

Universitatea Maritimă din Constanța
Facultatea de Electromecanică Navală
Catedra de Inginerie Mecanică Navală

Ing. Ovidiu Sorin CUPȘA

TEZĂ DE DOCTORAT

**Contribuții la stabilirea mecanismului interacțiunii statice și
dinamice dintre apă și structurile hidrotehnice**

Conducător științific,

Prof. Dr. Ing. Dumitru DINU

2010

CUPRINS

Introducere	7
 Importanța, oportunitatea și obiectivele lucrării	7
 Abordarea tematicii și modul de validare al rezultatelor	9
 Gratitudine	13
1. Considerații generale	15
1.1 Construcțiile hidrotehnice și dezvoltarea civilizație umane.....	15
1.2 Importanța cunoașterii apei în natură	28
1.2.1 Apele subterane	28
1.2.2 Apele de suprafață	32
1.2.3 Caracteristicile apei de mare	32
1.3 Bazinele hidrografice	34
1.3.1 Caracteristici principale ale cursurilor de apa	37
1.3.2 Viteza de curgere	40
1.3.3 Secțiunea de curgere	41
1.3.4 Debitul de apă	42
1.3.5 Puterea unui curs de apă	43
1.4 Acțiunea apei mării asupra construcțiilor hidrotehnice de coastă	44
2. Metode de studiu ale acțiunii apei asupra construcțiilor	
 hidrotehnice	49
2.1 Metoda infinitezimală	49
2.2 Metoda analizei dimensionale	50
2.3 Metoda valorilor medii	51
2.4 Metoda coeficienților experimentali	52
2.5 Metoda analogilor	52
2.6 Metoda modelării hidraulice – similitudinea	55

2.7 Metoda statistică	57
2.8 Calculul computerizat al curgerii fluidelor	57
2.9 Metode de cercetare utilizate în teză	59
 3. Structuri hidrotehnice actuale. Canalul Dunăre-Mare Neagră	61
3.1 Generalități	61
3.2 Modificări morfologice pe Dunăre în regim barat și îndiguit	62
3.3 Studii hidraulice pe model	68
3.3.1 Condițiile experimentărilor	68
3.3.2 Cinematica curgerii apei în zona nodului hidrotehnic Cernavoda, amonte și aval	71
3.3.3. Fenomene hidraulice în timpul ecluzărilor	74
3.4 Concluzii	79
 4. Forțele care acționează asupra structurilor hidrotehnice	83
4.1 Diagrama forțelor	83
4.2 Modelarea matematică	85
4.3 Forțe hidrostatice	85
4.4 Forțe hidrodinamice	87
4.4.1 Vânt	87
4.4.2 Curent	88
4.4.3 Valuri	89
4.5 Forțe de interacțiune cu navele	91
4.5.1 Navă – fund	91
4.5.2 Navă – perete (mal, dig)	92
4.5.3 Navă perete și fund (canal)	92
4.5.4 Coliziune	93
 5. Modelarea acțiunii forțelor asupra structurilor hidrotehnice	95
5.1. Simulatorul FLUENT	95
5.2. Acțiunea vântului asupra părții emerse a digului	98

5.3. Acțiunea curentului asupra părții imerse a digului	100
5.4 Acțiunea valului asupra digului	102
5.5 Calculul forțelor pe modele la scară	107
5.3.1 Modelarea curgerii printr-un dig (baraj) rupt	107
5.3.2 Modelarea acțiunii curentului asupra digului	114
5.6 Concluzii	118
 6. Similitudinea la două scări a digurilor	121
 6.1 Legea modelului	121
6.2 Stabilirea scărilor mărimilor fizice	123
6.3 Modelarea curgerii pe model	124
6.4 Modelarea curgerii în natură	128
6.5 Concluzii	128
 7. Determinarea vitezei nivelului de lichid din ecluză la o variație liniară a debitului din conducta de umplere (golire)	131
 7.1 Expunerea problemei	131
7.2 Utilizarea potențialului vector în studiul curgerii fluidelor.	132
7.3 Gradientul de presiune în cazul variației liniare a debitului	137
7.4 Viteza nivelului de lichid	140
7.5 Determinarea debitului necesar pentru o viteză constantă, impusă, a nivelului apei din ecluză	143
7.6 Concluzii	145
 8. Contribuții personale și direcții de continuare a cercetărilor	147
 9. Concluzii finale	153
 Bibliografie	159

Introducere

Lucrarea de față se referă, cu precădere, la acțiunea hidrostatică și hidrodinamică a apei asupra construcțiilor hidrotehnice destinate transportului naval pe apele interioare: diguri, canale, cheiuri portuare, ecluze. Vom trata și unele aspecte legate de structurile hidrotehnice marine, în special când discutăm despre căile navigabile de legătură între fluvii și mare (canale, ecluze). Vom încerca o abordare unitară și cât mai completă a acțiunii apei asupra acestor structuri în vederea îmbunătățirii datelor și procedurilor de proiectare. Pentru a avea o imagine completă ne vom referi și la acțiunea vântului, dar și a navelor sau a altor obiecte plutitoare care intră în coliziune cu structura fluvială sau maritimă.

Abordările teoretice trebuie confirmate sau corectate de încercări experimentale. Transpunerea rezultatelor de pe model în natură este o întreprindere complicată mai ales când modelul, datorită marilor diferențe dintre dimensiunile sale (cum este cazul digurilor lungi), nu este construit la o singură scară.

Acțiunea se manifestă prin forțe și momente, de natură statică și dinamică, aplicate continuu sau aleator.

Importanța, oportunitatea și obiectivele lucrării

Transportul naval, maritim și fluvial, a avut, are și va avea o deosebită importanță în dezvoltarea societății umane. Pentru ca această activitate să se desfășoare în bune condițiuni sunt necesare o serie de amenajări hidrotehnice. Aceste amenajări nu sunt destinate numai transportului, ele având utilizări multiple: irigații, producere de energie electrică, sursă de apă pentru răcirea unor sisteme. Structurile acestor amenajări hidrotehnice au constituit o preocupare continuă a comunității navale internaționale.

În cadrul transportului naval, transportul fluvial ocupă un loc aparte. Structurile sale hidrotehnice care, după cum am mai spus, sunt folosite și în alte scopuri, necesită o proiectare specială, precedată de studii și cercetări. Barajele, digurile, ecluzele reprezintă structuri hidrotehnice în care se investește multă inteligență creatoare pentru a fi perfecționate. Lucrarea de față reprezintă o contribuție, sper notabilă, la acest efort.

Transportul fluvial are o serie de avantaje față de transportul pe alte căi. Consumul de energie pe tona-kilometru de mărfuri transportate reprezintă o șesime din consumul înregistrat în

transportul rutier și jumătate din cel înregistrat în transportul feroviar. Poluarea fonică și emisiile de gaze sunt, de asemenea, mai reduse. Transportul naval pe căile interioare asigură un nivel ridicat de siguranță, în special pentru mărfurile periculoase.

Canalele navigabile românești, Dunăre-Marea Neagră și Poarta Albă- Midia Năvodari, sunt parte integrantă din Coridorul VII Pan European. Axa Prioritară 18 din cadrul Trans european Transport Network ce unește portul Rotterdam de portul Constanța, prevede amenajarea căii navigabile la parametrii care să permită transportul naval în condiții de siguranță de-a lungul rutei Rin- Main- Dunăre.

Referindu-ne la oportunitatea cercetărilor din cadrul lucrării de doctorat, trebuie să menționăm existența unui Master Plan, o strategie pe termen mediu de dezvoltare a căilor navigabile interioare. Acest plan definește obiectivele și identifică problemele în vederea studierii și proiectării măsurilor de soluționare ale acestora. Realizarea Master Planului pentru transportul pe căile navigabile interioare românești s-a făcut în deplină concordanță atât cu strategiile naționale și sectoriale din acest domeniu, cât și cu strategiile europene în domeniu.

Unul din proiectele ambițioase ale României îl constituie relansarea lucrărilor de construcție ale Canalului Dunăre-București. În 2008 Guvernul a aprobat o Hotărâre care a permis începerea elaborării studiului de fezabilitate și proiectării întregii lucrări la nivelul anului 2010.

Există, de asemenea, proiecte ambițioase privind retehnologizarea ecluzelor existente, construirea unor noi cum ar fi ecluza dintre Canalul Poarta Albă- Midia Năvodari și Lacul Siutghiol, în zona Sat Mamaia, dezvoltarea porturilor etc.

Toate acestea demonstrează că eforturile de cercetare în domeniu sunt cât se poate de oportune, putând contribui la găsirea de soluții interesante care să modernizeze structurile existente și să realizeze unele noi în condițiile de performanță și siguranță cerute de cele mai înalte standarde europene și mondiale.

Obiectivele principale ale lucrării sunt:

- **Simularea acțiunii forțelor exterioare – vânt, curent, valuri - asupra digurilor.**
- **Utilizarea simulatorului FLUENT drept stand de probe.**
- **Stabilirea gradientul de presiune la o variație liniară a debitului cu aplicații în determinarea variației nivelului de lichid din ecluză.**

La îndeplinirea obiectivelor principale enumerate mai sus concură un număr de obiective secundare, cum ar fi:

- **Elaborarea unei sinteze a forțelor care acționează asupra construcțiilor hidrotehnice: diguri, canale, baraje, ecluze etc.**

- **Modelarea curgerii printr-un baraj rupt.**

Ca o consecință a modelului matematic privind golirea/umplerea sas-ului ecluzei ne-am propus:

- **determinarea analitică a debitului necesar pentru o viteză constantă, impusă, a nivelului apei din ecluză.**

Abordarea tematicii și modul de validare al rezultatelor

În primul capitol vom face câteva considerații generale privind istoricul amenajărilor hidrotehnice, contribuția acestora la dezvoltarea umanității. Rolul pe care îl are exploatarea resurselor de apă și utilizarea construcțiilor hidrotehnice în nașterea și dezvoltarea primelor societăți umane este subliniat prin prezentarea câtorva din cele mai importante civilizații care s-au născut și s-au dezvoltat în bazinele marilor fluvii ale lumii: în Asia Mică – pe Tigru, Eufrat și Iordan, în nordul Africii – pe fluviul Nil, în Orientul Îndepărtat – pe Yang Tze, Huang He și Indus. A trebuit să menționăm și o importantă cultură dezvoltată de data aceasta pe malurile unui mare fluviu european – Dunărea, pe teritoriul României.

