	1.47	1.84	1.15	1.53	1.15	1.53
	1:2	Fellenius	2.18	2.27	2.18	2.36	1.37	1.64	1.40	1.74	1.09	1.42	1.09	1.42
SC	1:2.5	Bishop	2.79	2.90	2.8	3.01	1.68	1.92	1.68	1.98	1.24	1.57	1.25	1.57
	1:2	Fellenius	2.67	2.70	2.67	2.81	1.6	1.77	1.59	1.83	1.18	1.45	1.18	1.45
CL	1:3	Bishop	3.09	3.08	3.1	3.14	1.77	1.89	1.80	1.92	1.27	1.44	1.27	1.44
	1:2.5	Fellenius	2.94	2.89	3.95	3.94	1.69	1.75	1.71	1.77	1.2	1.33	1.21	1.33
CH	1:3.5	Bishop	1.77	1.72	1.79	1.76	1.12	1.12	1.13	1.19	0.87	0.96	0.87	0.96
	1:2.5	Fellenius	1.68	1.60	1.7	1.63	1.07	1.04	1.07	1.09	0.83	0.88	0.83	0.88
MH	1:3.5	Bishop	2.25	2.17	2.26	2.21	1.4	1.41	1.41	1.47	1.48	1.57	1.48	1.57
	1:2.5	Fellenius	2.13	2.02	2.14	2.06	1.32	1.3	1.33	1.36	1.4	1.45	1.40	1.45

Față de exploatarea nepermanentă, faptul că infiltrațiile prin corpul barajului nu pornesc de la condițiile unui lac gol și de la un nivel normal de retenție luat în calcul egal cu o treime din înălțimea barajului, face ca factorul de siguranță obținut pentru taluzul amonte să fie mai mic cu procente cuprinse între 0 și 1.30%, deci fără probleme de stabilitate deosebite de la un mod de exploatare la altul.

## 7. STUDIUL COMPORTĂRII ÎN TIMP A BARAJULUI DE LA CALINEȘTI OAȘ

### 7.1. Descrierea lucrării. Scurt istoric

Acumularea Călinești Oaș este situată pe râul Tur, cod cadastral I-1.11. la 8 km amonte de confluența cu râul Talna, în perimetrul localității Călinești Oaș, aval de confluența râului Tur cu Valea Rea, și controlează o suprafața bazinală de aproximativ 375km<sup>2</sup>.

Acumularea Călinești Oaș a fost executată în perioada 1971-1973 de către Trustul de Construcții pentru îmbunătățiri funciare (T.C.I.F.).

Folosințe principale ale acumulării sunt:

- apărarea împotriva inundațiilor a localității Coca și a localităților din aval și asigurarea debitelor la frontiera;

- producerea de energie electrică la microhidrocentrala Călinești începând cu anul 1983, microhidrocentrala amplasată pe malul stâng al râului Tur, imediat aval de baraj;

- asigurarea potențialului piscicol în regim natural de dezvoltare.

Acumularea de la Călinești Oaș este realizată prin intermediul unui baraj omogen cu taluzul amonte protejat de acțiunea valurilor cu dale din beton, este prevăzut cu deversor lateral de ape mari, golire de fund (trei compartimente) și turn deversant. Barajul este în clasa de importanță II și în categoria de importanță: B

Din punct de vedere geometric barajul este caracterizat de următorii parametri:

- lungime la coronament 789 m
- înălțime 9,50 m
- pante taluz
  - amonte 3,50
  - aval 3,00
- lățime la coronament 4,40 m
- lățime bancheta aval 1,5 m

Taluzele barajului sunt protejate împotriva factorilor externi după cum urmează:

- amonte protejat împotriva acțiunii gheții și a valurilor cu un pereu din beton simplu cu o grosime de 15 cm, așezat pe un strat de balast, până la cota 145,00 mdM și înierbat până la coronament.

- aval înierbat.

Măsurătoarea batimetrică din 1996 indică următoarele volume caracteristice ale acumulării:



- Volum total	28.22 mil.m <sup>3</sup>	(147,43mdM)
- Volume de atenuare a viiturii	20.70mil.m <sup>3</sup>	(143,60-147,43mdM)
- Volum energetic	12.57 mil.m <sup>3</sup>	(143,05-146,00mdM)
- Volum util	6.16 mil.m <sup>3</sup>	(141,00-143,60mdM)
- Volum mort	0.56 mil.m <sup>3</sup>	(sub cota 140,30mdM)

Din punct de vedere hidrogeologic amplasamentul este caracterizat de prezența unor straturi de pământuri argiloase prăfoase, situate pe depozite aluvionare de grosimi variabile.

Materialul din corpul barajului este un amestec de argile prăfoase, argile prăfoase cafenii și mai puțin argile cafenii-negricioase. Coeficientul de permeabilitate al materialului din corpul barajului este conform „Studiului U.C.C.1981”  $k=1,574 \times 10^{-6}$  m/s.

Conform unui studiu realizat în 1979 de către Institutul Politehnic Cluj Napoca în corpul barajului au fost identificate argile în proporție de 17.97%, prafuri argiloase 70.02% și nisipuri argiloase în proporție de 12%.

## 7.2. Sistemul de supraveghere

Supravegherea comportării barajelor se realizează prin inspecții vizuale efectuate de personal calificat și interpretarea datelor obținute din monitorizarea comportării cu aparatura de măsură a unor parametri relevanți.

Monitorizarea barajelor urmărește două obiective principale:

- comportarea în ansamblu a lucrărilor și gradul lor de siguranța în diferite condiții de solicitare;
- cunoașterea fenomenelor care se petrec în corpul lor și în terenul de fundație, în vederea verificării ipotezelor de calcul și a urmăririi proprietăților materialelor de construcție cu scopul unor intervenții corespunzătoare, fie al folosirii datelor pentru proiectarea altor lucrări similare.

Parametri monitorizați se pot grupa în două categorii:

- acțiuni ale mediului înconjurător (nivelul apei în lac, temperatura aerului, temperatura apei);
- mărimi fizice care descriu răspunsul sistemului baraj-fundație la acțiunile mediului înconjurător.

În cazul barajelor din umpluturi parametri principali monitorizați sunt următorii:

- infiltrații prin corpul barajului și versanți;
- presiunea apei din pori în elementele pământoase de etanșare;
- deplasările și în special tasările sistemului baraj-fundație în timpul construcției și exploatării;
- starea de eforturi efective și totale;
- poziția curbei de infiltrație în baraj și în versanți;
- deplasări ale versanților;
- starea de deformație și de eforturi în lucrările de beton asociate barajului din umplutura (descărcători de suprafața, goliri de fund etc.).

Barajul de la Călinești este dotat cu următoarele tipuri de aparatură pentru măsurarea solicitărilor exterioare:

Tabel 7.1 AMC pentru solicitări exterioare

Nr. Crt.	Parametrul urmărit	Aparatura	Număr aparate	Număr de mas. pt. Regim de exploatare	
				Normal	special
1	Nivel lac	Mira	1	2/zi	conf. fazelor de apărare-reg. de exploat. 4h, 2h, 1h
		Limnigraf (turn de manevra)	1		conf. reg. de exploatare
2	Nivel aval (culeea podului peste Tur)	Mira	1	2/zi	conf. fazelor de apărare-reg. de exploat. 4h, 2h, 1h
3	Precipitații	Pluviometru	1	Zilnic	zilnic
4	Temperatura aerului și apei	Termometru	1	Zilnic	zilnic
5	Evaporația	Evaporimetru	1	zilnic în sezon	zilnic
6	Indicatori de calitate apa din lac, pentru afluent și defluent	analize de laborator	lunar, bilunar și trimestrial funcție de secțiunea caracteristica		
7	Debite afluate (lichide și solide)	Mira	2/zi și funcție de fazele de apărare, conform programului de activitate al SH din amonte Huta Certeze, Boinești, Negrești-Oaș		
8	Debite defluente	mira și calcule de bilanț	2/zi și funcție de fazele de apărare, conform programului de regulament de exploatare		
9	Grosimea stratului de gheata	Rigla	conform regulamentului de exploatare		
10	Grosimea stratului de zăpada	Rigla	conform regulamentului de exploatare		

Instalațiile și aparatura de măsurare pentru urmărirea lucrărilor de barare și a fundației este compusă din:

Tabel 7.2 AMC pentru comportarea construcțiilor și terenului de fundare

Nr. Crt.	Parametrul urmărit	Aparatura	Număr aparate	Număr de mas. pt. Regim de exploatare	
				Normal	special
1	Variația nivelului infiltrațiilor prin baraj și fundație subpresiune	Piezometre	18 6 secțiuni	săptămânal	zilnic
		Piezometre îndesire	16	săptămânal	zilnic
2	Debite descărcate la foraje	vas gradat, cronometru	6	zilnic la descărcare	

Nr. Crt.	Parametrul urmărit	Aparatura	Număr aparate	Număr de mas. pt. Regim de exploatare	
				Normal	special
	autodescărcătoare				
3	Tasări baraj și versanți	borne de baza	7	Bianual	bianual și după viituri
		reperi nivelitici baraj	9	Bianual	bianual și după viituri
		reperi nivelitici platforma aval	5	Bianual	bianual și după viituri
		reperi nivelitici turn de manevra	7	Bianual	bianual și după viituri
		reperi nivelitici deversorul de ape mari	8	Bianual	bianual și după viituri
		reperi nivelitici debușarea galeriei de golire	8	Bianual	bianual și după viituri

Sistemul de AMC pentru urmărirea infiltrațiilor se compune în prezent dintr-un număr de 34 foraje piezometrice amplasate pe 6 secțiuni transversale barajului.

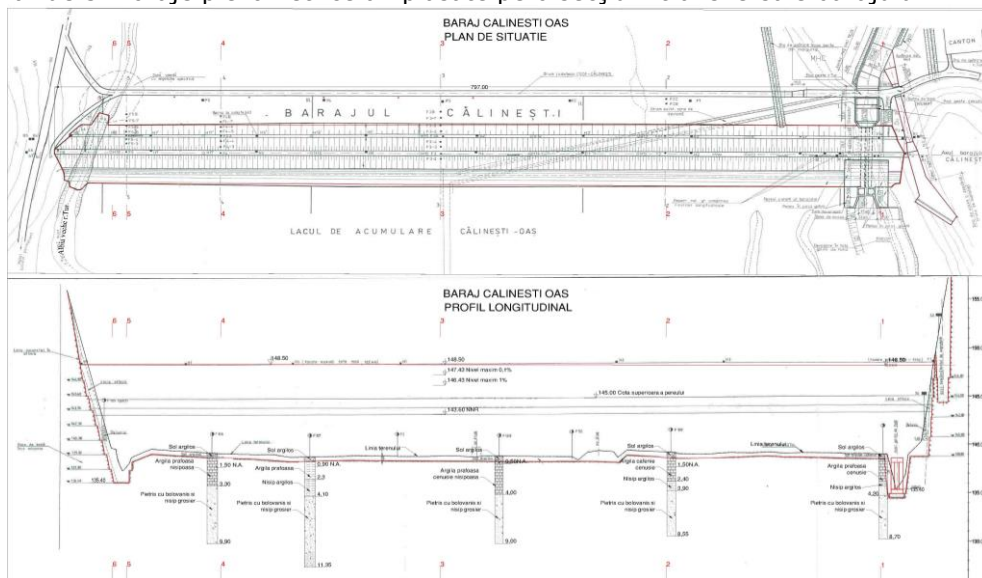


Figura 7.1 Plan de situație și profil longitudinal Călinești Oaș

Aceste foraje au fost executate în perioade diferite de două categorii:

- forajele din corpul barajului, cu cota inferioară în corpul sau fundația impermeabilă a barajului, urmăresc variația nivelurilor infiltrațiilor prin baraj;
- forajele de la piciorul aval, cu cota inferioară sub nivelul fundației, în stratul permeabil, variația subpresiunilor (foraje autodescărcătoare).

Nivelul infiltrațiilor prin corpul barajului se măsoară în 6 secțiuni AMC dispuse în lungul barajului (L=789m).

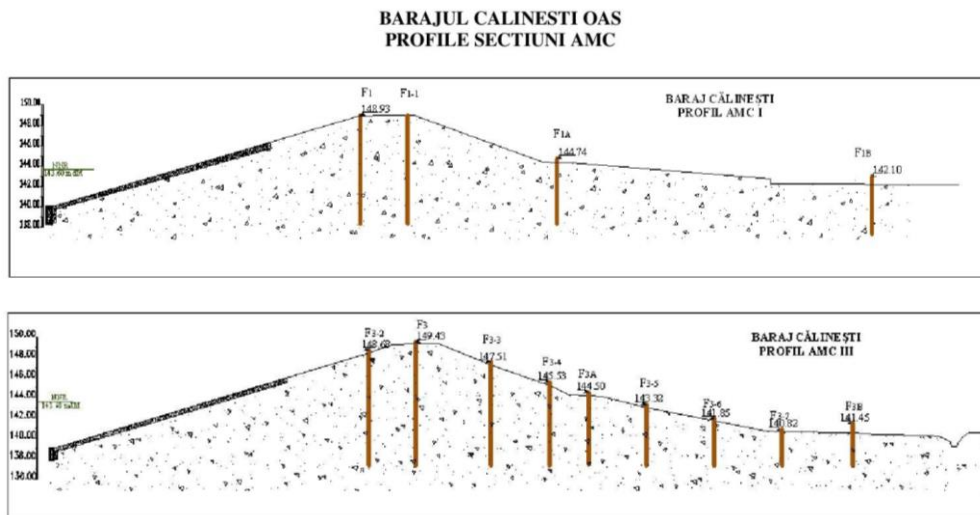


Figura 7.2 Secțiuni de măsurare a infiltrațiilor la Barajul Călinești Oaș[32]

La o funcționare normală a forajelor, efectul precipitațiilor asupra nivelurilor piezometrice trebuie să fie cât mai redus, fapt care însă nu se realizează în realitate, efectul precipitațiilor se resimte imediat după producere (conform tabelului anterior).

„În studiul UCC din 1991 s-au nominalizat 12 piezometre (F1, F1-1, F3, F3-2, F3-3, F4, F4-3, F5, F5-3, F5-4, F5-A) deci aproape 50% din forajele existente, care nu funcționează corect, precizându-se ca nu se mai justifică utilizarea lor.

De asemenea s-au nominalizat o serie de piezometre cu funcționare "acceptabilă" și numai 9 care funcționează corect, din care numai 2 (F3-4 și F5-5) pe banchetă, iar restul pe platforma aval (F1-B, F2-B, F2-C, F3-B, F3-7, F4-B, F4-7, F5-7, F5-B).

Acest mod de funcționare a fost semnalat în toată perioada de exploatare a acumulării, deși pe parcurs s-a dispus și s-a efectuat golirea periodică a forajelor.

În anii 1993-1994 s-au înregistrat niveluri în lac apropiate de nivelul de calcul 1% nivel maxim înregistrat în perioada de exploatare. Aceste niveluri au fost însoțite de ridicarea apei în forajele autodescărcătoare de la piciorul aval, la o cotă cu aproximativ 1,0 m peste cota terenului și deversarea apei pe la partea superioară a forajului. Funcționarea forajelor autodescărcătoare este normală, acestea descărcând subpresiunile la talpa fundației.

Studiul UCC/1995 a nominalizat un număr de 17 foraje colmatate pe 1-6 m, cu comportare total necorespunzătoare, iar din restul forajelor se consideră că funcționează corespunzător numai 4 (F1B, F2-C, F3-B, F5-7).

În 1995 s-au luat măsuri de izolare a 6 foraje de sub influența precipitațiilor, prin realizarea unei etanșări cu argilă compactă la partea superioară, pe o adâncime de 1.50-2.0 m, dar efectul acestor masuri este nesemnificativ.”[26]

Una din explicațiile comportamentului necorespunzător al piezometrelor poate fi găsită în secțiunile proiectate ale piezometrelor.

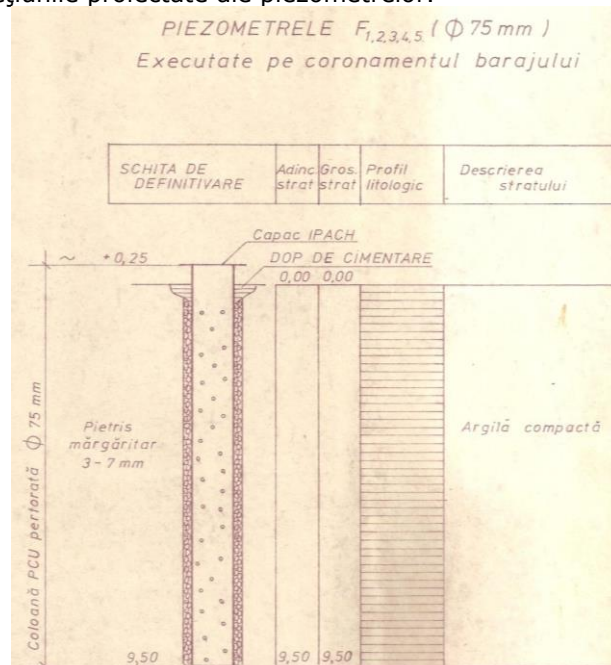


Figura 7.3 Secțiune tip piezometru Călinești Oaş [50]

Piezometrele sunt în realitate puțuri de observație, drenul este executat pe întreaga înălțime și captează apele din precipitații. Descărcarea acestora se face foarte greu având în vedere că umpluturile sunt realizate din argile grase.

În analiza fenomenului de infiltrație prin corpul barajului s-a renunțat la interpretarea forajelor cu niveluri peste cel al apei din lac, considerându-se că linia infiltrației este data de nivelul apei din lac și nivelul apei în forajele FB amplasate la piciorul aval.

De asemenea în cursul exploatării s-au executat săpături, de 1,50-2,00 m, în jurul forajelor pentru a depista linia de infiltrație constatându-se ca materialul din corpul barajului este argilă grasă - ceea ce explica durata mare de revenire a nivelului piezometric la normal după umplerea cu apă din precipitații.

În vederea unei urmăriri optime a comportării în timp a construcției, a corpului barajului și a fundației este necesară dotarea cu aparatură realizată corect.

Dotarea corectă a barajului cu aparatură pentru urmărirea parametrilor ce descriu infiltrațiile, trebuie să aibă la bază o bună cunoaștere a opțiunilor și a modului de funcționare a lor, cu avantajele și dezavantajele fiecărei soluții, și nu în ultimul rând o bună cunoaștere a istoricului construcției, a amplasamentului și a caracteristicilor hidrogeologie.

### 7.3. Măsurarea înălțimii piezometrice la baraje din pământ

Pânza freatică este definită ca fiind locul geometric al punctelor dintr-un acvifer în care presiunea este egală cu presiunea atmosferică și este situată mai jos decât zona afectată de fenomenul de capilaritate. Zona situată sub pânza freatică și un strat impermeabil se numește strat freatic sau acvifer. În condiții normale presiunea apei în pori crește hidrostatic odată cu adâncimea punctului și se poate numi presiune hidrostatică, putând fi calculată ca produsul între adâncime și greutatea specifică a apei.

În figura 7.4 este prezentat un caz în care avem o stratificare clasică de teren vegetal, umpluturi, nisipuri și argile în aceasta ordine.

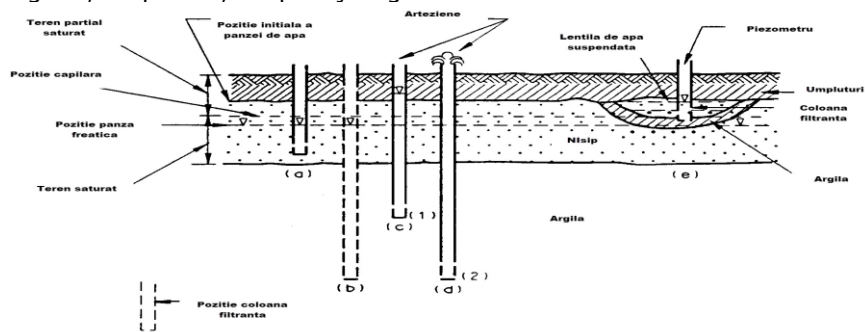


Figura 7.4 Piezometre și puțuri de observație [28]

Figura surprinde o situație ce urmează execuției umpluturilor, perioadă în care în zona argiloasă există încă presiune în exces ca urmare a procesului de depunere a umpluturilor. Datorită permeabilității crescute în zona nisipoasă excesul de presiune este disipat aproape instantaneu, astfel încât tuburile piezometrice (a) și (b) indică aceeași valoare. Presiunea în exces din zona de argile va fi disipată în timp prin intermediul zonei de nisipuri. Astfel rata de disipare a excesului de presiune din pori în tubul (c) este mult mai mare decât în tubul (d) având în vedere adâncimea la care se face prelevarea presiunii. Forajul (b) se numește puț de observare deoarece nu există nici un fel de impermeabilizare care să împiedice comunicarea între straturi. [31]

Piezometrul este aparatul de măsură a presiunii în jurul sau și nu din straturi diferite de la cote diferite. Tuburile (a), (c), (d) pot fi astfel numite piezometre, nivelul la care se ridică apa în ele se numește nivel piezometric.

Excesul presiunii apei din pori apare ca rezultat al aplicării unor forțe exterioare asupra unui teren care se tasează și nu poate să disipeze acest exces, această presiune a apei în pori se numește presiune indusă. Dacă sarcinile exterioare sunt îndepărtate apare o decompresie a terenului, o mărire a volumului, fapt ce poate duce la apariția unor presiuni negative în pori.

În unele cazuri presiunea apei în pori nu se manifestă hidrostatic:

- dacă avem lentile de teren permeabil situat deasupra stratului freatic, reținut în poziție de un strat impermeabil, piezometrul (e) indicând un nivel de apă superior pânzei freactice generale;

- presiuni arteziene sunt puse în evidență de piezometre ce interceptează un teren permeabil, saturat cuprins între două straturi considerate impermeabile. Curgerea apei prin aceste tuburi fără pompare se datorează presiunii superioare existentă în aceste straturi acvifer.

Majoritatea piezometrelor folosite la măsurarea poziției pânzei freatice funcționează prin captarea unei cantități de apă din mediul poros. Curgerea din zonă ce se dorește a fi analizată se face prin intermediul fantelor din suprafața exterioară a puțului. Migrarea apei din pori în piezometre depinde în mod direct de permeabilitatea terenului, de tipul și dimensiunile piezometrului, precum și de schimbările de presiune survenite.

Debitul necesar pentru egalizarea presiunilor la un piezometru cu membrană este foarte scăzut. Pentru tuburi piezometrice simple întârzierea poate fi redusă prin mărirea zonei de infiltrație și scăderea diametrului tubului. Întârzierile sunt nesemnificative în cazul terenurilor nisipoase permeabile.

În cazul piezometrelor abia instalate există o perioadă necesară egalizării presiunilor și nivelurilor numit timp de întârziere de instalare.

Estimarea timpului necesar echilibrării apei în piezometru este necesară în alegerea tipului de piezometru ce urmează a fi instalat în funcție de condițiile terenului. Dunicliff propune ca acceptabil un răspuns de 90% (accepta o eroare de 10% din estimarea nivelului presiunii apei în pori).

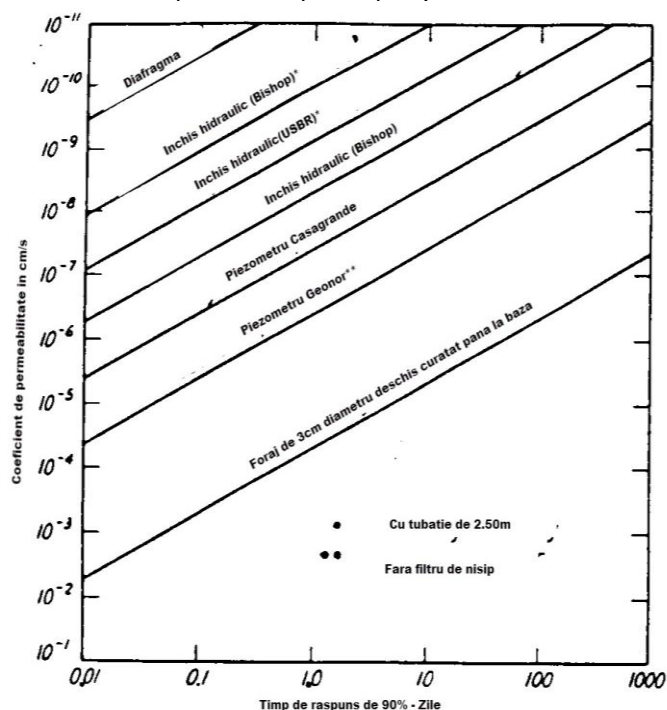


Figura 7.5 Timpul de răspuns a tipurilor de piezometre [102]

Aplicațiile la care se folosesc tuburile piezometrice se împart în două categorii.

În prima categorie sunt incluse determinări cu privire la condițiile de presiune hidrostatică, monitorizare infiltrațiilor, funcționalitatea drenurilor și coloanelor drenante etc.

În a doua categorie, prin monitorizarea presiunii apei din pori este posibilă o apreciere a stării de eforturi în timpul procesului de consolidare a fundației, a materialului din corpul barajului ca efect al scăderii bruște de nivel. Cele mai uzuale aparate de măsura și control al infiltrațiilor sunt:

Puțurile de observație: aplicațiile pentru aceste aparate sunt limitate deoarece ele fac conexiuni între diferite straturi. Nivelul apei în aceste foraje este determinat prin diverse metode.