În continuare este subliniată importanța cunoașterii caracteristicilor apelor naturale în studiul structurilor hidrotehnice. Am vorbit despre regimul apelor subterane, al cursurilor de apă de suprafață și, în zonele costiere, despre regimului apelor marine.

Capitolul continuă cu noțiunile introductive referitoare la caracteristicile bazinelor hidrografice, al curgerii râurilor și fluviilor, noțiuni importante pentru studiul nostru. Sunt prezentate caracteristicile principale ale unui curs de apă, viteza, secțiunea, debitul, puterea ca și modul lor de determinare. Nu în ultimul rând este prezentată acțiunea apei mării asupra structurilor hidrotehnice de coastă care, uneori, sunt comune cu cele fluviale la vărsare (ex. ecluzele).

Capitolul 2 se ocupă de metodele de studiu ale acțiunii apei asupra structurilor hidrotehnice cu referire specială asupra celor utilizate în lucrarea de față. Am considerat important să menționăm, în contextul metodelor generale de studiu hidrodinamic, metodele utilizate în teză și rațiunea pentru care am făcut-o. Dezvoltarea așa-numitului CFD (Computer Fluid Dynamics) ne-a sugerat ideea utilizării acestuia într-un mod mai rafinat: modelarea fenomenului la scară și trecerea lui în natură cu ajutorul teoriei similitudinii. Calculul procesului în mărime naturală a constituit verificarea, modul de validare al rezultatelor obținute prin

utilizarea simulatorului ANSYS FLUENT ca stand de probe. Acest lucru se va fi dovedit util în condițiile în care determinarea mărimilor ce descriu fenomenul în mărime naturală necesită o mare capacitate de calcul și un timp îndelungat pentru computerele folosite.

Am utilizat, de asemenea analiza dimensională - teorema II, ca modalitate de determinare a criteriilor de similitudine care pot interveni în fenomenul analizat, aceasta după ce am stabilit mărimile care pot interveni în studiul nostru.

Studiile teoretice și experimentările efectuate de IMH, ca și modelările Institutului de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare și ale IPTANA, ne-au permis să facem aprecieri calitative privind curgerea în zona ecluzelor ca și variația nivelului de lichid în sas-ul acestora în timpul umplerii sau golirii.

Evident, pentru modelările matematice am folosit metoda infinitezimală, metodă ce ne-a permis rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes în situația unei variații liniare a debitului și interpretarea rezultatelor.

Stadiul actual al cercetărilor privind acțiunea apei asupra structurilor hidrotehnice, cu precădere a celor fluviale, mi-a permis abordarea, în Capitolul 3, a unei analize privind canalele navigabile interioare, a modului în care acestea au fost studiate în contextul studiului bazinelor hidrografice. Am pus accentul pe Canalul Dunăre- Marea Neagră, pe modul în care acesta a fost studiat și proiectat – Canalul fiind una din cele mai importante rute de navigație interioară europene. Schema hidrotehnică a acestuia asigură funcțiuni complexe : navigație, gospodărirea apelor, producerea de energie electrică, alimentarea cu apă potabilă și industrială, evacuarea viiturilor provenite din precipitații. Cinematica curgerii, studiată pe model, are o deosebită importanță în studiul fenomenului schimbului de apă dintre canal și albie, fenomen care favorizează depunerea aluviunilor în zona de racordare a canalului cu albia Dunării.

Am utilizat studiile hidraulice efectuate pe modele hidraulice nedistorsionate, cu pat fix și cu pat mobil, respectând criteriul Froude de modelare care au reprodus la scara 1:100 și la scara 1:125 albia Dunării în zona Cernavoda, pentru a valida rezultatele modelării matematice de la Capitolul 7 referitor la determinarea vitezei nivelului de lichid din ecluză la o variație liniară a debitului din conducta de umplere (golire).

În vederea modelării matematice trebuie să definim forțele care acționează asupra structurilor hidrotehnice cât mai exact cu putință. Aceste forțe acționează conform ecuațiilor mecanicii fluidelor, atât static cât și dinamic. În Capitolul 4 am încercat o trecere în revistă exhaustivă a forțelor care acționează asupra structurilor hidrotehnice: forțele hidrostactice, forțele hidrodinamice (vânt, valuri, curent), forțele de interacțiune cu navele (navă-fund, navă – perete,

navă – perete și fund, coliziune). Natura acestor forțe, intensitatea lor, simultaneitatea sunt foarte importante în evaluarea efectelor asupra structurilor hidrotehnice, structuri expuse adesea unor acțiuni extraordinare, neobișnuite, la care trebuie să facă față.

Unul din cele mai importante capitole ale tezei este Capitolul 5 în care a fost tratată acțiunea acestor forțe asupra structurilor hidrotehnice. A fost prezentat mai întâi programul de simulare FLUENT, unul din instrumentele principale de analiză pe care l-am utilizat. Pentru a efectua calculul este necesar să definim, în alt program, GAMBIT, geometria corespunzătoare problemei și să creăm grila sau mesh-ul (volume în 3D sau suprafețe în 2D). În primul subcapitol am desenat digul și am construit rețeaua de celule în 3D. Asupra digului acționează forța vântului, destul de puțin importantă, forța valului pentru digurile marine, mai puțin pentru cele ale apelor interioare (aici fiind vorba de valuri create în special de ambarcațiuni) și forța curentului, cea mai importantă în cazul digurilor amplasate pe fluvii.

Problema acțiunii curentului nu mai este așa de simplă, în special dacă este vorba de viteze mari ale apei cum este cazul viiturilor pe râuri. Am abordat, mai întâi, cazul acțiunii curentului asupra părții imerse a unui baraj care s-a rupt. Calculul s-a efectuat pe modelul acestui baraj rupt, trecerea de la model la natură efectuându-se cu ajutorul teoriei similitudinii, respectându-se criteriul Fr. De fapt am utilizat simulatorul FLUENT ca un stand de probe experimental. Este oare această similitudine corect aplicată? Putem efectua calcule care necesită evident un proces mai scurt și mai puțin laborios pe dimensiunile modelului, trecând apoi rezultatele în natură utilizând invarianții de similitudine? Am considerat pentru aceasta un dig asupra căruia acționează un curent atât pe model cât și în natură. Rezultatele obținute prin calcul au fost comparate cu cele obținute aplicând teoria similitudinii.

Există situații în care modelarea fizică a unei structuri nu poate fi realizată sau este dificil de realizat datorită diferenței mari dintre dimensiunile acesteia. În cazul temei noastre, digurile lungi ar fi mai bine modelate dacă vom utiliza două scări: una pentru lungime și alta pentru lățime și înălțime. Reprezentarea lor, în cazul simulărilor, ar fi mult mai sugestivă. Există opinii diferite în această problemă printre hidraulicieni. În Capitolul 6 am încercat să vedem în ce măsură similitudinea la două scări, k_y scara lungimii digului și k_x scara lățimii și înălțimii sale

($k_1 = \frac{k_y}{k_x} = \Pi_1$ - raport de distorsiune), poate fi folosită în studiul forțelor care acționează asupra digului pe model și în natură.

O structură hidrotehnică importantă este ecluza. Variația nivelului apei din ecluză (umplerea sau golirea acesteia) reprezintă un obiect de studiu important. Demersul nostru matematic (Capitolul 7) se referă la stabilirea pe cale analitică a evoluției nivelului de lichid atunci când debitul de umplere (golire) are o variație liniară. Ne referim, în special, la perioadele de tranziție când vanele se deschid sau se închid, pe rând sau toate odată, dar și la faptul că între biefuri și sas există conducte, uneori destul de lungi, care influențează procesul de umplere (golire). Am utilizat potențialul vector al câmpului de viteze, noțiune preluată din electrotehnică (la câmpurile solenoidale $\nabla \bar{v} = 0$, ceea ce implică $\bar{v} = \text{rot} \bar{A}$, $\bar{A} = \bar{A}(x, y, z, t)$). După stabilirea valorii potențialului vector și a distribuției de viteze, am determinat gradientul de presiune în cazul variației liniare a debitului. După stabilirea formulei gradientului de presiune am putut determina variația nivelului de lichid din ecluză, un parametru important de funcționare a acestei structuri hidrotehnice. Interesantă a fost comparația cu datele experimentale efectuate la ecluza Cernavoda.

Problema poate fi pusă și invers: cunoscând sau impunând variația gradientului de presiune să determinăm debitul prin conductă. Pentru aceasta am considerat o variație liniară în timp a gradientului de presiune: $\frac{\partial p}{\partial z} = at$ (în care a este o constantă dimensională măsurată în $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-3}]$). Am obținut variația vitezei și apoi debitul necesar prin conductă.

În Capitolul 8 am sintetizat principalele contribuții personale, dar și direcțiile pe care le întrevăd în ceea ce privește continuarea cercetărilor. Contribuțiile personale le voi enumera și în această introducere pentru a sublinia realizarea obiectivelor: elaborarea unei sinteze a forțelor care acționează asupra construcțiilor hidrotehnice: diguri, canale, baraje, ecluze etc.; simularea acțiunii vântului asupra părții emerse a digului; modelarea curgerii printr-un baraj rupt; modelarea acțiunii curentului asupra digurilor; utilizarea simulatorului FLUENT drept stand de probe; similitudinea la două scări a digurilor; gradientul de presiune la o variație liniară a debitului cu aplicații în determinarea variației nivelului de lichid din ecluză – model matematic; determinarea debitului necesar pentru o viteză constantă, impusă, a nivelului din ecluză.