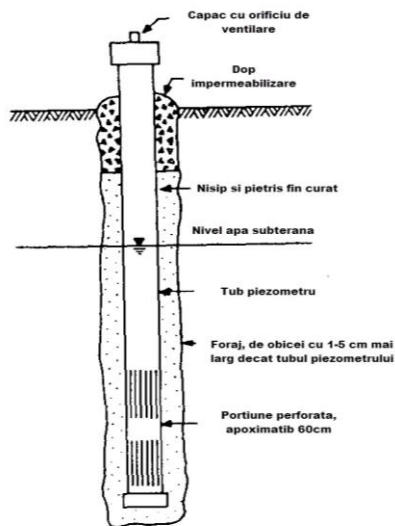


Figura 7.6 Puț de observație [28]

Tuburile piezometrice (Piezometre Casagrande): spre deosebire de puțurile de observație acestea sunt caracterizate de o limitare a zonei în care se măsoară nivelul presiunii prin închiderea părții inferioare și limitarea comunicării între diferitele straturi prin limitarea zonei filtrante prin într-un dop de impermeabilizare din lapte de ciment sau bentonită. Așa cum se observă în figura 7.5, pentru umpluturi din argile grase (cazul barajului de la Călinești Oaș), cea mai viabilă soluție pentru măsurarea infiltrațiilor este acest tip de piezometru.



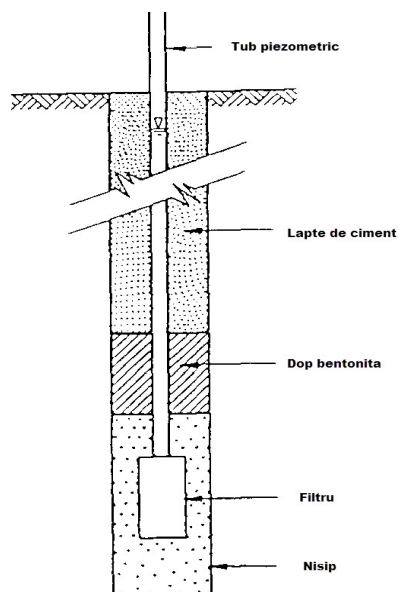


Figura 7.7 Piezometru Casagrande [28]

Nivelul apei în piezometru este măsurat cu ajutorul unei celule de presiune, prin metode acustice sau prin metode clasice cu plutitori.

Piezometre pneumatice: sunt dispozitive ce are la bază o celulă cu membrană ca în figura 7.9, instalația poate fi dispusă inclusiv prin împingerea mecanică a ei în fundație, fără a mai fi nevoie de impermeabilizări ca în cazul schemei din figura 7.7.

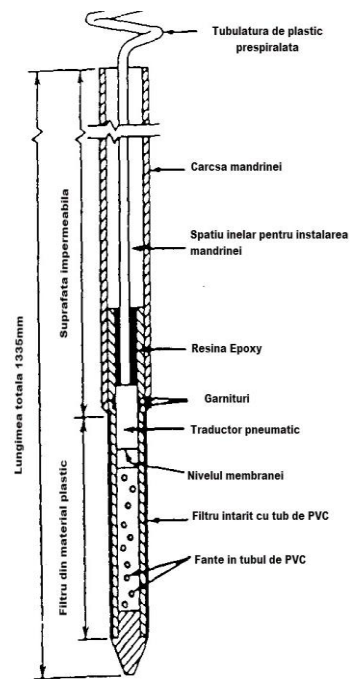


Figura 7.8 Piezometru cu traductor pneumatic [28]

Acest dispozitiv se poate folosi în vederea monitorizării presiunii apei în porii materialului supus consolidării, în fundațiile barajelor, în cazul în care eforturile la care sunt supuse ele au valori mari. Instalarea dispozitivului trebuie făcută cu mare grijă pentru păstrarea integrității și etanșeității senzorilor de presiune instalați în interiorul tubulaturii.

Piezometrele cu fir vibrant: sunt instrumente bazate pe senzorii prezentați în figura 7.9, și sunt disponibile pentru instalare în terasamente compactate și permit un răspuns doar pe baza presiunii apei în pori și ignorarea stării generale de tensiune. Se poate adapta și după schema prezentată în cazul piezometrelor pneumatice.



Figura 7.9 Senzor cu fir vibrant

În tabelul 7.3 se prezintă avantajele și dezavantajele folosirii diferitelor tipuri de piezometre:

Tabel 7.3 Avantajele și dezavantajele diferitelor tipuri de piezometre [28]

Tip instrument	Avantaje	Dezavantaje
Put de observație	Ușor de instalat Se citește pe loc	Poate fi folosit doar în zone saturate cu un singur strat
Piezometru Casagrande	Fiabil Succes demonstrat o perioadă lungă de timp Se autoaerează dacă este dimensionat corect Poate fi folosit în determinarea permeabilității Poate fi automatizat ușor prin amplasarea de celule de presiune etc.	Poate duce la apariția de întârzieri în răspuns Sensibil la instalare Dacă este montat pe parcursul construcției poate influența gradul de compactare în jurul sau Probleme de îngheț Filtrul se poate colmata
Piezometre pneumatice	Nu prezintă întârzieri în cea ce privește răspunsul la schimbări de presiuni Acces la componentele ce necesită calibrare Interferența minimă cu construcția în sine Nu apar probleme de îngheț	Presupune sursa de aer Instalare și calibrare migăloasă
Piezometre cu fir vibrant	Simplu de citit Nu prezintă întârzieri în cea ce privește răspunsul la schimbări de presiuni Interferența minimă cu construcția Efectul conductorilor este minim Poate citi presiuni negative Nu apar probleme de îngheț	Modificări ale citirii 'O' datorită alunecării firului
Piezometre cu rezistente electrice	Simplu de utilizat Fără întârzieri Nu afectează procesul de construire sau comportament Nu sunt probleme de îngheț Folosita la citiri ale presiunilor negative	Conductorul afectează citirile dacă nu se iau măsuri speciale Erori cauzate de umiditate sau corodare

Atunci când se aleg instrumentele pentru monitorizarea comportării barajelor din materiale locale trebuie avute în vedere aceste caracterizări ale comportării, utilizării și instalării piezometrelor. Dacă monitorizarea parametrilor este prevăzută pentru o perioadă limitată (de exemplu în timpul construcției și primei umpleri a barajului) atunci se poate opta pentru instrumente mai sensibile (pneumatice, cu fir vibrant).

Pentru aplicații pe termen lung trebuie avute în vedere instrumentele simple și fiabile de tipul piezometrelor Casagrande.

Pentru măsurarea presiunii apei în pori și monitorizarea fenomenului de consolidare acolo unde sunt compresiuni mari este de dorit folosirea piezometrului pneumatic sau cu fir vibrant.

#### **7.4. Monitorizarea și măsurarea parametrilor pentru zona nesaturată**

Măsurarea parametrilor ce caracterizează mișcarea în zona situată deasupra curbei de infiltrații este impetuos necesară în condițiile în care, la barajele de mici dimensiuni, cu acumulări permanente sau nepermanente avem variații mari de nivel în perioade scurte de timp, mișcarea apei de infiltrații nu atinge valorile maxime obținute în regim permanent.

Așa cum s-a arătat și în capitolul 3 mișcarea nepermanentă în medii nesaturate este caracterizată și influențată de sucțiune și indirect de gradul de umiditate conținut de pământ în zona nesaturată.

Măsurarea gradului de umiditate are un rol important în verificarea coeficienților de permeabilitate pe zona nesaturată și de interpretarea a capacității de înmagazinare a acestei zone.

Conținutul de apă în zona nesaturată se poate face direct prin măsurători intruzive, dar acestea sunt scumpe și necesită un volum mare de muncă și nu este o soluție în cazul monitorizării curente.

O serie de senzori au fost dezvoltati în ultima perioadă de timp pentru a estima și măsura cu acuratețe gradul de umiditatea din zona nesaturată.

Senzorul prezentat în imaginea 7.10 reprezintă un astfel de exemplu, măsoară răspunsul terenului ce-l înconjoară la impulsurile electrice transmise printr-o serie de bare metalice. Acest răspuns este în strânsă legătură de umiditatea mediului de la care se culege răspunsul.



Figura 7.10 Senzor tip TDS

Metoda de măsurare a parametrului este indirectă și se bazează pe o curbă caracteristică, iar problemele ce apar în acest caz sunt reprezentate de sensibilitatea la variația concentrației de săruri sau minerale dizolvat în apa de infiltrații.

Un alt exemplu de senzori folosiți pentru determinarea umidității din sol îl reprezintă senzorul cu disipator de căldura.

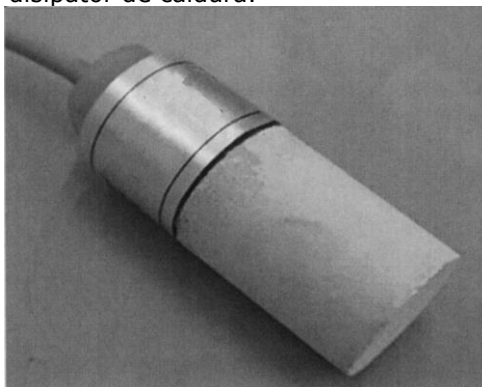


Figura 7.11 Senzor cu disipator de căldura

Acest senzor măsoară modul în care crește temperatura sa (ceramica poroasă) pentru o cantitate de căldură produsă în interior. Modul în care este disipată căldura în partea din ceramică este influențat de umiditatea conținută de acesta.

## 7.5. Studiul comportării barajului Călinești Oaș la viiturile înregistrate

Pe parcursul exploatării sale, barajul de la Călinești Oaș a fost supus acțiunii permanente a apelor de infiltrații. Chiar dacă aparatura de urmărire a caracteristicilor apelor de infiltrații a cunoscut deficiențe în funcționare, barajul s-a comportat fără probleme deosebite.

Montarea unor aparate noi de măsură și control nu reprezintă un progres în rezolvarea problemei de față atâta timp cât nu există un model de calcul calibrat, care să descrie modul de comportare a barajului la viituri.

O încercare (având în vedere ca lipsește un studiu geotehnic riguros întocmit) de modelare a modului în care barajul de la Călinești Oaș s-a comportat la viiturile înregistrate este prezentată în cele ce urmează.

Au fost analizate trei viituri înregistrate în anii 1998, 2000 și 2001. Datele disponibile conțin măsurători cu privire la variația nivelurilor apei în lac, în piezometre și puțuri autodescărcătoare.

Pentru analiza infiltrațiilor s-a trecut la realizarea modelului, s-a propus spre calcul secțiunea III, situată central, stratul de fundație are aceiași caracteristici geotehnice cu ale umpluturilor.

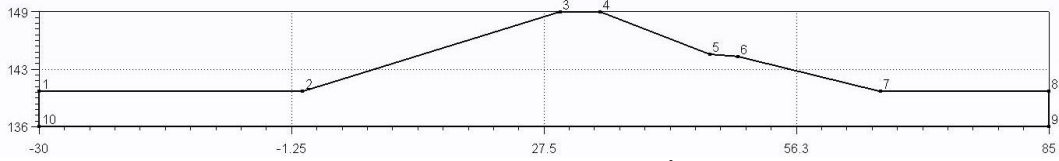


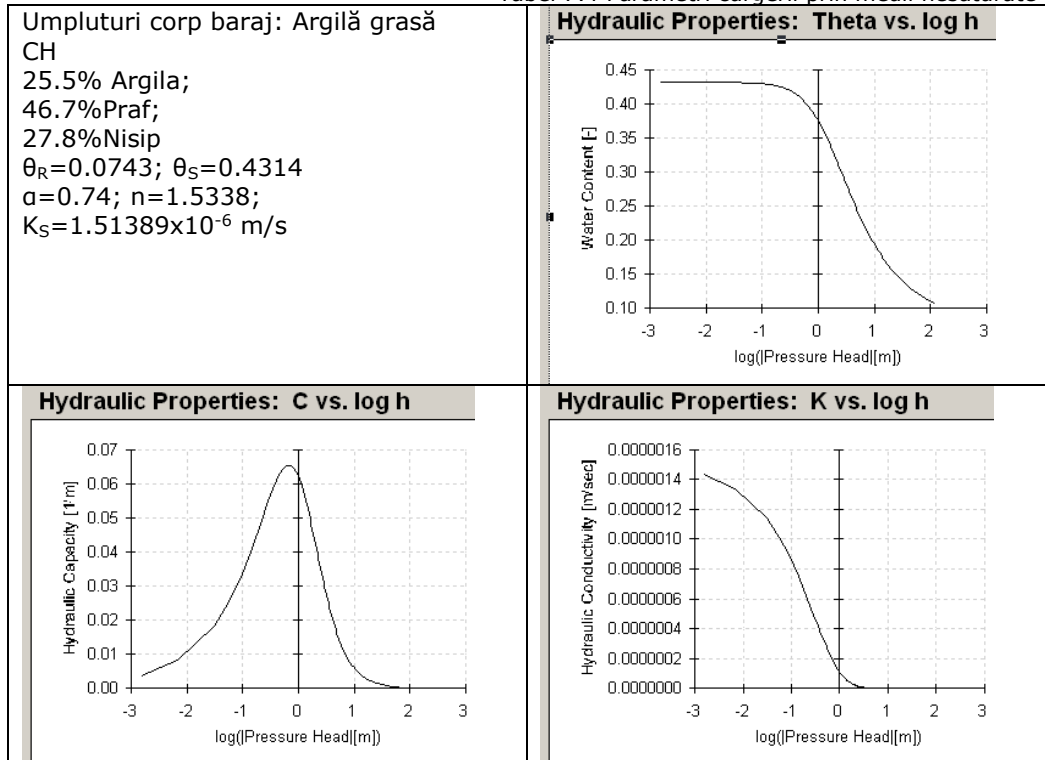
Figura 7.12 Geometria modelului de calcul în secțiunea III

Grosimea stratului de fundare este de 4 m, elevațiile au fost exprimate în cote absolute. Pentru pregătirea modelului de calcul în MEF au fost folosiți următorii parametri:

Înălțimea barajului de 9.5 m			
Lățimea coronamentului B=4,40m			
Număr noduri	Număr elemente	Toleranta admisa	$\Delta t$ [h]
1909	3478	0.005	6

Având în vedere compoziția corpului barajului și că procente de argilă, praf și nisip, necesare determinării parametrilor ce descriu curgerea nepermanentă sunt: 25.5% argila, 27.8% nisip și 46.7% praf, folosind programul de estimare RETC.exe au fost obținute următoarele valori:

Tabel 7.4 Parametri curgerii prin medii nesaturate



Parametri geotehnici introduși în calcul sunt valori medii pentru grupele principale de pământuri prezentate în clasificarea USC[2]:

Tabel 7.5 Parametri geotehnici ai umpluturii și terenului de fundare

Denumire material	Cod	$\gamma$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\phi$ [°]	C KPa
Argile grase	CH	20.50	22.10	17	8

### 7.5.1. Viitura înregistrată în perioada 13.06.-22.06.1998

Perioada ce precede această viitură este caracterizată de niveluri ale apei în lac apropiate de nivelul normal de retenție. Nivelul înregistrat în data de 13.06.1998 este considerat nivelul la care mișcarea este cvasipermanentă.

Pe perioada celor 10 zile de studiu nivelul variază lent pe parcursul a 6 dintre ele, de la 142.43 mdM la un maximum de 145.05 mdM înregistrat în data de 21.06.1998. Acest tip de viitură se înregistrează în perioadele ploioase ale anului, luna iunie fiind cunoscută din punct de vedere a precipitațiilor ca fiind una dintre cele mai bogate luni ale anului.

Pentru calculul infiltrațiilor am folosit o variantă a programului prezentat în subcapitolul 4.13. adaptat unui sistem de coordonate absolute. Condițiile de margine folosite au fost nivelurile măsurate ale apei în lac pentru zona amonte, și bancheta aval a fost considerată drenantă (având în vedere ca nu avem apa în bieful aval).

Calculul infiltrațiilor a adoptat pentru retenția de apă modelul propus de van Genuchten și modelul propus de Mualem pentru permeabilitate.

Pentru realizarea discretizării și postprocesarea rezultatelor obținute s-a folosit programul GMSH.exe.

În figura 7.13 sunt prezentate pozițiile curbelor de infiltrații în zilele în care au fost efectuate citiri la AMC – urile barajului.

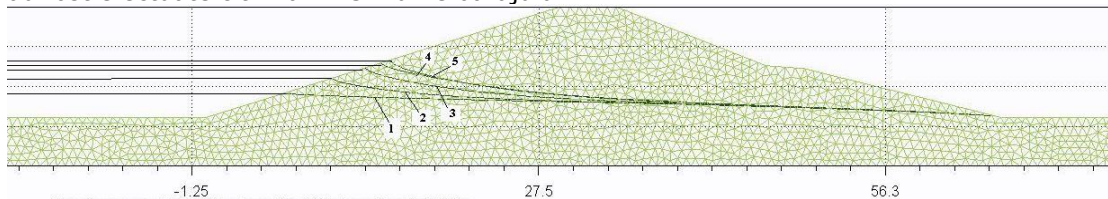


Figura 7.13 Evoluția curbei de infiltrații în timpul viiturii din 1998

În figurile 7.14-7.17 este prezentată distribuția presiunilor, pentru zilele în care au fost efectuate măsurători la AMC.

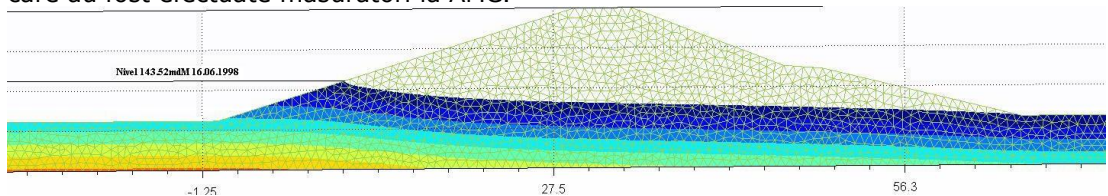


Figura 7.14 Distribuția presiunii apei în pori 16.06.1998 (2)



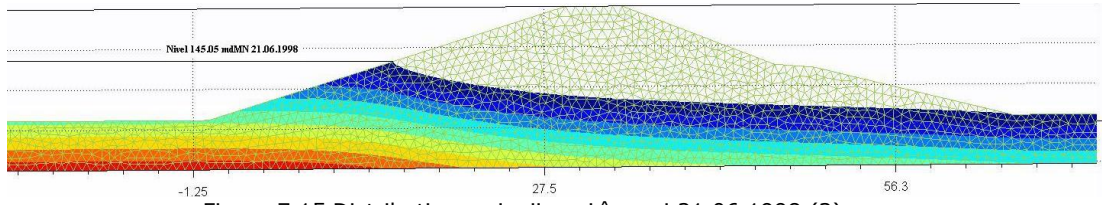


Figura 7.15 Distribuția presiunii apei în pori 21.06.1998 (3)

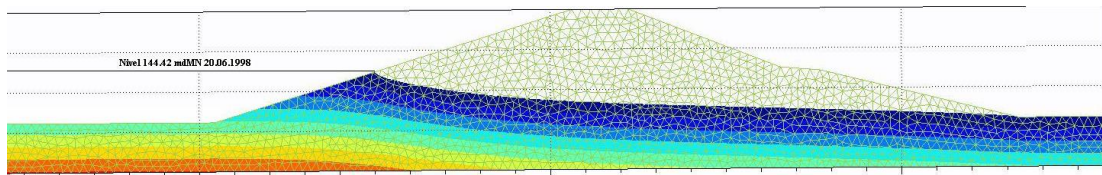


Figura 7.16 Distribuția presiunii apei în pori 20.06.1998 (4)

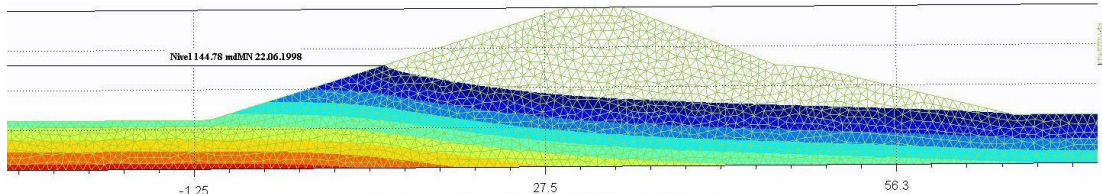


Figura 7.17 Distribuția presiunii apei în pori 22.06.1998 (5)

Concentrat în figura 7.18 sunt prezentate nivelurile apei în piezometrele amplasate la diferite distanțe de piciorul amonte în fiecare zi din intervalul de timp analizat. De remarcat faptul că efectul viiturii asupra nivelului apei în piezometrele apropiate de piciorul aval al barajului apar abia după 8 zile de la declanșarea viiturii.

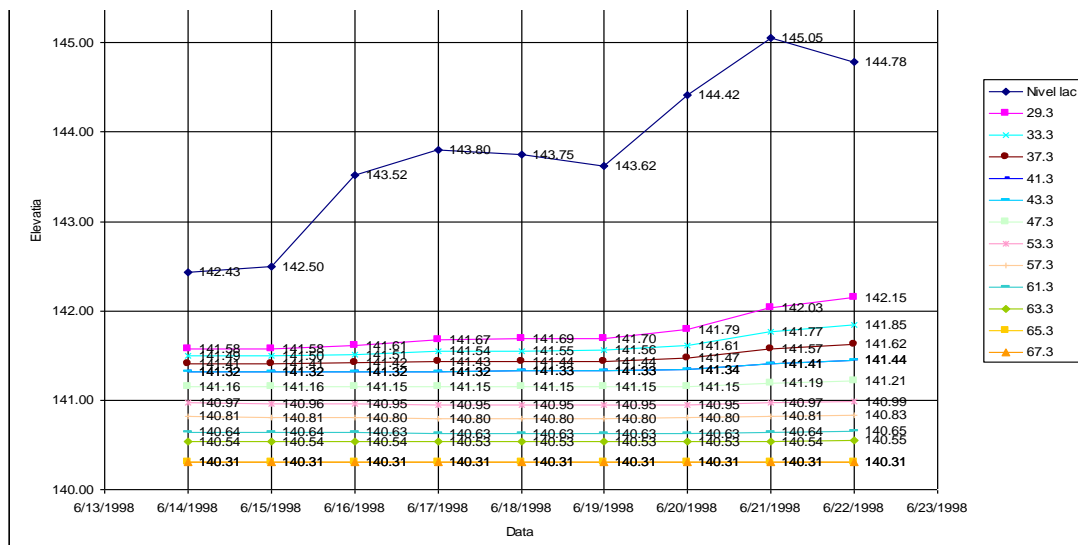


Figura 7.18 Variația nivelurilor apei în lac și piezometre la viitura din 1998



La analiza măsurătorilor efectuate la piezometre, trebuie avut în vedere că funcţionarea acestora este necorespunzătoare. Pentru a verifica tendinţele de variaţie a acestora a fost urmărit comportamentul forajelor din secţiunea III. Au fost eliminate din analiză piezometrele ale căror valori indicate sunt mai ridicate decât nivelul apei în lac.

În figurile 7.19-20 sunt prezentate rezultatele obţinute în urma calculului şi al măsurătorilor efective pentru piezometrele F3-5 şi F3-6, situate la o distanţă de 54.30 m, respectiv 61.00 m faţă de piciorul amonte al barajului.

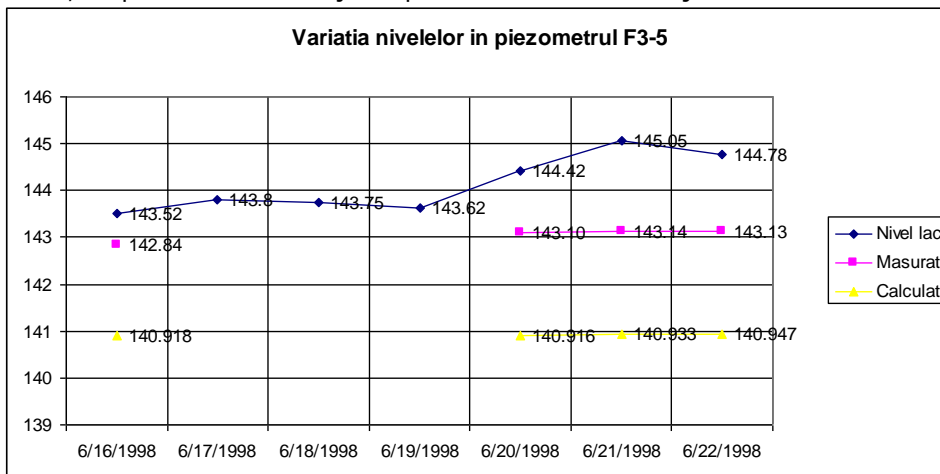


Figura 7.19 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-5 la viitura din 1998

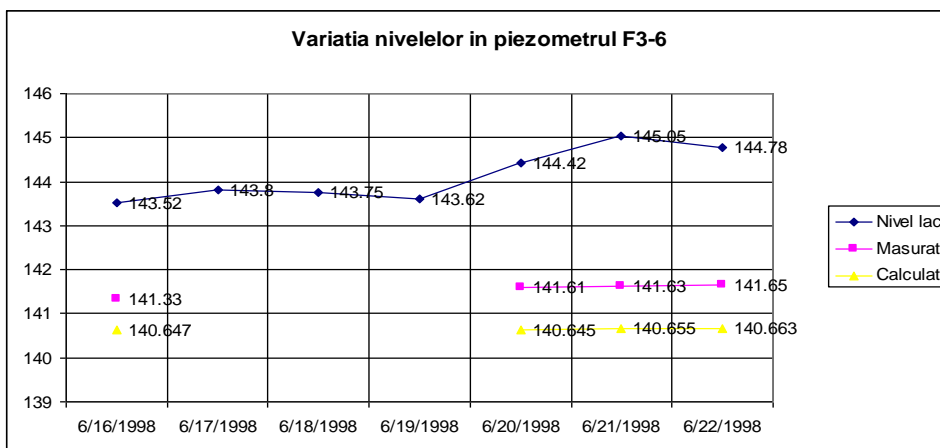


Figura 7.20 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-6 la viitura din 1998

Chiar dacă nivelurile citite sunt mai ridicate (ca valoare) relativ la cele calculate, tendința de variație înregistrată de la o zi la alta, indică faptul că modelul de calcul poate fi folosit la interpretarea comportării infiltrațiilor prin corpul barajului la viituri.