Concluziile finale fac obiectul Capitolului 9. Este evident faptul că apă, respectiv amenajarea ei prin construcții hidrotehnice, a avut și are un rol important în dezvoltarea societății umane. Studiul acțiunii forțelor care acționează asupra structurilor hidrotehnice reprezintă o componentă, consider eu destul de importantă, privind exploatarea resurselor de apă. Utilizarea metodelor moderne de calcul și simularea acțiunii acestor forțe, dar și modelarea matematică cât mai exactă, este de mare actualitate și ne poate duce la concluzii interesante atât în ceea ce

privește evoluția fenomenelor, cât și în ceea ce privește o proiectare cât mai corectă a structurilor hidrotehnice.

În ultima parte a lucrării am prezentat lista bibliografică care cuprinde titluri importante în domeniu, unele foarte recente, dar și lucrări ale autorului și ale conducătorului său de doctorat. Este de menționat că o parte din cercetările tezei au fost publicate în reviste de prestigiu, indexate în Baza de Date Internațională.

Gratitudine

În primul rând doresc să-mi exprim gratitudinea pentru îndrumarea competentă și susținută primită din partea conducătorului științific al tezei, domnul **profesor Dumitru DINU**, care cu exigență și rigoare a făcut posibilă ordonarea bogatului material bibliografic pe care în mare parte mi l-a recomandat, sistematizarea cercetărilor și mai ales a rezultatelor pe care m-a ajutat să le interpretez. Domnia sa a adus adăugiri de substanță cercetărilor mele și a contribuit la valorificarea acestora prin lucrările publicate împreună în reviste indexate în Baza de Date Internațională.

Mulțumesc totodată cadrelor didactice, membre ale **Catedrei de Inginerie Mecanică Navală** pentru observațiile pertinente și recomandările făcute atât pe parcursul elaborării tezei cât și în timpul susținerii ei în Catedră.

Se cuvine să îmi exprim gratitudinea față de instituția în care m-am format ca specialist în domeniul naval – **Universitatea Maritimă din Constanța** - și care, iată, mi-a creat condițiile de desăvârșire a pregătirii mele prin acest doctorat.

De asemenea, mulțumesc colegilor de la **Compania Națională „Administrația Canalelor Navigabile” S. A.** cu care am colaborat o bună bucată de timp aducându-ne împreună contribuția la cunoașterea și mai buna înțelegere a locului și rolului Sistemului canalelor navigabile dobrogene pentru România și Europa.

Nu în ultimul rând mulțumesc **familiei** care a dat dovadă de multă înțelegere în tot acest timp pe care l-am petrecut mult prea puțin alături de ea.

1. Considerații generale

Un studiu complet, determinist, al rolului pe care îl are exploatarea resurselor de apă și utilizarea construcțiilor hidrotehnice în nașterea și dezvoltarea primelor societăți umane presupune abordarea mai multor elemente:

- elemente de hidrotehnică, necesare introducerii în studiu a construcțiilor hidrotehnice și a caracteristicilor acestora;
- elemente de hidrologie, necesare cunoașterii modului în care distribuția și caracteristicile generale ale resurselor de apă au determinat sedentarizarea omului și formarea primelor așezări umane;
- elemente de hidrogeologie, necesare înțelegerii mecanismului prin care acțiunea apei asupra terenurilor a influențat practicarea unei agriculturi de calitate care a permis dezvoltarea resurselor de hrană;
- elemente de istorie și geografie, pentru a înțelege evoluția geo-cronologică generală a primelor societăți umane în contextul raționalizării exploatării resurselor de apă prin realizarea de construcții hidrotehnice;
- elemente de psihologie socială, pentru analiza comportamentului social al populațiilor legat de exploatarea apei;
- elemente de statistică, necesare cunoașterii dezvoltării cantitative a acestor populații.

1.1 Construcțiile hidrotehnice și dezvoltarea civilizației umane.

Pentru început cred că este necesar să subliniem rolul determinant al exploatării raționale a apei cu ajutorul construcțiilor hidrotehnice în dezvoltarea istorică a societății umane.

Apa a constituit încă de la începuturile istoriei omenirii o resursă extrem de importantă. Aproape că nu există domeniu al științei, al artelor ori al religiei care să nu se apropie sub o formă sau alta, cautând răspunsuri ascunse în ceea ce pare atât de limpede - un lichid incolor, inodor și insipid, aparent fără nici un secret.

De la civilizațiile mesopotamiene și până în America precolumbiană, din deșertul arid al Saharei și până pe înălțimile Tibetului acest lichid divin a creat mituri care au transces epoci milenare. Marele Creator al Universului, fie că se numea Yahwe, Happi ori Quetzalquatlé a creat

lumea din apă ori cu ajutorul ei, iar atunci când a fost nevoie și-a pedepsit supușii cu cataclisme deluviene ca Potopul lui Noe ori scufundarea Atlantidei.

Omul cavelor își avea peștera în apropierea unor izvoare sau cursuri de apă, civilizațiile antichității își construiau așezămintele pe malurile marilor fluvii, iar hoardele care au invadat Europa în marile migrații ale ultimilor 3000 de ani își așezau taberele cât mai aproape de cursul râurilor.

Primele civilizații cunoscute erau în totalitate dependente de resursele de apă dulce, în jurul cărora s-au format. Ele s-au născut și s-au dezvoltat în bazinele marilor fluvii ale lumii: în Asia Mică – pe Tigru, Eufrat și Iordan, în nordul Africii – pe fluviul Nil (Fig. 1.1), în Orientul Îndepărtat – pe Yang Tze, Huang He și Indus.

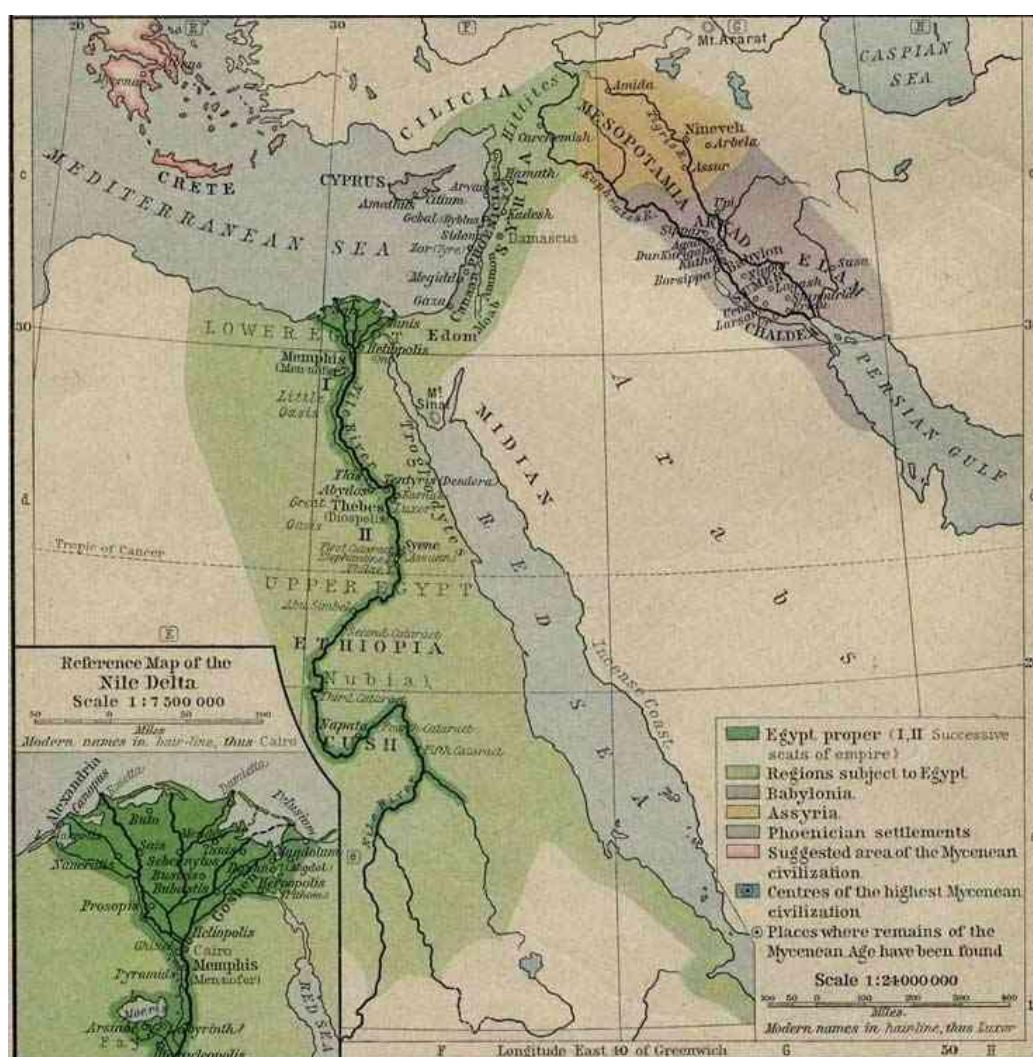


Fig. 1.1 Civilizațiile Tigrlui, Eufratului, Iordanului și Nilului.

Datorită caracterului de dependență totală a acestor civilizații, de modul în care reușeau să exploateze resursele de apă, aceste civilizații sunt cunoscute în anumite abordări științifice sub numele de “civilizații hidraulice”. Termenul a fost introdus probabil pentru prima dată de către K. A. Wittfogel în anul 1956 și a fost reluat de către diverși autori care au studiat evoluția acestor civilizații.