Influența factorului uman își face simțită prezența la citirile din forajul F3-5, în care modelul de calcul indică o tendință de creștere a nivelului la o zi după scăderea nivelului în lac (datorită inerției volumului de apă infiltrat pe parcursul

viitirii), pe când citirile par a fi făcute într-o oarecare măsură privind și variația nivelului apei în lac. Diferențele înregistrate se încadrează în marja de eroare admisă pentru acest tip de aparate de măsură. În forajul F3-6 măsurătorile efectuate păstrează această tendință de creștere a nivelului chiar și după trecerea vârfului de viitură.

Rezultatele obținute în calculul infiltrațiilor au fost introduse în programul GEO5, v 16 pentru determinarea modului în care evoluează starea de siguranță la stabilitate pe parcursul viitirii. Pentru determinarea suprafețelor periculoase de alunecare s-a folosit metoda Bishop.

Evoluția factorului de siguranță pe parcursul viitirii pentru taluzul amonte și aval, devine interesantă, mai ales în cazul în care la viituri diferite pentru același nivel se pot obține valori mult diferite. Pentru parametri folosiți în calcul stabilității, se obțin factori de siguranță mai mari de 1.5 indiferent de taluz și de poziția curbei de infiltrații.

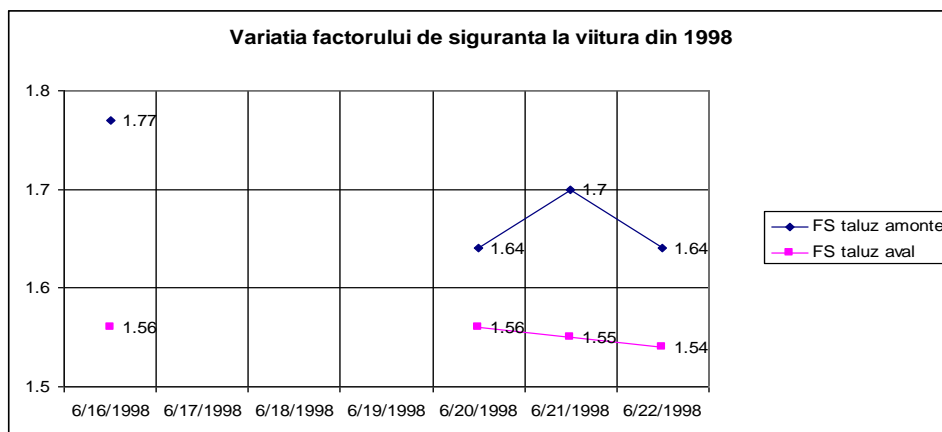


Figura 7.21 Evoluția factorului de siguranță la viitura din 1998

### 7.5.2. Viitura înregistrată în perioada 24.03.-9.04.2000

Această viitură este caracterizată printr-o perioadă îndelungată de niveluri ridicate în acumulare și de variații reduse de la o zi la alta. Nivelurile înregistrate au fost cuprinse între cotele 143.32 mdM și 145.15 mdM, cu creșterea nivelului timp de 8 zile, urmate de scăderea lui în următoarele.

Poziția curbelor de infiltrații obținute în diferitele etape ale viitirii este prezentată în figura 7.22.

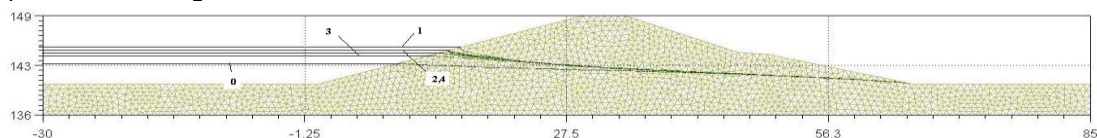


Figura 7.22 Evoluția curbei de infiltrații în timpul viitirii din 2000

Distribuția presiunilor în zona saturată este prezentată grafic în figurile 7.23-7.26.

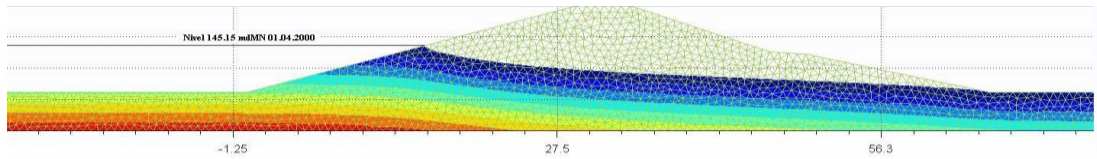


Figura 7.23 Distribuția presiunii apei în pori 01.04.2000 (1)

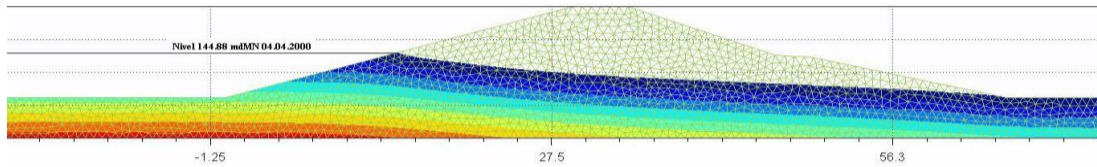


Figura 7.24 Distribuția presiunii apei în pori 04.04.2000 (2)

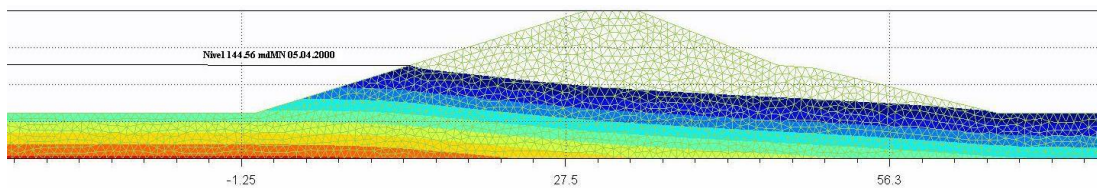


Figura 7.25 Distribuția presiunii apei în pori 05.04.2000 (3)

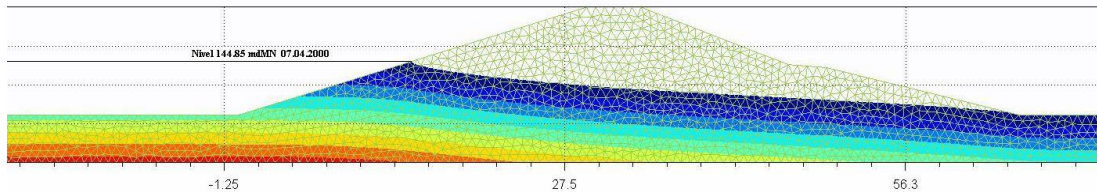


Figura 7.26 Distribuția presiunii apei în pori 07.04.2000 (4)

Pe parcursul unei viituri, urmărirea comportării barajului se face prin interpretarea măsurătorilor efectuate la piezometre, raportat la nivelul apei în lac.

Evoluția calculată a nivelurilor este surprinsă grafic în figura 7.27, piezometrele virtuale fiind situate la diferite distanțe față de piciorul amonte al barajului. Evoluția nivelurilor în corpul barajului indică o scădere a ritmului de creștere sau scădere raportată la variația din lac, concomitent cu creșterea distanțelor de măsurare înspre aval. Tendința de scădere a apei în lac nu înseamnă automat o scădere nivelului apei în piezometre, această tendință fiind sesizabilă cu cât ne îndepărtăm de lac înspre aval.

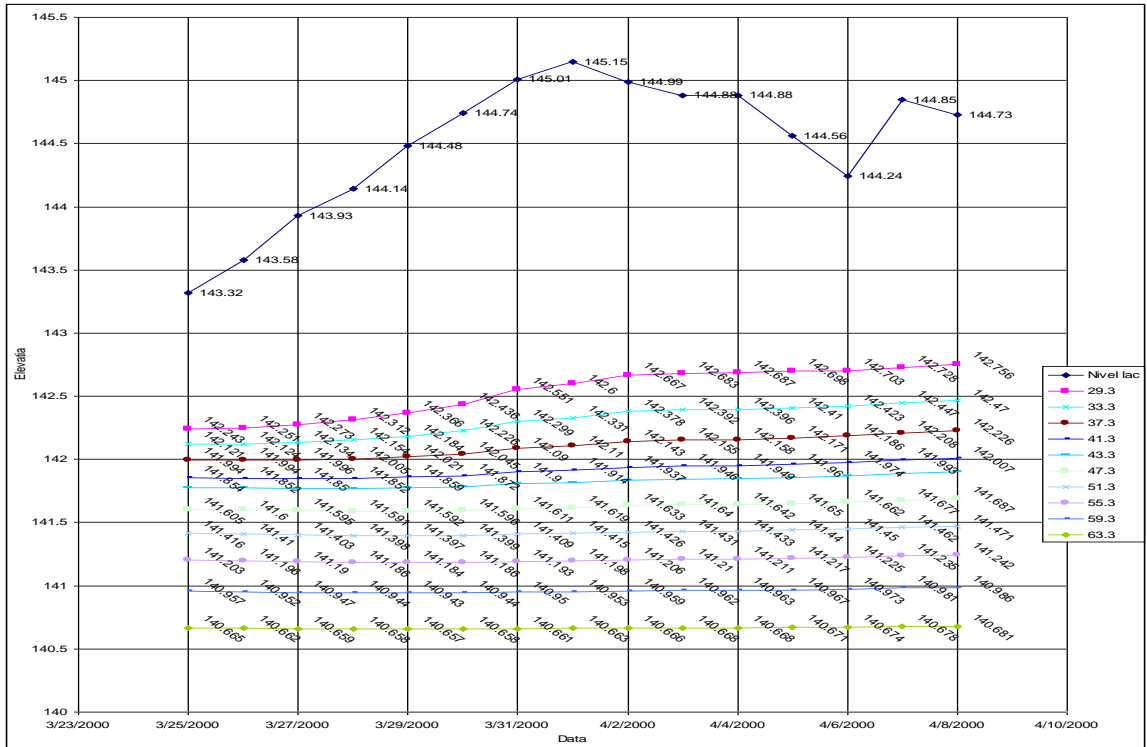


Figura 7.27 Variația nivelurilor apei în lac și piezometre la viitura din 2000

În cazul piezometrului F3-5, inerția mișcării apei din corpul barajului este observabilă între 06.04 și 08.04, când nivelul apei în lac scade și nivelul citit al apei în piezometru crește, așa cum dealtfel indică și calculele efectuate în regim nepermanent.

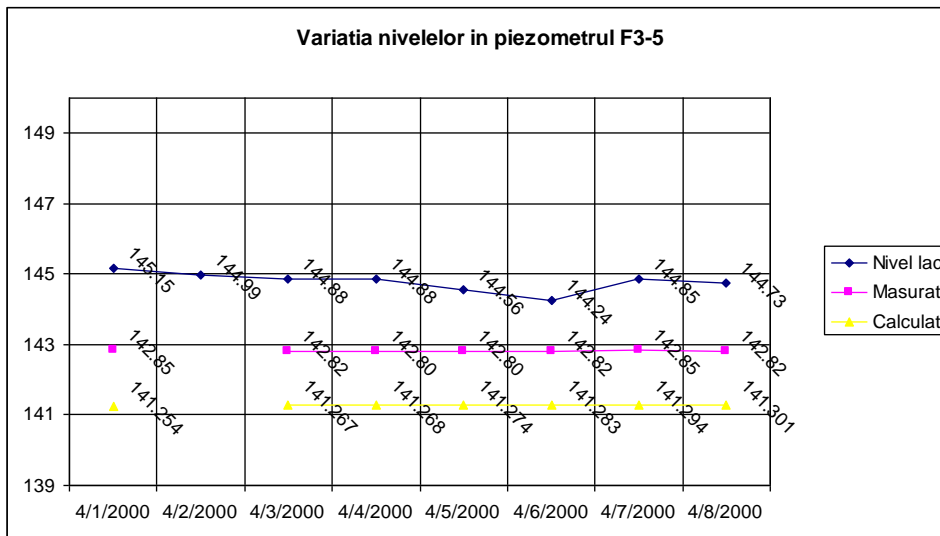


Figura 7.28 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-5 la viitura din 2000

În cazul piezometrului F3-6, la viitura din 2000 diferențele între valorile măsurate și calculate devin foarte mici și scad sub 0.50m, tendința de variație a nivelului calculat urmărește variația măsurată.

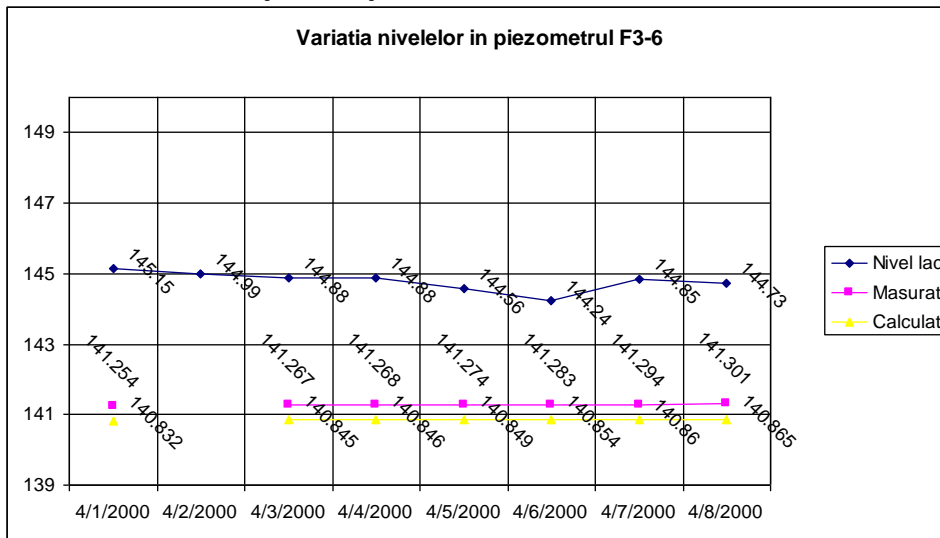


Figura 7.29 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-6 la viitura din 2000

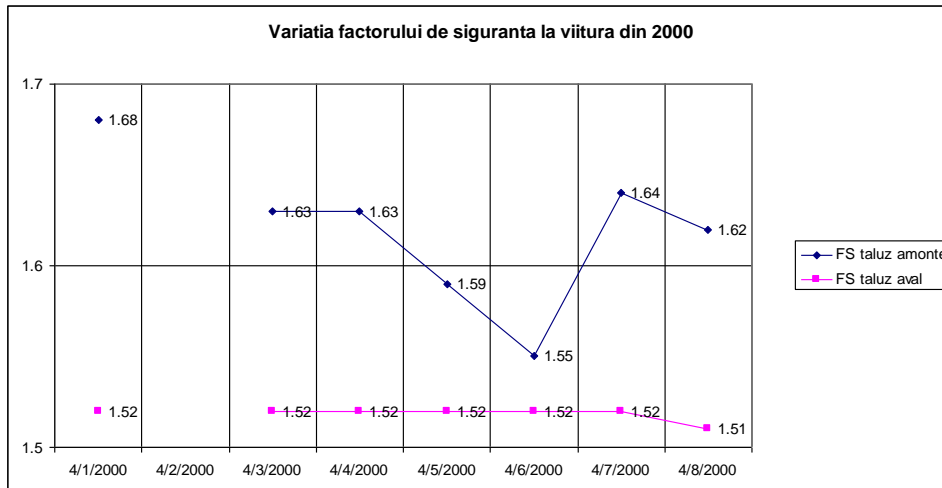


Figura 7.30 Evoluția factorului de siguranță la viitura din 2000

În figura 7.30 este prezentată evoluția stării de siguranță la lunecare a taluzelor amonte și aval. Evident pentru taluzul aval lucrurile nu diferă de la o zi la alta, chiar dacă durata viiturii este de 16 zile.

Pentru taluzul amonte scădere în două zile a nivelului apei în lac cu 0.60m, duce la o scădere destul de însemnată a factorului de siguranță pentru taluzul amonte de la 1.63 la 1.55.

## 7.5.3. Viitura înregistrată în perioada 02.03.-12.03.2001

Aceasta viitură este caracterizată de creștere bruscă pe parcursul a 2 zile a nivelului apei de la nivelul normal de retenție la valoarea de 146.11, mult peste cota de atenție; urmată de o revenire lentă a nivelului pe parcursul unei săptămâni.

În figura 7.31 este surprinsă poziția curbei de infiltrații în diferite momente ale viiturii de la poziția inițială marcată cu „0” la valori intermediare notate și prezentate în detaliu în figurile 7.32-7.35.

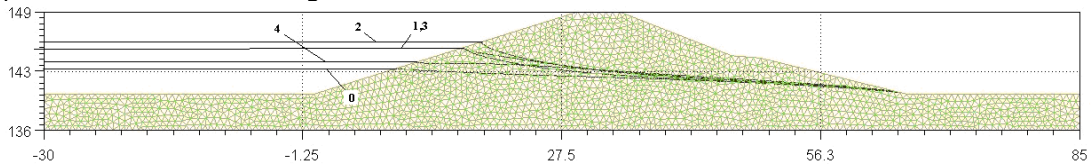


Figura 7.31 Evoluția curbei de infiltrații în timpul viiturii din 2001

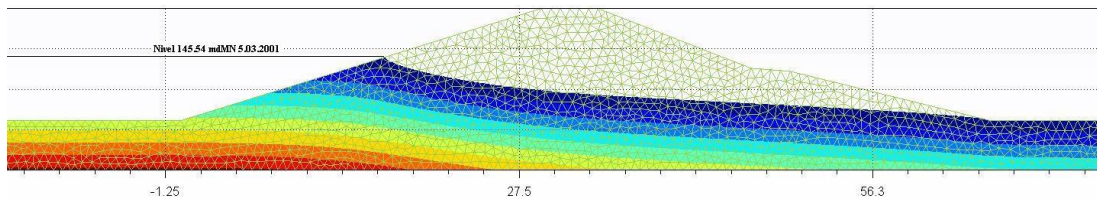


Figura 7.32 Distribuția presiunii apei în pori 05.03.2001 (1)

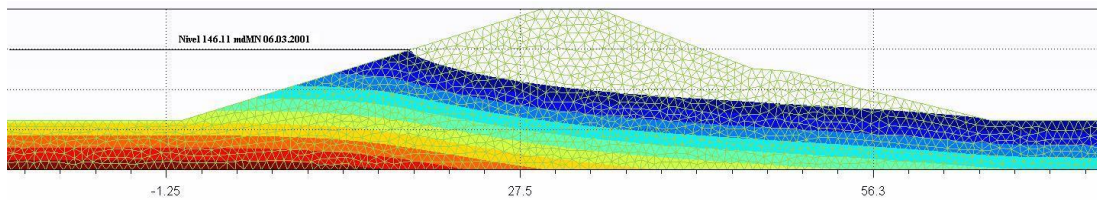


Figura 7.33 Distribuția presiunii apei în pori 06.03.2001 (2)

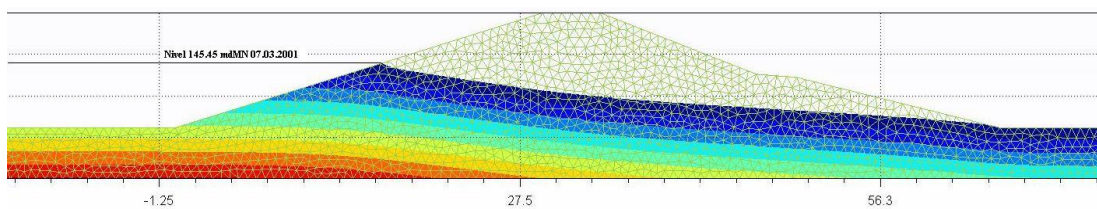


Figura 7.34 Distribuția presiunii apei în pori 07.03.2001 (3)



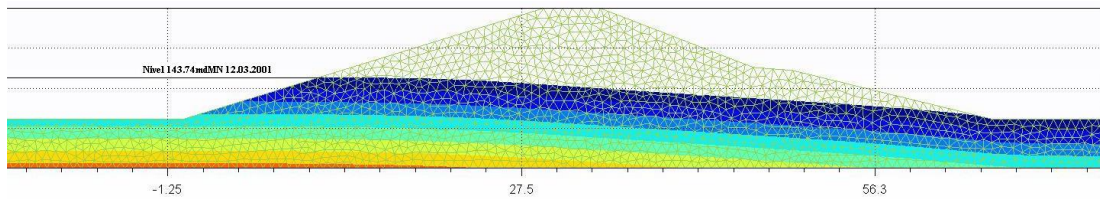


Figura 7.35 Distribuția presiunii apei în pori 12.03.2001 (4)

În figura 7.36 este de remarcat faptul că evoluția bruscă a nivelului cu 3 metri pe parcursul a două zile își face resimțit efectul chiar și în piezometrele din aval, la care se observă o creștere cu 3 cm. În piezometrele situate pe coronamentul barajului, această creștere produce o variație de aproximativ 1 metru, tendința de scădere a nivelului apei în lac producându-se cu două zile întârziere. În piezometrele situate la piciorul aval scăderea nivelului de la valoarea maxima nu are efect, tendința de creștere a nivelului, ca urmare a vârfului înregistrat în data de 06.03.2001 păstrându-se pe toată perioada analizată. Practic în toată zona aval de coronament, pentru piezometrele din zona taluzului aval se păstrează tendința de creștere a nivelului pe parcursul săptămânii de scăderi a nivelului apei în lac.

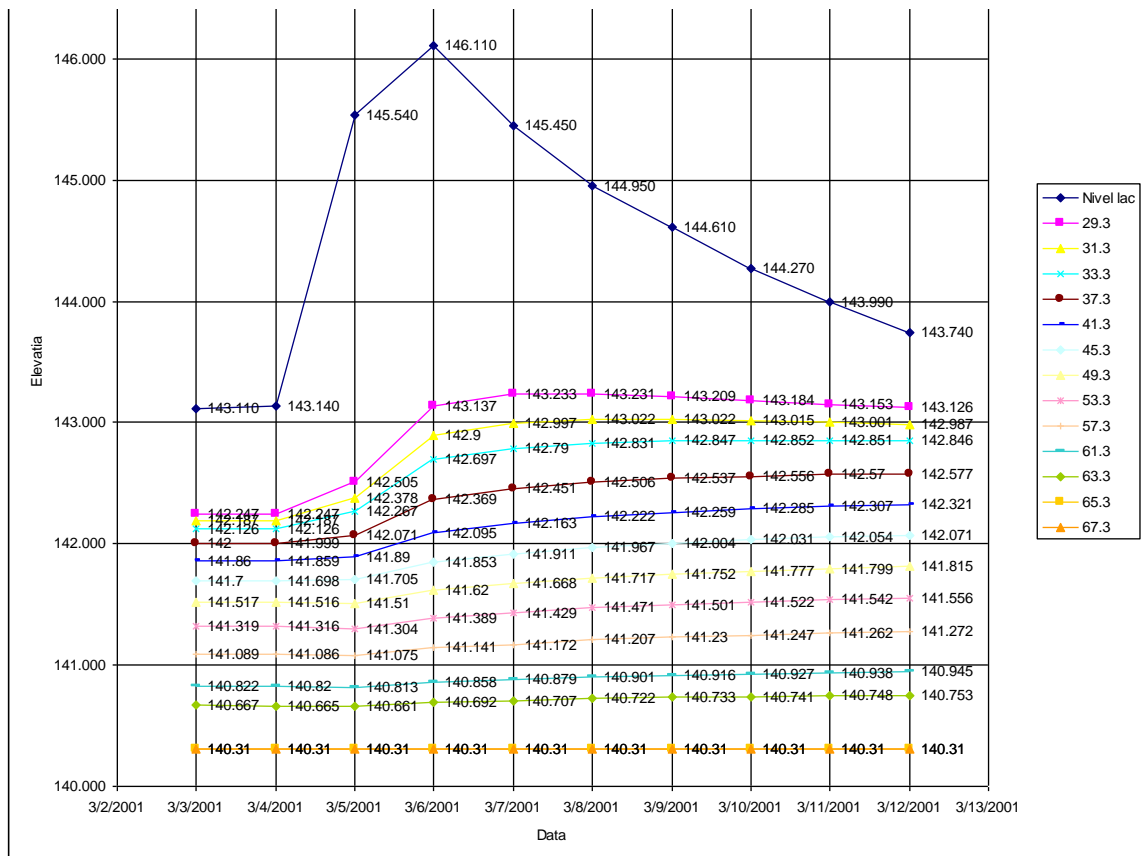


Figura 7.36 Variația nivelurilor apei în lac și piezometre la viitura din 2001

Analizând măsurătorile efectuate și prezentate în figura 7.37 și 7.38 se poate observa că citirile sunt în strânsă corelare cu variația nivelului apei în lac, chiar dacă calculele pentru viitura din 2001 indică o continuare a creșterii nivelului în piezometre și după intrarea viiturii pe curba descendentă.