Având în vedere că apele de suprafață din a căror categorie fac parte fluviile sunt sisteme hidraulice cu nivel liber, ele sunt caracterizate prin niveluri și debite variabile, cu impact major asupra vieții locuitorilor de pe malurile lor.

Aceste două elemente hidrologice care caracterizează cursurile de apă de suprafață sunt: nivelul apei – H , o caracteristică ce definește cota suprafeței libere a apei la un moment dat într-o secțiune de albie considerată; debitul de apă – Q , volumul de apă ce se scurge în unitatea de timp prin secțiunea de albie.

Nivelurile și debitele caracteristice principale ale unui curs de apă sunt nivele multianuale, caracterizate printr-un maxim: H_{\max} , Q_{\max} , printr-un minim H_{\min} , Q_{\min} și printr-o medie H_{med} și Q_{med} .

În perioadele de maxim, datorită topirii zăpezilor în munți sau a sezonelor cu precipitații abundente din climatul tropical și subtropical, apele rezultate alimentau albiile fluviilor producând inundații periodice de amploare a luncilor în care s-au format așezările umane .

Aceste inundații aveau un dublu efect:

- un efect benefic de depunere a unor sedimente aluvionare bogate în minerale propice practicării unei agriculturi de calitate și a unui schimb permanent de apă între râu și apa freatică din luncă;
- un efect distructiv prin punerea în pericol a locuințelor umane și a obiectivelor economice din zona luncii.

Pentru cunoașterea regimurilor apelor într-o anumită zonă erau și sunt necesare observații de lungă durată, 15 – 20 de ani, iar uneori, pentru cunoașterea caracteristicilor speciale – minime sau maxime istorice – chiar 100 de ani.

Cunoașterea variației debitelor și nivelurilor era foarte importantă pentru viața și activitatea locuitorilor din marile bazine hidrografice.

Cunoașterea maximelor avea o importanță majoră pentru:

- lucrările la mal în vederea captării apei pentru irigații;
- cotele căilor de comunicații;
- amplasamentul zonelor de acostare;
- sistematizarea amplasării locuințelor și a obiectivelor economice ce trebuiau ferite de inundații;

- construirea îndiguirilor necesare pentru apărarea zonelor inundabile.

Cunoașterea minimelor era de asemenea importantă, în vederea:

- stabilirii cu exactitate a șenalelor navigabile, unde trebuiau asigurate adâncimile minime necesare;

- stabilirii adâncimii de săpare a canalelor de captare a apelor;

- stabilirea cotei până la care lucrările puteau fi executate din material lemnos.

La acea vreme însă, aceste caracteristici erau măsurate fără dispozitive hidrometrice, ci în raport cu anumite construcții sau repere naturale existente și se transmiteau din generație în generație pe cale orală.

În zilele noastre, pe baza observațiilor de lungă durată, prin măsuratori precisi și prin urmărirea variației nivelului oglinzii apei într-o secțiune considerată se realizează reprezentarea grafică, cronologică, care poartă denumirea de hidrograful nivelurilor.

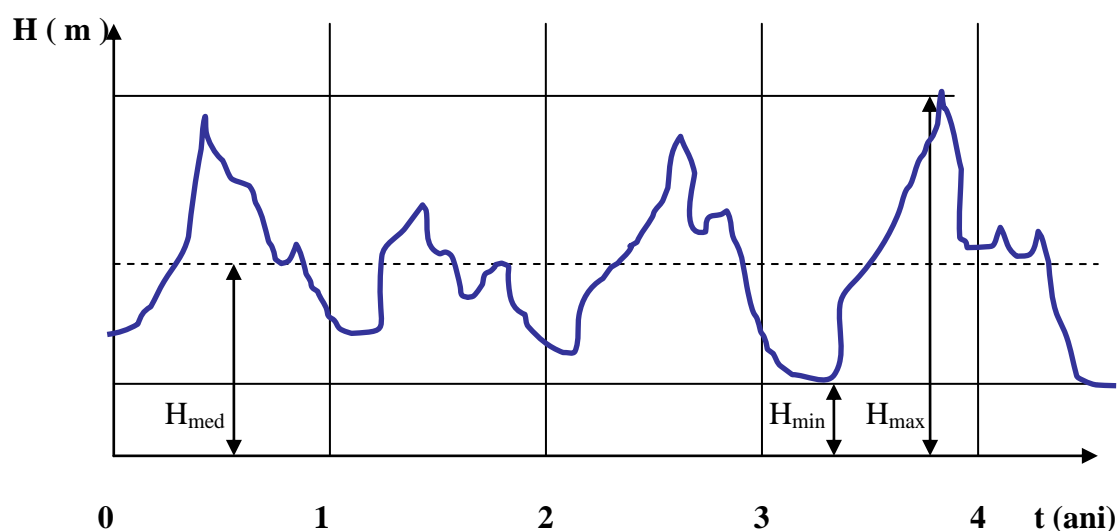


Fig. 1.2 Hidrograful multianual al nivelurilor

Măsurarea debitelor de către “popoarele hidraulice” era aproape imposibilă și de o importanță mai mică deoarece pentru a se realiza este nevoie de cunoașterea corelației dintre nivelul de apă și debitul într-o anumită secțiune de albie. Aceasta este posibilă numai prin cunoașterea exactă a profilului fundului albiei, pentru a se stabili cheia debitelor.

Pentru a construi un hidrograf al debitelor vom admite că cheia debitelor este o curbă univocă, ceea ce înseamnă că la un anumit nivel al suprafeței libere a apei debitul de apă scurs printr-o secțiune de albie este întotdeauna același.

Calculul debitelor de apă se face astăzi prin utilizarea curbei integrale a debitelor în funcție de timp:

$$Q = \frac{1}{t} \int_0^{t_i} Q(t) dt \quad (1.1)$$

În aceste condiții, într-o secțiune dată de albie, debitul este direct proporțional cu nivelul din curba debitelor (Fig. 1.3).

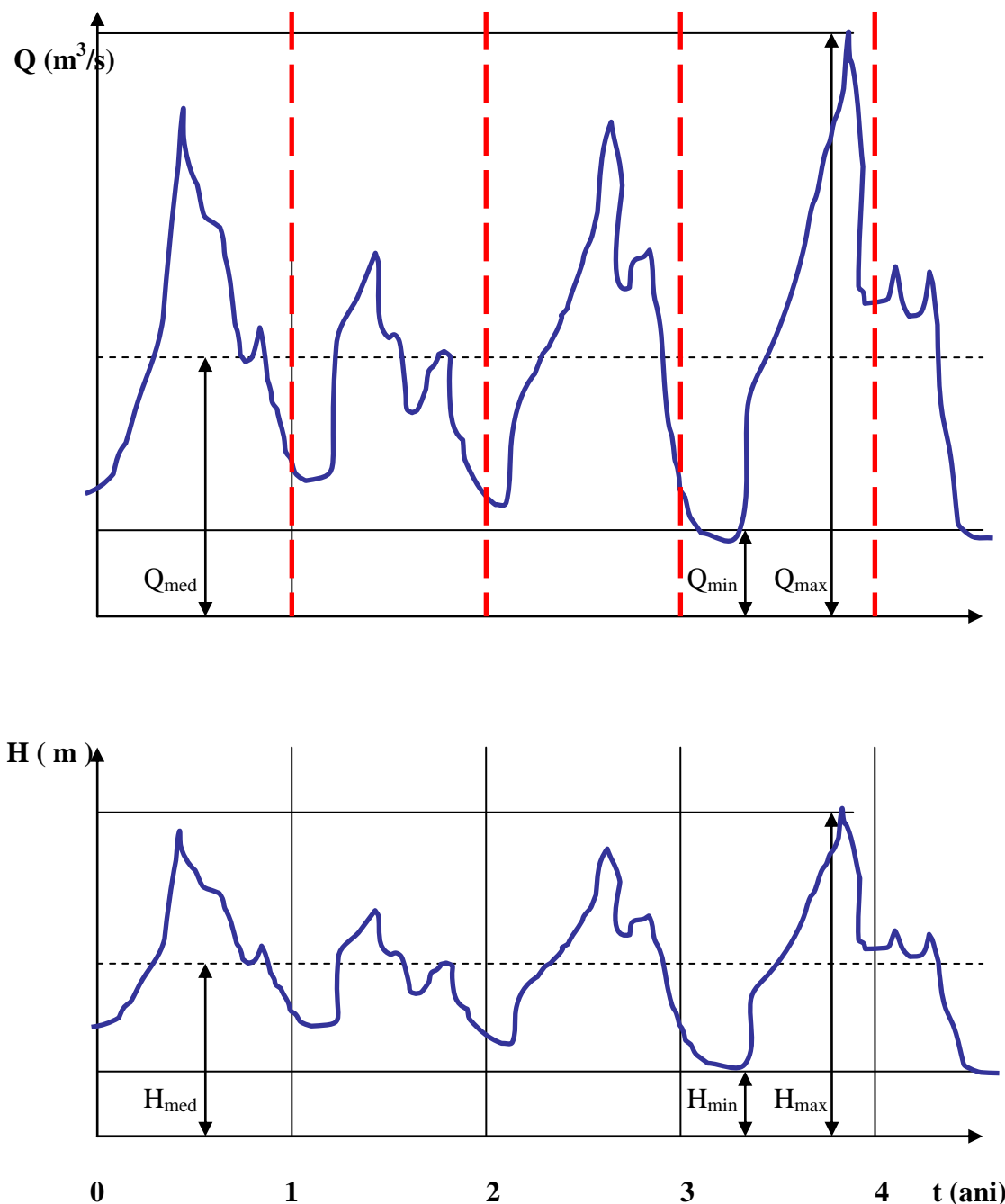


Fig. 1.3 Corelația dintre debite și nivelul unui râu

Cunoașterea regimului de curgere era extrem de importantă, întrucât induce modificări în modul de eroziune și sedimentare al aluviunilor nu numai de-a lungul malurilor, dar și pe fundul albiilor.