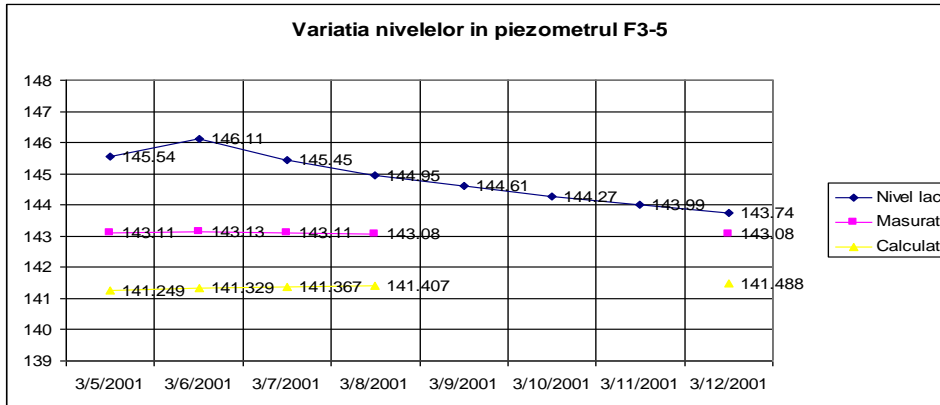


Figura 7.37 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-5 la viitura din 2001

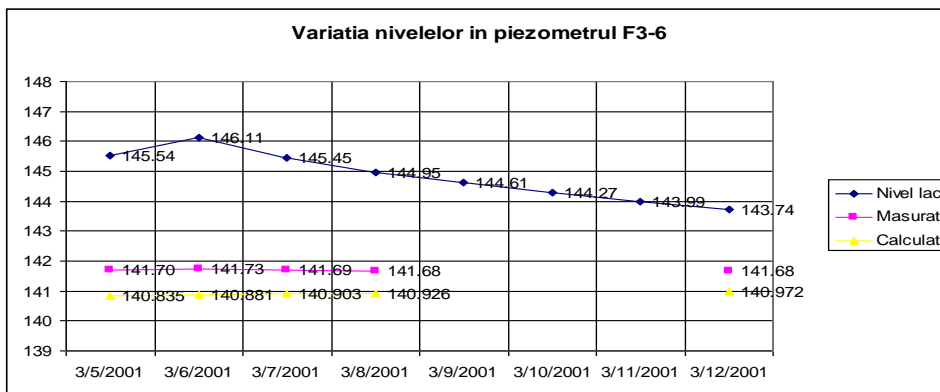


Figura 7.38 Variația nivelurilor apei în lac și în piezometrul F3-6 la viitura din 2001

În ceea ce privește stabilitatea taluzelor este de observat faptul că vârful viiturii nu reprezintă momentul critic, trecerea vârfului viiturii nu înseamnă neapărat că barajul este în siguranță.

Evident pentru taluzul amonte, stabilitatea scade odată cu scăderea nivelului, însă mai interesant este că tendința de creștere a nivelului infiltrațiilor în corpul barajului provoacă scăderea stabilității pentru taluzul aval și după trecerea pe scădere a nivelului apei în lac. Evoluția factorului de siguranță este prezentată în figura 7.39.



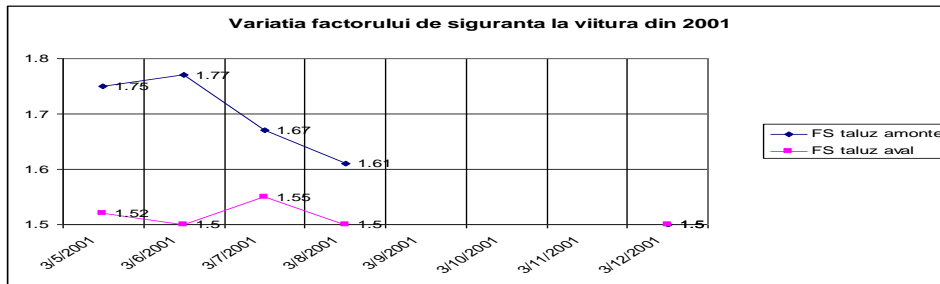


Figura 7.39 Evoluția factorului de siguranță la viitura din 2001

## 8. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

### 8.1. Concluzii

Problema comportării în exploatare a barajelor cu acumulări nepermanente în varianta transformării lor în acumulări permanente ridică o serie de probleme.

Experiența negativă avută cu barajul de la Vârșolț, unul din cazurile bine cunoscute, ce se apropie de subiectul tezei și care a stat la baza elaborării acestei lucrări, trebuie să fie analizată din toate punctele de vedere și trase concluziile de rigoare, fără a considera subiectul permanentizării acumulărilor unul închis.

Cunoașterea modului în care funcționează acest tip de lucrări și capacitatea de a anticipa modul de comportare a lucrărilor, ne poate încuraja în luarea unor decizii corecte în acest sens.

Este evident că problema infiltrațiilor, în condițiile unor medii nesaturate ridică câteva probleme de ordin tehnic și logistic. Parametri necesari la efectuarea calculului infiltrațiilor prin metoda elementului finit necesită o serie de măsurători și determinări de laborator costisitoare, greu de efectuat și mari consumatoare de timp.

În faza de proiectare și concepere a unor lucrări de acest tip, pentru a modela și calcula infiltrațiile nepermanente, există deja în literatura de specialitate date statistice, suficiente pentru face acest tip de calcul abordabil. Programele de calcul disponibile în acest moment au devenit accesibile din punct de vedere financiar, dezvoltarea unora proprii nu este imposibilă, tehnica de calcul permite un volum de calcul considerat imposibil de realizat în urmă cu câțiva ani; toate aceste îmi permit să cred, sau să sper că pe viitor toate tipurile de baraje din pământ și nu numai, indiferent de înălțime și importanță să beneficieze încă din faza de proiectare și mai apoi în cea de exploatare de calcule și modelări nepermanente complexe care să nu lase locul apariției unor surprize sau incertitudini.

Lipsa de cunoaștere, lipsa de resurse financiare generează în acest moment o stare de incertitudine în legătură cu siguranța lucrărilor aflate în faza de exploatare.

În momentul în care citirile efectuate la aparatura specifică de control indică valori mult diferite de modelul de calcul intervine o prudență excesivă, prudență ce poate duce la o scădere a gradului de atenuare a viiturilor datorită deschiderii suplimentare a descărcătorilor, în dorința de a "pune în siguranță" barajul, acest lucru poate duce la producerea de pagube inutile în aval.

Această prudență poate să conducă la demararea unor investiții foarte scumpe de tipul impermeabilizărilor sau elemente drenante supradimensionate.

În capitolul de modelare a infiltrațiilor am arătat modul în care se propagă apele de infiltrații în corpul barajelor din pământ, felul în care nivelele în piezometrele situate în zona aval își continuă tendința de creștere, chiar și după trecerea vârfului de viitură.

Acest lucru înseamnă că starea de siguranță critică pentru taluzul aval nu se suprapune cu vârful de viitură și că nimeni nu poate răsufla ușurat odată cu trecerea vârfului.

Mișcarea permanentă la nivele înregistrate pe parcursul viiturilor, este foarte greu de atins în cazul barajelor cu folosințe adăugate pe parcurs, deci calculul și estimarea stabilității în cazul scăderilor bruște de nivel trebuie să aibă în vedere aceste aspecte.

Elementele drenante de la piciorul aval trebuie calculate astfel încât să coboare zona saturată de sub influența înghețului pentru nivele normale de retenție.

Evident, dacă se consideră stări permanente de mișcare la diferite momente ale viiturii, dimensiunea saltei drenante rezultă excesiv de mare și foarte scumpă, iar aceasta nu va face altceva decât să ducă la o creștere a debitelor infiltrate.

Având în vedere că aceste tipuri de baraje au în spate acumulări de mici dimensiuni, creșterea debitelor infiltrate justificată de coborârea curbei de infiltrații pentru nivele mai mari decât cele normale de retenție sunt nefondate și duc la o scădere a eficienței investiției.

## 8.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale cu privire la tematica comportării în exploatarea a barajelor cu acumulări permanente în varianta transformării lor în acumulări permanente sunt:

- identificarea la nivel național a barajelor cu potențial de permanentizare, clasificarea acestora în funcție de înălțime, după tipul barajului, după noile norme ICOLD etc.;
- scrierea unor algoritmi de calcul pentru toate tipurile de infiltrații: infiltrații permanente prin medii saturate, infiltrații permanente prin medii nesaturate, mișcare nepermanentă prin medii saturate și infiltrațiilor nepermanente prin medii nesaturate;
- studiul infiltrațiilor nepermanente pentru secțiunile propuse de normele americane, pentru înălțimea de 2, 5 și 10 metri, în varianta cu sau fără saltea drenantă, diferențiat pentru cinci clase principale de pământuri, în ipoteza exploatarea acumulărilor permanente și nepermanente;
- compararea rezultatelor obținute la infiltrațiile nepermanente cu cele obținute prin metodele clasice ce tratează infiltrațiile ca o pe o succesiune de stări permanente;
- estimarea modului de evoluție a curbei de infiltrații în timp, pentru baraje de 2, 5 și 10 metri cu și fără soluție drenantă, pentru tipurile principale de pământuri ce se pretează la construcția barajelor omogene de pământ;
- compararea rezultatelor obținute în calculul infiltrațiilor nepermanente pentru diferite moduri de exploatare a acumulărilor;
- studiul stabilității la lunecare pentru taluzul amonte și aval pentru baraje cu acumulare permanentă sau nepermanentă, în soluție constructivă drenată

- sau nedrenată, cu înălțimea de 2, 5 și 10 metri, în majoritatea situațiilor întâlnite în exploatarea curentă;
- studiu de caz cu privire la comportarea în exploatarea a barajului omogen din pământ de la Călinești Oaș, care chiar dacă nu se încadrează în categoria barajelor mici, este supus unei urmăriri riguroase a comportării și are probleme cu privire la exploatarea tocmai datorită incertitudinilor ce apar la evaluarea infiltrațiilor;
  - elaborarea unor modele de variație a nivelelor în piezometrele barajului de la Călinești Oaș, pentru trei viituri înregistrate, care pot fi considerate ca fiind viituri tipice, întâlnite în secțiunea Călinești Oaș a râului Tur.

### **8.3. Direcții pentru cercetări viitoare**

Pe parcursul elaborării tezei de doctorat, o serie de probleme interesante au fost abandonate pentru a concentra eforturile mele la rezolvarea temei principale. Odată cu finalizarea acestei etape din scurta mea cariera de inginer, începe una nouă, în care am selectat câteva teme ce mi s-au părut deosebit de interesante, și pe care abia încă aștept să le aprofundez. Dintre ele aș dori să amintesc doar câteva:

- dezvoltarea programului de calcul pentru elemente de orice tip, eliminarea limitărilor impuse de limbajul de programare Pascal, prin migrarea la un alt limbaj de programare, care să permită și adaptarea interfaței de lucru la diverși utilizatori;
- dezvoltarea și optimizarea algoritmilor de calcul pentru rezolvarea mai eficientă a problemei infiltrațiilor nepermanente;
- înființarea unui laborator pentru determinarea caracteristicilor de calcul pentru pământuri nesaturate;
- realizarea unor harti de risc a cursurilor de apă interioare îndiguite, găsirea unor corelații între elementele hidrologice, geologia zonei;
- aprofundarea mecanicii terenurilor nesaturate în vederea aplicării cunoștințelor în rezolvarea stabilității, stării de eforturi și a deformațiilor pentru masive din pământ.

## BIBLIOGRAFIE

- 1 A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Mongor. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 2 American Society for Testing and Materials, ASTM D-2487, "Standard Classification of Soils for Engineering
- 3 Atkinson J., The Mechanics of Soils and Foundations [Book]. - [s.l.]: Taylor&Francis, 2007
- 4 ASTM Annual Book of Standards, Volume 04.08 on Soil and Rock, Section 4 - Construction, West Conshohocken, PA, 1996.
- 5 Bachmat, Y., B. Andrews, D. Holtz, S. Sebastian, Utilization of Numerical Groundwater Models for Water Resource Management, Report No. EPA -600/8-78-012, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK 74820, 1978.
- 6 Bear, J., Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier, New York, 1972.
- 7 Bear, J., Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, New York, 1979.
- 8 Bishop A.W., The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes, Geotechnique 5 (1955) 7-17.
- 9 Braja M. Advanced Soil Mechanics, Third edition, Taylor & Francis, London, 2007
- 10 Brooks, R.H., and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Pap. no. 3. Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- 11 Brutsaert, W. 1966. Probability laws for pore-size distributions. Soil Sci. 101:85.92.
- 12 Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. 198:71.77.
- 13 Bureau of Reclamation (1987) - Design of Small Dams, United States Department of the Interior, A Water Resources Technical Publication;
- 14 Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. Soil Sci. 117:311.314.
- 15 Carsel, R.F., and R.S. Parrish. 1988. Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics. Water Resour. Res. 24:755.769.
- 16 Casagrande, A., Seepage Through Dams, in Contribution to Soil Mechanics 1925-1940, Boston Soc. of Civ. Eng., Boston, p. 295, 1937.
- 17 CEMAGREF (2002) - Small Dams - Guidelines for Design, Construction and Monitoring, French Committee on Large Dams;
- 18 Chan, H. T., and T. C. Kenney, Laboratory Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard Varved Clay, Can. Geotech. J., vol. 10, no. 3, pp. 453-472, 1973.
- 19 Childs, E.C., and N. Collis-George. 1950. The permeability of porous materials. Proc. R. Soc. London, Ser. A. 201:392.405.
- 20 CHIOREAN C.G., <http://bavaria.utcluj.ro/~ccosmin>: Metoda elementului finit. Note de curs online. Metoda elementului finit. Note de curs online [Online]. - 08 16, 2011. - <http://bavaria.utcluj.ro/~ccosmin>.
- 21 CHINCOLD (1979) - Dam Construction by the Chinese People, The Chinese National Committee on Large Dams;.
- 22 Cook, R. D., Concepts and applications of finite element analysis, 2, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- 23 CSN 752410 (1997) - "Small Water Reservoirs", Czech Republic Standard CSN 752410.
- 24 Darcy, H., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris, 1856.

- 25 Dhatt, G., G. Touzot, *The Finite Element Method Displayed*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- 26 DAST - Raport anual UCC Calinesti, Cluj Napoca 2004
- 27 Dupuit, J., *Etudes theoriques et Practiques sur le Mouvement des eaux dans les Canaux Decouverts et a travers les Terrains Permeables*, Dunot, Paris, 1863.
- 28 Dunnycliff, J. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1988.
- 29 DURAND JM, ROYET P, MÉRIAUX P (2002) – *Technique des Petits Barrages en Afrique Sahélienne et Équatoriale*, Cemagref Editions.
- 30 Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour. Res.* 30:211.223.
- 31 ER 1110-2-1908, *Instrumentation of Embankment Dams and Levees*, US Army Corps of Engineers, 1995.
- 32 EVALUAREA STĂRII DE SIGURANȚĂ ÎN EXPLOATARE A BARAJULUI VÂRȘOLȚ, județul Sălaj, S.C. PREFCON SRL Timișoara
- 33 Expertiza stării de siguranță a Acumulării Vârșolț, SC POLIASCAS SA, Iași
- 34 Fellenius W., Verlag W, *Erdstatische Berechnung mit Reibung und Kohasion (Adhesion) unter Annahme kreiszylindrischer Kreis-flachen* [Book]. - Berlin: Ernst & Sohn, 1926.
- 35 FLAC manual, Itasca Consulting Group Inc., 1995
- 36 Freeze, R. A., J. A. Cherry, *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1979.
- 37 Fredlund, D.G. and H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley, 1993.
- 38 Fredlund, D., *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- 39 French Committe on Dams and Reservoirs (1997) *Guidelines for Design, Construction, and Monitoring*. Coordinator Gerard Degoutte. ISBN 2-85362-448.
- 40 Gardner, W.R. 1956. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20:151.153.
- 41 Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85:228.232.
- 42 Gilboy, G., *Mechanics of Hydraulic Fill Dams*, în *Contribution to Soil Mechanics 1925–1940*, Boston Soc. of Civ. Eng., Boston, 1934.
- 43 *Groundwater Module în Slide 2D finite element program for groundwater analysis*, Verification Manual, Rocscience Inc.
- 44 Gupta, S. K., K. K. Tanki, *A three-dimensional Galerkin finite element solution of flow through multiaquifers în Sutter Basin, California*, *Water Resources Research*, 12(2), 155–162, 1976.
- 45 Harr, M. E., *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill, New York, 1962.
- 46 <http://geuz.org/gmsh/>
- 47 [http://www.finesoftware.eu/geotechnical-software/slope-stability/Geotechnical software suite Geo 5, User's guide](http://www.finesoftware.eu/geotechnical-software/slope-stability/Geotechnical%20software%20suite%20Geo%205,%20User's%20guide) [Book]. - 2010.
- 48 [http://www.mmediu.ro/gospodarirea\\_apelor/baraje\\_rapoarte.htm](http://www.mmediu.ro/gospodarirea_apelor/baraje_rapoarte.htm)
- 49 Huyakorn, P. S., G. F. Pinder, *Computational Methods în Subsurface Flow*, Academic Press, New York, 1983.
- 50 ICCPDC – *Studiul comportării în timp a barajului de pământ Călinești Oaș*, 1978-1979
- 51 ICOLD (1993) – *Embankment Dams Upstream Slope Protection / Barrages en Remblai Protection du Talus Amont*, Bulletin 91.
- 52 ICOLD (2005) – *Risk Assessment în Dam Safety Management / Évaluation du Risque dans la Gestion de la Sécurité du Barrage*, Bulletin 130.

- 53 ICOLD (2007) – Dam Surveillance / La Surveillance des Barrages, TCDS Draft Bulletin No 1 (Rev. 0 - Fev 2007).
- 54 ICOLD (2011) SMALL DAMS Design, Surveillance and Rehabilitation
- 55 Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Riverside, CA. 11.13 Oct. 1989. Univ. of Calif., Riverside, CA.
- 56 Institutul de studii și proiectari hidrotehnice-Accidente la constructii hidrotehnice,Bucuresti,1984
- 57 J. D. Istok, Groundwater Modeling by the Finite Element Method, American Geophysical Union as part of the Water Resources Monograph Series, Volume 13
- 58 J SIDRE (2006) – The Guidelines for Designing of Agricultural Land Improvement Projects, "Tameike Small Dams", Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, February 2006.
- 59 Javandel, I., C. Doughty, C. F. Tsang, Groundwater Transport: Handbook of Mathematical Models, Water Resources Monograph 10, American Geophysical Union, Washington, D. C., 1984.
- 60 Javandel, I., P. A. Witherspoon, Application of the finite element method to transient flow în porous media, Society of Petroleum Engineers Journal, 8(3), 241–252, 1968.
- 61 Kosugi, K. 1999. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal poresize distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:270.277.
- 62 Lapidus, L., G. F. Pinder, Numerical Solution of Partial Differential Equations în Science and Engineering, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- 63 Leij, F.J.,W.J. Alves, M.Th. van Genuchten, and J.R.Williams. 1996. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database. Res. Rep. 600 R-96 095. USEPA, Cincinnati, OH.
- 64 LEWIS, B. (2002) – Farm Dams – Planning, Construction and Maintenance, National Library of Australia Cataloguing;
- 65 Luckner, L., M.Th. van Genuchten, and D.R. Nielsen. 1989. A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids în the subsurface. Water Resour. Res. 25:2187.2193.
- 66 Maadooliat, R., 1983, Element and Time Step Criteria for Solving Time - Dependent Field Problems Using the Finite Element Method, Ph.D Thesis, Michigan State University.
- 67 Meyer, C., Solution of linear equations - state of the art, Journal of the Structural Division, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 99(ST7), 1507–1526, 1973.
- 68 Milly, P.C.D. 1987. Estimation of Brooks-Corey parameters from water retention data. Water Resour.Res. 23:1085.1089.
- 69 Mitchell, A. R., D. F. Griffiths, The finite difference method în partial differential equations, Wiley, New York, 1980.
- 70 Mualem, Y. 1976a. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12:513.522.
- 71 Mualem, Y. 1976b. A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils. Proj. 442. Technion-Israel Inst. of Technol., Haifa, Israel.THE SOIL SOLUTION PHASE 17
- 72 Mualem, Y. 1986. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. p. 799.823. In
- 73 Mualem, Y., and G. Dagan. 1978. Hydraulic conductivity of soils: Unified approach to the statistical models. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:392.395.
- 74 Muresan O.C. Contribuții privind calculul stabilității versanților, teza de doctorat, 2012

- 75 Neuman, S. P., Saturated-unsaturated seepage by finite elements, Proceedings American Society of Civil Engineers, 99(HY12), 2233-2250, 1973.
- 76 Pachepsky, YA.A., E.V. Mironenco, and R.A. Shcherbakov. 1992. Prediction and use of soil hydraulic properties. p. 203.212. în M.Th.
- 77 Pavlovsky, N. N., Seepage Through Earth Dams (in Russian), Inst. Hidrotehniki I Melioratsii, Leningrad, 1931.
- 78 PIETRARU V. - "Calculul infiltrațiilor", Editura Ceres, București, 1977
- 79 Pinder, G. F., E. O. Frind, Application of Galerkin's procedure to aquifer analysis, Water Resources Research, 8(1), 108-120, 1972.
- 80 Pinder, G. F., J. D. Bredehoeft, Application of the digital computer for aquifer evaluation, Water Resources Research, 4, 1069-1093, 1968.
- 81 Pinder, G. F., W. G. Gray, Finite Element Simulation în Surface and Subsurface Hydrology, Academic Press, New York, 1977.
- 82 Popa A., Fărcaș V., Geotehnică [Book]. - Cluj-Napoca: UT Press, 2004
- 83 Popovici, A-Baraje pentru acumulari de apa-Editura Tehnica, Bucuresti, 2002
- 84 Prickett, T. A., 1975, Modeling techniques for groundwater evaluation, Advances în Hydroscience 10, Academic Press, New York, 1 -143.
- 85 Priscu, R-Constructii hidrotehnice, Editura Didactica și Pedagogica, Bucuresti, 1974
- 86 Punerea în siguranța a acumulării Varsolt, județul Sălaj SC Aquaproiect SRL
- 87 Reeves, M., J. O. Duguid, Water movement through saturated - unsaturated porous media: A finite-element Galerkin model, ORNL-4927, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37830., 1975.
- 88 Remson, I., G. M. Hornberger, F. J. Molz, Numerical Methods în Subsurface Hydrology with an Introduction to the Finite Element Method, John Wiley & Sons, New York, 1971.
- 89 Richards, L.A. 1931. "Capillary conduction of liquids through porous mediums". Physics 1 (5)
- 90 Roman F., Aplicații de Inginerie Geotehnică [Book]. - Cluj-Napoca: Papyrus Print, 2011.
- 91 Ross, P.J., and K.R.J. Smettem. 1993. Describing soil hydraulic properties with sums of simple functions. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:26.29.
- 92 Rossi, C., and J.R. Nimmo. 1994. Modeling of soilwater retention from saturation to oven dryness. Water Resour. Res. 30:701.708.
- 93 Russo, D. 1988. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. Water Resour. Res. 24:453.459.
- 94 Segerlind, L. J., Applied Finite Element Analysis, 2, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- 95 SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P. (1985) - "Filters and Leakage Control în Embankment Dams", Proc. Symposium on Seepage and Leakage from Dams, ASCE.
- 96 SMEC (2006) - Draft Guidelines for Managing Small Dams, SMEC Australia Pty Ltd, Guide developed on behalf of The Republic of Uganda.
- 97 Stanciu A., Lungu I.-Fundații I, Fizica și Mecanica Pământurilor-Editura Tehnică București, 2006
- 98 SR EN 1997-1 Eurocod 7 Proiectarea geotehnică, Partea 1: Reguli generale [Book]. - 2004
- 99 Subbaraju, B. H., Field Performance of Drain Wells Designed Expressly for Strength Gain în Soft Marine Clays, Proc. 8th Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng., vol. 2.2, pp. 217-220, 1973.
- 100 Taylor, D. W., Fundamentals of Soil Mechanics, Wiley, New York, 1948.



- 
- 101 Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics, Wiley, New York.
- 102 Terzaghi, K., and R. B. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York, 1948.
- 103 Terzaghi K., and Peck, R. B. Soil mechanics in engineering practice. 2nd., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- 104 URMĂRIREA COMPORTĂRII CONSTRUCȚIILOR LA ACUMULAREA VÂRȘOLȚ, Raport UCC 2007 DAST.
- 105 van Genuchten, M.Th., and D.R. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. Ann. Geophys. 3:615.628. 18 CHAPTER 3
- 106 van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and L.J. Lund. 1992. Proc. Int.Worksh., Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Riverside, CA. 11.13 Oct. 1989. Univ. of Calif., Riverside, CA.
- 107 van Genuchten, M.Th., F.J. Leij, and S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Res. Rep. 600 2.91 065. USEPA, Ada, OK.
- 108 van Genuchten et al. (ed.) Proc. Int. Worksh., Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Riverside, CA. 11.13 Oct. 1989. Univ. of Calif., Riverside.
- 109 van Genuchten, R. 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model. Res. Rep. 78-WR-08. Princeton Univ., Princeton, NJ.
- 110 Vogel, T., and M. Císlarová. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. Transp. Porous Media. 3:1.15.
- 111 Wraith, J.M., and D. Or. 1998. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. J. Nat. Resour. Life Sci. Educ. 27:13.19.
- 112 Yates, S.R., M.Th. van Genuchten, A.W.Warrick, and F.J. Leij. 1992. Analysis of measured, predicted, and estimated hydraulic conductivity using the RETC computer program. Soil Sci. Soc. Am. J. 56:347.354.