Pentru popoarele antice regularizarea cursurilor necesita antrenarea de importante eforturi comunitare, întrucât construcțiile hidrotehnice de mare amploare erau realizate cu mijloace tehnice rudimentare. Construirea de diguri, sau captarea și acumularea apelor nu este nici astăzi posibilă decât cu mari eforturi dacă regimul de curgere al apelor este turbulent sau neuniform. De asemenea, depunerile aluvionare pot îngreuna săparea de canale și întreținerea acestora întrucât pe fundul albiilor depunerile pot forma rifluri, dune sau chiar bare fluviale, care modifică regimul de navigație în zona lor.

În perioadele de început ale civilizațiilor umane realizarea construcțiilor hidrotehnice se făcea pe baza unor observații empirice, având ca principal motor încercarea de a sistematiza zonele populate. Materialele de construcții cele mai importante erau: pământul, piatra și lemnul. În construcțiile hidrotehnice piatra sau lemnul erau rezervate doar unor lucrări speciale, mai ales la realizarea zonelor de acostare, construcțiile de anvergură fiind realizate din pământ.

În general, construcțiile hidrotehnice se rezumau la excavații de pământ, realizate în vederea construirii unor noi canale sau a măririi unor canale existente și la acumulări de pământ realizate în vederea îndiguirii sau acumulării unor cursuri de apă.

Ca urmare, cele mai importante lucrări hidrotehnice în antichitate erau: **digul de pământ, canalul și barajul.**

Orașele asiro-babiloniene din Mesopotamia – țara dintre râuri – au început să se dezvolte în urmă cu 6000 de ani pe vasta câmpie din bazinele marilor fluvii Tigru și Eufrat care, împreună, cu un debit de peste 50 mil m³/an constituie cel mai important bazin hidrografic din Asia Mică (Fig. 1.4). Pe malurile acestor fluvii, după o evoluție care a început încă din perioada neolitică, sumerienii s-au sedentarizat și au creat în timp un imperiu a cărei civilizație a durat mai bine de 3000 de ani.



Fig. 1.4 Așezarea popoarelor sumeriene în bazinul hidrografic Tigru-Eufrat

Cu siguranță însă, popoarele din Sumer ar fi rămas să traiască la fel ca în perioada protoistorică, după cicluri naturale anuale ca simple populații de agricultori săraci, seminomazi, dacă nu ar fi exploatat rațional apele celor două fluvii, prin ample lucrări hidroedilitare. În zonele neamenajate pe cursul acestor fluvii nu era decât o întindere mlăștinoasă în sezonul ploios și cu vaste porțiuni de namol în timpul verii secetoase, făcând practic imposibilă așezarea unor localități stabile și importante. Sedentarizarea populațiilor și apariția satelor a fost posibilă numai după începerea practicării pe scară largă a regularizării cursurilor de apă. Primele populații sedentare s-au așezat în Mesopotamia la Eridu, în jurul anului 7400 î.H. Tot în aceeași zonă a Asiei Mici, pe malurile Iordanului a fost construit în jurul anului 8000 î.H. Ierihonul, probabil primul oraș din istorie, distrus definitiv prin 1400 î.H.

Sistematizarea zonelor de locuit și construirea unor orașe ca Uruk (care în jurul anului 5000 î.H. număra cam 50.000 de locuitori), Ur sau Nippur a fost posibilă numai după ce apele acestor fluvii au fost regularizate de către sumerieni, prin vaste îndiguiri și acumulări realizate cu ajutorul digurilor de pământ. Această sistematizare a avut ca efect aglomerarea pe Tigru și Eufrat în jurul anului 3500, când au apărut primele forme de asociere statală a acestor orașe, a unei populații de aproximativ 1.000.000 de locuitori. Apa fluviilor a fost și o sursă de irigații raționale pentru popoarele sumeriene. Încă din cele mai vechi timpuri ei fertilizau solul prin săparea de importante rețele de canale de irigații, și introduceau în circuitul agricol vaste suprafețe prin

asanarea câmpiilor mlaștinoase. Mai mult decât atât, pe parcursul dezvoltării societății lor, sumerienii au creat o rețea de căi navigabile, ce servea atât comunicațiilor, în condițiile în care căile terestre erau costisitor de construit, greu de întreținut și deveneau impracticabile în perioadele ploioase, dar și ca sursă de apă în vederea practicării irigațiilor. Aceste canale se mențin și astăzi în unele locuri, iar dacă mongolii nu ar fi cucerit Asia Mică în 1258, distrugând mare parte dintre ele, probabil că s-ar fi păstrat mult mai multe dintre ele (Fig. 15).

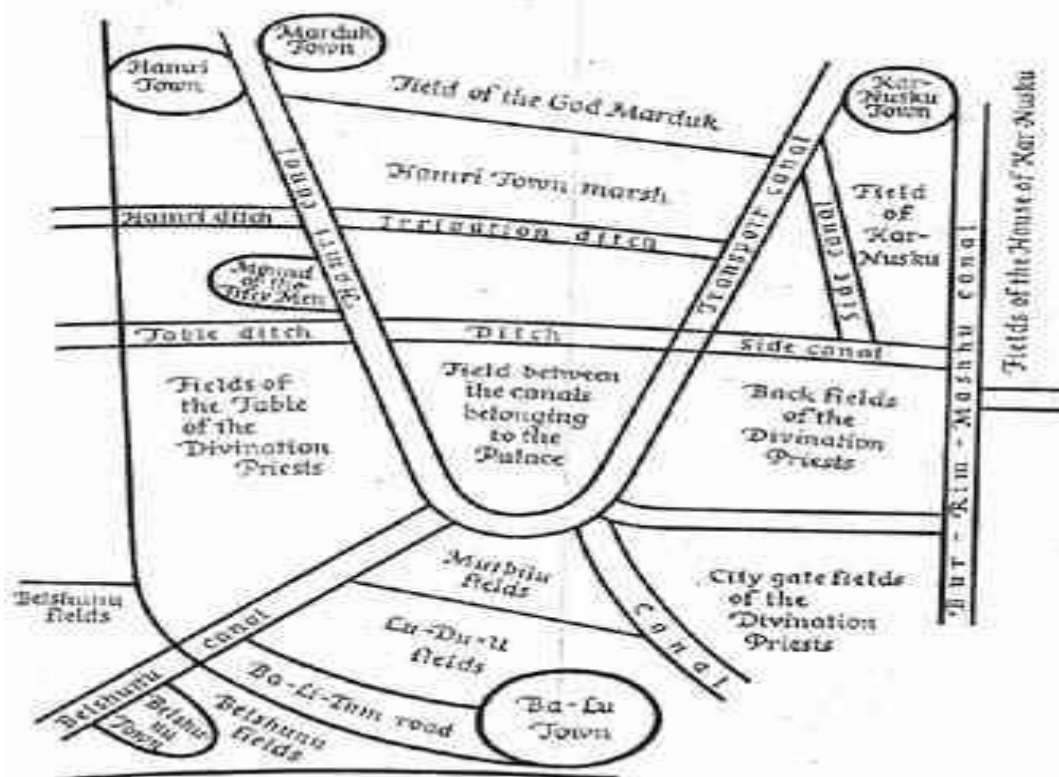


Fig. 1.5 Rețeaua de canale săpate de asiro-babilonieni

Această amplă încrengătură de canale de mari dimensiuni, dublau Tibrul și Eufratul - care erau navigabile doar într-o perioadă a anului și numai în zonele joase, cu debite mari - și asigurau o densă rețea de comunicații. Chiar și în zilele noastre, după câteva mii de ani de la săparea lui, o bună parte din apele Eufratului se scurg spre Golful Persic pe un important canal sumerian, care își avea originea în zona actualului oraș Fellujah - Canalul Pallukat.

Importanța acestor canale este confirmată și de modul în care, în perioada istorică respectivă, ei își țineau calendarul, marcând anii după data construcției unor canale. Construirea acestor canale a permis și întreprinderea unor vaste expediții militare de cucerire. Expediția maritimă a regelui Sennakerib contra Elamului este extrem de grăitoare în acest sens. În anul 696 î.H. el a construit două flote, una la Ninive și cealaltă la Til-barsib. Vasele construite la Til-

barsib au urmat cursul Eufratului până în Golful Persic. Cele construite la Ninive au coborât pe Tigru, apoi pe canalul artificial Ahratu care unea Tigru cu Eufratul, apoi pe Eufrat, ajungând astfel la mare, unindu-se într-o flotă de mari dimensiuni pentru acea vreme. Datorită lucrărilor hidroedilitare realizate de către ei, imperiul creat de asiro-babilonieni a acoperit toată Asia Mică de la Golful Persic până la Marea Mediterană. Sistematizarea zonelor de locuit, regularizarea cursurilor de apă și utilizarea rațională a resurselor cu ajutorul acestor construcții, le-au permis o dezvoltare fără precedent în istoria umană până la ei. În marile orașe astfel create s-au dezvoltat științele și tehnica, au fost construite edificii edilitare ale caror ruine ne fascinează și astăzi, a fost inventat scrisul și s-au pus bazele actualei civilizații mondiale.

Ceva mai la vest, o altă uriașă civilizație, cea egipteană, înflorea pe malurile unui alt important fluviu - Nilul. Herodot din Sicilia spunea despre Egipt că este un “dar al Nilului” – o oază întinsă pe 2000 de km, de la cataractele nubiene până la țărmurile Mediteranei, înconjurată de cel mai mare și mai arid deșert de nisip de pe pământ – Sahara. Datorită acestui specific, chiar și în zilele noastre, 97% dintre egipteni trăiesc pe 2% din suprafața țării. Același Herodot menționează importanța vastelor lucrări de irigații scriind că “de la țărmul mării până la Heliopolis, Egiptul este întins, bine irigat și cu mal roditor”.



Fig. 1.6 Așezarea Egiptului Antic de-a lungul cursului Nilului

Prosperitatea Egiptului se datora acestui fluviu-zeu, numit astfel de către egiptenii care nu-i cunoșteau izvoarele, crezând că regimul variabil al apelor sale este un dar al zeilor, dar au știut să-l îmblânzească și să-i folosească apele pentru a-și fertiliza pământurile.

Regimul apelor Nilului era dependent de cel al ploilor ecuatoriale care îl alimentează tot timpul anului. Revărsările anuale au creșteri neregulate în volum, apele umflându-se brusc din iunie până în octombrie. Acest fapt se datora alimentării abundente a Nilului Alb cu apele meteorice ale ploilor tropicale, datorate schimbării musonilor și a apelor acumulate din topirea zăpezilor din munții Abisiniei în albia Nilului Albastru.

Datorită acestor revărsări a apărut necesitatea construirii de diguri, a drenării de canale și apărării locuințelor, ceea ce a determinat dezvoltarea caracterului sedentar, obligând triburile nomade să se stabilească în sate. Într-una dintre primele hieroglife descoperite se menționează pedeapasa aspră care a fost dată unui om care a neglijat consolidarea digului său, a lăsat apele să inunde câmpurile vecinilor săi.

Pământul negru aluvionar de pe malurile fluviului pe care s-au dezvoltat Cele Două Regate, era argilos și extrem de bogat în humus. În contrast cu acesta, pământul roșu, format din nisipuri feldspaltice, bogate în hidroxizi de fier ale Saharei, erau aride și fără urmă de viață. Luncile negre ale Nilului au dat Egiptului Antic denumirea de Kemet, hrănind cea mai mare civilizație din istoria omenirii. Această uriașă civilizație a lăsat moștenire istoriei uriașe construcții edilitare, temple și necropole. Bogățiile culturale ale Egiptului i-au tentat pe toți cei care au vrut să-l cucerească, de la Iulius Cezar la Napoleon, iar sistemul filosofico-religios al acestei civilizații și-a pus amprenta pe civilizațiile ulterioare până în zilele noastre.

Civilizația Egiptului a dăinuit, datorită raționalizării cursului Nilului, pe parcursul a două treimi din istoria omenirii. Cleopatra, ultima regină a Egiptului a trăit cronologic mai aproape de oamenii care au pășit pe lună decât de cei care au construit piramidele.

Canalul Suez, săpat în epoca modernă de către francezi (Fig. 1.7), a fost pentru prima dată creat de marii faraoni ai străvechilor nome. Amplasamentul său era diferit de cel de astăzi; dacă acum el este o legătură directă de la nord la sud între Mediterană și Marea Roșie, pe vremea vechiului Egipt el făcea legătura dintre Marea Roșie și Marea Mediterană prin unul din brațele Nilului, fiind săpat de la est la vest.



Fig. 1.7 Valea Nilului și Canalul Suez – imagine satelitară

Cu timpul el a fost abandonat, chiar dacă și romanii conduși de împăratul Traian l-au dragat, folosindu-l o bună perioadă de timp. Abandonarea s-a datorat nu atât costurilor mari de întreținere a șenalului navigabil, căci ele se amortizau, reducându-se extrem de mult rutele comerciale spre Asia Mica și Orientul Îndepărtat, ci datorită cuceririi Egiptului de către arabi, care n-au fost interesați să-l utilizeze. La cucerirea Egiptului de către Napoleon Bonaparte, în 1798, încă se mai putea vedea acel canal, generalul plănuiind chiar să-l reconstruiască, intuind importanța strategică a acestuia.

Astăzi, împreună cu barajul de la Assuan, reprezintă două dintre lucrările hidroedilitare cele mai celebre și importante din punct de vedere economic din întreaga lume și cu siguranță cele mai importante din întregul continent African.

Nici marile civilizații din Orientul Îndepărtat nu s-au dezvoltat în afara marilor fluvii. China Antică s-a născut în uriașele bazine ale lui Yang Tze și Huang He, iar India pe malurile fluviului care i-a dat și numele – Indus.

Primele ferme agricole au apărut în această zonă între anii 6000 – 4000 î.H. odată cu primele populații de agricultori săraci, care s-au așezat în Câmpia Chinei de Est. Timp de câteva mii de ani fermele individuale au suferit un vast proces de transformare. La început, cultivarea

cerealelor se realiza pe răzoare, era extrem de anevoioasă, iar lucrările de pregătire și fertilizare a terenurilor destul de reduse. Cu timpul, prin lucrări din ce în ce mai importante de irigare, drenare și desecare a terenurilor, s-au dezvoltat cantoanele și a apărut o tendință de specializare a culturilor, în funcție de specificul terenurilor.

Odată cu apariția schimburilor comerciale colibeile sărace au început să se grupeze în jurul unor mici localități, organizate senioral, apărând primele aglomerări urbane, care s-au sedimentat în regate în jurul anului 1000 î.H.



Fig. 1.8 Imperiul Han pe câmpia Chinei de Est

Abia după 1000 de ani de existență ca regat și o continuă dezvoltare în marile câmpii din est chinezii și-au început expansiunea către sud, est și nord. Populațiile chineze s-au consolidat ca unic popor în jurul anului 221 î.H. când a încetat să mai fie o confederație de domenii sub suveranitatea unui rege, devenind un imperiu.

Primul dintre împărații Chinei – T'în – a domnit sub semnul Apei, ceea ce dovedește importanța pe care o avea apa nu numai asupra activităților de zi cu zi ci și asupra sistemului de gândire al chinezilor din vechime.

Inițial popor de agricultori, chinezii au știut să fructifice avantajul celor două mari fluvii. Dacă construcția Marelui Zid este cunoscută de toată lumea, fiind mai spectaculoasă, nu trebuie uitat nici faptul că în antichitate acest mare popor s-a remarcat prin construirea unor vaste lucrări de regularizare a albiei fluviilor și a celui mai mare canal din istoria omenirii. Scopul inițial al acestui canal a fost acela de a iriga și a transforma regiunea septentrională a Fluviului Galben

într-o zonă locuibilă, iar în timp, prin extinderea și adâncirea lui a devenit o vastă arteră de navigație, o arteră vitală în comunicațiile imperiului chinez.

Marele Canal (Fig. 1.9) a fost săpat în jurul anului 120 înainte de Hristos de împăratul Wu, având în jur de 3000 de kilometri și făcea legătura între cele două fluvii.

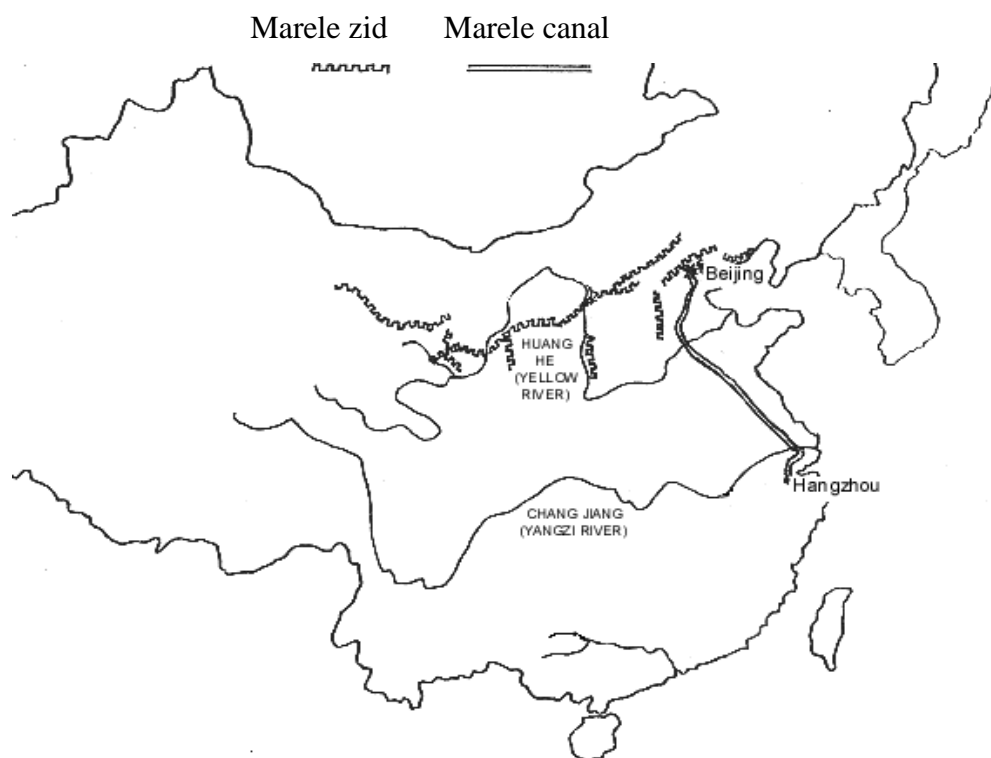


Fig. 1.9 Marele Canal Chinezesc

Peste 100.000 de oameni au lucrat probabil la construirea canalului. Astăzi, după mai bine de 2000 de ani, canalul este încă la fel de util Chinei ca și atunci.

În timpul aceluiași împărat Wu, capitala imperiului a devenit port fluvial prin aducerea în oraș pe cale artificială a apelor râului Wei, în scopul irigațiilor dar și pentru transportul grânelor și a altor produse agricole. Construirea canalului, care a durat timp de 3 ani scurta considerabil drumul spre capitală și reducea costurile alocate mâinii de lucru.

Una dintre cele mai importante realizări din perioada imperială a Chinei a fost și construirea unui baraj de acumulare pe Huang He, care permitea controlarea nivelului apei pe acest fluviu în zona mijlocie și joasă, permițând colonizarea unor vaste suprafețe agricole astfel dobândite.

Tot pe teritoriul Chinei, în jurul anului 11 era noastră, este menționat primul mare dezastru natural datorat ruperii marelui dig de apărare al Fluviului Galben, care s-a soldat cu

ruinarea largilor câmpii din Sang Tong și Cii Li, provocând începutul celei mai mari crize alimentare din istoria Chinei.

Înainte de a încheia periplul prin “civilizațiile hidrografice” trebuie să menționăm și o importantă cultură dezvoltată de-a lungul malurilor unui mare fluviu european – Dunărea, pe teritoriul României.

Este vorba de Cultura de la Hamangia, care a cuprins populații ce s-au dezvoltat în toată zona Dobrogei, de la clisura Dunării până aproape de gurile sale de vărsare. Cele mai importante artefacte ale acestei culturi, Gânditorul și Femeia lui au fost descoperite în fapt la Cernavodă.

Ceramica și obiectele descoperite ne îndreptățesc să credem că pe malurile Dunării de Jos la acea vreme s-au dezvoltat localități înfloritoare pentru epoca respectivă. Vasele utilizate la înmagazinarea și transportul apei atestă faptul că populațiile din acea perioadă practicau cel puțin forme rudimentare de irigare a culturilor și utilizau resursele de apă ale Dunării pentru fertilizarea solurilor pe care practicau agricultura. Sedentarizarea populațiilor în această zonă este foarte posibil să fi fost coroborată și cu raționalizarea parțială a cursului Dunării, prin lucrări de îndiguire.

1.2 Importanța cunoașterii apei în natură

În general prin apă înțelegem un lichid incolor, inodor și transparent, având compoziția moleculară din doi atomi de hidrogen și unul de oxigen. Pe Terra apa este cel mai răspândit element lichid. Ea se regăsește în mări și oceanele lumii, în albiile apelor de suprafață, în apele subterane și în atmosfera terestră.

Cunoașterea caracteristicilor apelor naturale include regimul apelor meteorice, al apelor subterane, a cursurilor de apă de suprafață și, în zonele costiere, a regimului apelor marine.

1.2.1 Apele subterane

Importanța cunoașterii modului de distribuție a apelor subterane este vitală pentru rezolvarea corectă a problemelor de hidrotehnică aplicate în construcții hidrotehnice și hidroedilitare, în gestionarea resurselor de apă cu ajutorul acestor construcții și în stabilirea mecanismului acțiunii statice și dinamice a apelor naturale asupra elementelor construcțiilor hidrotehnice.

În ansamblul lor, apele subterane determină calculul, dimensionarea și realizarea unor importante aplicații practice:

- captări pentru alimentări cu apă;
- construcții hidrotehnice și hidroedilitare;
- fundații la construcții industriale și civile;
- drenaje și desecări;
- lucrări pentru prevenirea alunecărilor de teren;
- consolidări de maluri și terase;
- construcția căilor de comunicație terestre și pe apă;
- construcția de poduri și podețe.

Modul de distribuție a apelor subterane este complex, iar mecanismul circulației acesteia se stabilește pe baza studiilor geotehnice locale pentru fiecare construcție în parte.

Apa se regăsește sub scoarța pământului în diverse forme, în porii pământurilor sau a rocilor neomogene:

- vapori de apă;
- apa higroscopică;
- apa peliculară;
- apa de gravitație;
- gheața.

Vaporii de apă se regăsesc în structura pământurilor ocupând locurile dintre granulele lor. În interiorul pământului acești vapori circulă din zone cu presiune mai mare spre zone cu presiune mai mică, tinzând să echilibreze presiunea.

Datorită circulației și proprietăților lor de a migra pe distanțe relativ mari, vaporii de apă pot afecta în special fundațiile construcțiilor hidrotehnice. Este posibil ca la momentul efectuării studiilor geotehnice necesare realizării acestor construcții, forajele să se facă în zone cu presiune scăzută, care să nu permită detectarea de vapori de apă. În timp, prin echilibrarea presiunii, ei pot să satureze terenurile de construcții, iar prin condensare să se transforme în apă lichidă, modificând structura pământurilor.

Apa legată chimic este apa care intră în compoziția mineralelor. Această apă este legată de scheletul lor.

Ea determină în mod direct structura chimică a mineralelor care intra în compoziția rocilor și a pământurilor, determinând în mare măsură modul de cristalizare a scheletului mineral.

Din acest punct de vedere această apă determină în mod direct calitatea pământurilor de fundare, ridicând probleme de amplasament și de determinare a soluțiilor tehnice care trebuie

alese în vederea realizării fundațiilor la construcțiile hidrotehnice de mare anvergură: baraje, consolidări și sprijiniri de maluri și terase, regularizări de cursuri de apă.

De asemenea, structura scheletului cristalin al pământurilor ridică importante probleme tehnice la excavațiile și săpăturile ce sunt necesare în vederea realizării de canale pentru aducțiuni de apă, irigații sau în vederea dezvoltării unor căi de comunicații pe apă.

Apa legată chimic se regăsește fie sub formă moleculară: H_2O , fie sub formă de ioni negativi de hidroxid HO^- sau pozitivi de H^+ .

Apa legată fizic este acea apă care înconjoară granulele minerale sub acțiunea unor forțe fizice. Această apă influențează foarte mult proprietățile rocilor și ale pământurilor pe care se realizează construcțiile hidrotehnice. Datorita regimurilor de mediu diferite de sub scoarța terestră, dar mai ales a presiunilor la care este supusă, această apă are caracteristici diferite de apa liberă de la suprafața pământului.

Apa higroscopică – apa adsorbită - este apa care condensează pe suprafața particulelor, fiind strâns legată de particulele solide ale pământurilor prin forțe de natură electromoleculară. Condensarea apei are loc până când greutatea particulelor atinge higroscopicitatea maximă. Aceasta este diferită în funcție de natura rocilor din teren. Nisipurile au higroscopicitatea $H_m = 1\%$, pentru praf $H_m = 7\%$, pentru argile $H_m = 17\%$. Această apă se formează prin condensarea vaporilor și nu are capacitatea de a circula în teren decât dacă se transformă din nou în vapori.

Apa peliculară – apa liosorbită – este apa strâns legată aflată în imediata apropiere a particulei solide, legată de ea. Această apă orientează și alte particule de apă care vin în contact cu ele, formând o peliculă în jurul particulei solide. Apa peliculară se numește apa slab legată sau liosorbită. Ea formează un al doilea strat în jurul particulei solide, având o structură din ce în ce mai neregulată, cu cât este mai mare distanța față de granula particulei solide.

Apa peliculară influențează foarte mult proprietățile rocilor și ale pământurilor și poate fi îndepărtată numai prin evaporare. Ea se deplasează în roci doar când umiditatea depășește higroscopicitatea maximă, deplasarea făcându-se dinspre straturile umede înspre cele uscate, indiferent de așezarea acestor straturi. În funcție de această deplasare ea ridică importante probleme tehnice, care necesită a fi rezolvate în vederea realizării unor construcții hidrotehnice. Ea este cu atât mai importantă în regimul construcțiilor, cu cât mișcarea ei în sol este mai imprevizibilă.

Între apa higroscopică - adsorbită și apa peliculară - liosorbită nu există o limită bine definită, din acest motiv ele formează împreună apa legată fizic sau apa de constituție. Această apă nu poate fi separată în totalitate de nucleul solid nici printr-o forță centrifugă de 70.000 de ori mai mare decât accelerația gravitațională.

Apa gravitațională este apa liberă sau nelegată care ocupă golurile supracapilare și capilare rămase libere între miceli. Apa liberă este supusă numai forțelor gravitaționale. Ea exercită o presiune hidrostatică și hidrodinamică în golurile pe care le umple și, nu în ultimul rând, poate să dizolve plinurile rocilor și zonele de liant dintre acestea.

Din punct de vedere al resurselor de apă subterană această apă este cea mai importantă apă ca și pondere. Așadar, influența ei asupra mineralelor componente ale pământurilor și rocilor de fundare este cea mai importantă.

În funcție de modul de acumulare a apelor gravitaționale se stabilește regimul terenurilor de fundare: umiditatea, higroscopicitatea, consistența. Ea determină în mod direct alegerea soluțiilor tehnice pentru:

- amplasamentele construcțiilor hidrotehnice;
- realizarea fundațiilor la construcțiile hidrotehnice;
- îmbunătățirea terenurilor pentru fundații, unde este cazul.

Apa gravitațională se regăsește în sol sub câteva forme:

- apa freatică;
- apa de adâncime;
- apa capilară.

Gheața apare în porii terenului fie ca cristale izolate, fie ca lentile compacte. Temperatura de îngheț este diferită de cea a apei normale, ea înghețând succesiv: mai întâi apa liberă, apoi apa de constituție. Apa liberă în capilare îngheață la temperaturi care pot varia de exemplu de la $-6,4^{\circ}\text{C}$ în cazul unui tub capilar cu diametrul de 1,6 mm, până la $-18,5^{\circ}\text{C}$ în cazul unuia cu diametrul de 0,06 mm.

Dacă formarea cristalelor izolate nu este periculoasă, prin fenomenul de migrație a umezelii către locul înghețului, fenomen datorat faptului că forța de adsorbție crește pe măsură ce scade temperatura, se pot forma lentile care pot duce la distrugerea structurii terenurilor.

De aceea la realizarea construcțiilor de orice fel trebuie să se țină cont de adâncimea maximă de îngheț. Pe teritoriul țării noastre această adâncime este între 60 și 110 cm, conform STAS 6054-64, în funcție de condițiile climaterice ale diverselor zone.

1.2.2 Apele de suprafață

Apele de suprafață au un regim diferit de cele care se află în subteran. Această diferență se datorează faptului că în subteran apele circulă cu viteză redusă din cauza rezistențelor hidraulice foarte mari.

Apele de suprafață depind în mare măsură de fenomenele meteorologice, cu debite mari când precipitațiile sunt abundente și cu debite reduse în timpul sezoanelor cu precipitații reduse. În ansamblul lor, apele de suprafață determină calculul, dimensionarea și realizarea unor importante aplicații practice:

- în acumulările de apă realizate cu ajutorul barajelor în vederea utilizării acestor ape în diverse scopuri;
- în industria energetică, prin captarea puterii râurilor și transformarea energiei acestora în alte forme de energie, prin intermediul hidrocentralelor;
- în captarea apelor și aducțiunea acestora prin canale pentru irigații;
- în realizarea unor căi de comunicație pe apă, prin construcția unor șenale navigabile obținute prin lărgirea unor cursuri de apă existente sau prin săparea unor canale artificiale;
- în construirea de căi de comunicații terestre care traversează sau se găsesc în imediata vecinătate a cursurilor de apă;
- în lucrări de alimentare cu apă;
- în preluarea deversărilor de ape tehnice rezultate în urma diverselor activități umane;
- în preluarea regimului apelor meteorice și rezultate în urma topirii zăpezilor;
- în regularizarea cursurilor de apă și apărarea aglomerărilor urbane sau a zonelor inundabile.

Apele de suprafață formează un sistem complex și complicat de cursuri de apă care tind să se unească unele cu altele, formând ceea ce numim rețele hidrografice de suprafață. Cunoașterea comportamentului acestor rețele este importantă pentru problemele de hidrotehnică, constituind sursa unor importante procese naturale de eroziune a solului, inundații, infiltrații în sol și acumulări importante.

1.2.3 Caracteristicile apei de mare

După cum se știe, apa se află în mare cantitate pe planeta noastră, în special în stare lichidă. Apa prezintă proprietăți surprinzătoare în comparație cu alți compuși chimici, proprietăți

ce i-au permis să joace un rol determinant în apariția, dezvoltarea și perpetuarea vieții pe Pamânt [20]:

- plajă de temperaturi restrânsă în care se găsește în fază lichidă (0 – 100⁰ Celsius);
- densitate maximă (1000 Kg/m³) la 4⁰ Celsius;
- mărirea volumului cu 9 % la trecerea de la faza lichidă la faza solidă;
- posibilitatea de a dizolva un număr foarte mare de substanțe;
- căldură specifică mare.

Cea mai mare parte din suprafața globului este acoperită de apa de mare (70,78%).

Apa de mare conține o cantitate apreciabilă de săruri dizolvate. Cu toate că salinitatea variază foarte mult (între 5 ‰ în Golful Botnic și 40 ‰ în Marea Roșie) proporția relativă a principalilor constituenți rămâne constantă (afirmația face abstracție de zonele costiere unde aportul fluviilor și al apelor provenite din topirea zăpezilor este important). Salinitatea medie a apei de mare este de aproximativ 34 ‰.

Majoritatea sărurilor dizolvate se află sub formă de ioni. Principalele substanțe chimice din apa de mare, în procente din masa totală de săruri dizolvate este următoarea:

Cl ⁻	55,0
SO ₄ ⁻⁻	7,7
HCO ₃ ⁻	0,4
Br ⁻	0,2
F ⁻	0,003
H ₃ BO ₃	0,07
Na ⁺	30,6
Mg ⁺⁺	3,7
Ca ⁺⁺	1,2
K ⁺	1,1
Sr ⁺⁺	0,03

În cantități foarte mici se regăsesc în apa de mare aproape toate elementele chimice.

Temperatura apei de mare variază între -2 și 42⁰ Celsius. Apa cu salinitatea de 35 ‰ se menține lichidă până la -1,9⁰ Celsius.

Densitatea apei de mare depinde de salinitate, temperatură și presiune. La Ecuator valoarea densității este de $1,023\text{g/m}^3$. Crește odată cu scăderea temperaturii la latitudinile mai ridicate ($50^\circ\text{N} - 1,026$; $65^\circ\text{S} - 1,027$) pentru ca să scadă din nou în apele polare datorită scăderii salinității. Apa, ca orice lichid, este practic incompresibilă. Există totuși o variație a densității sesizabilă la presiuni mari. Rata de creștere a densității este de $0,0045 - 0,0049\text{ g/cm}^3$ la mia de metri.

Căldura specifică a apei de mare – puțin inferioară apei distilate – este superioară majorității lichidelor și solidelor. Raportul este de 2 până la 10. Acest lucru conferă apei mărilor și oceanelor rolul de „volant termic” al planetei.

Viscozitatea apei nu se modifică în mod liniar, odată cu creșterea temperaturii. Ea prezintă 4 salturi situate la 15 , 30 , 45 și 60°C . Specialiștii emit ipoteza că temperatura de 37°C a mamiferelor, situată la jumătatea distanței dintre 30 și 45°C , puncte de perturbații structurale a apei, nu este întâmplătoare. Pentru păsări și animale 45°C reprezintă un punct termic al morții. Peștii preferă apa între $20 - 27^\circ\text{C}$.

Din punct de vedere al poluării, este interesantă reacția chimică a apei de mare cu principalii poluanți, ca și modul în care aceasta se comportă ca solvent.

1.3 Bazinele hidrografice

Caracteristicile unei rețele hidrografice sunt:

- densitatea rețelei: lungimea tuturor ramificațiilor unui curs de apă cuprinsă în unitatea de suprafață – exprimată în km/km^2 ;
- profilul sinoptic în lung al unei rețele hidrografice (se realizează prin desenarea pe o diagramă a ramificațiilor importante ale respectivei rețele);
- profilul transversal – individualizează cursul unei singure ramificații.

Rețelele hidrografice se împart în funcție de felul în care are loc scurgerea apelor în bazine hidrografice distincte.

Un bazin hidrografic (Fig. 1.10) este acel perimetru în care curgerea gravitațională a apelor este delimitată de cumpăna apelor. Cumpăna apelor reprezintă locul geometric al punctelor de la care apele rezultate din precipitațiile meteorice se scurg spre un curs de apă.

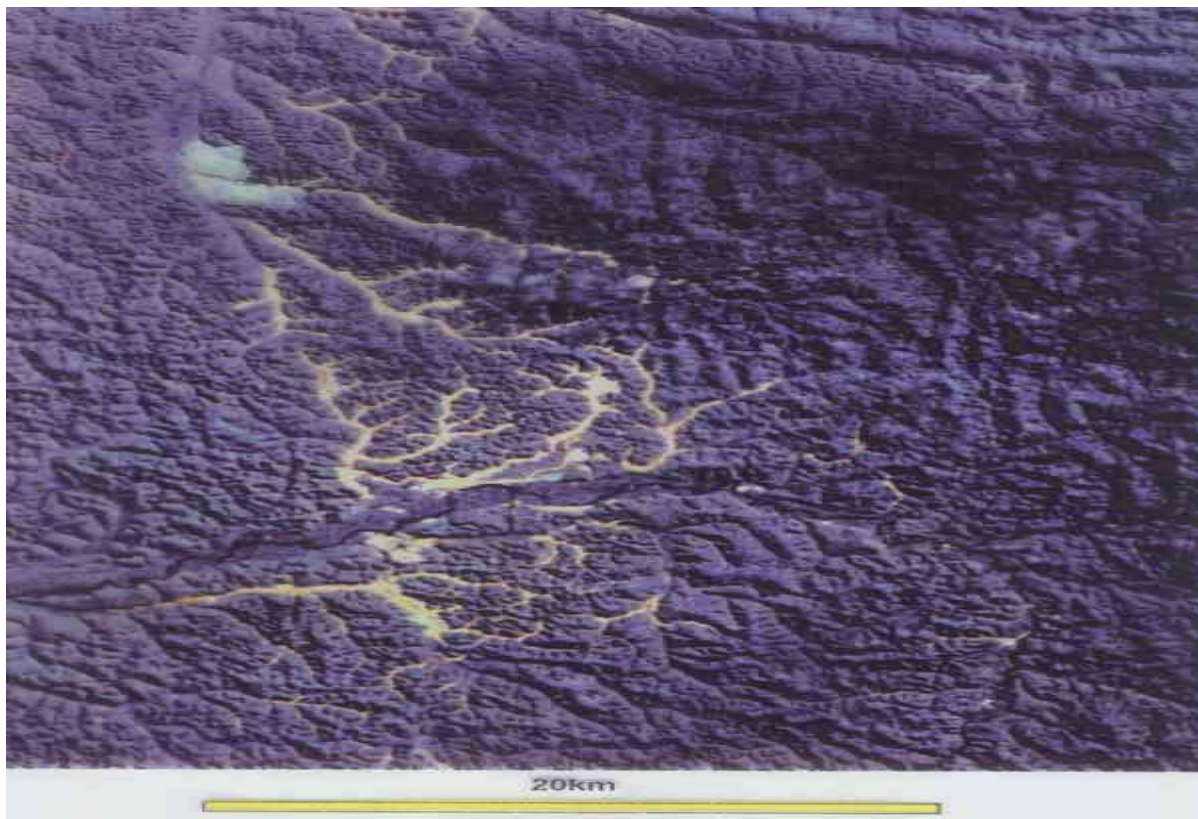


Fig. 1.10 Bazin hidrografic

Un bazin hidrografic este caracterizat prin mărimea suprafeței - exprimată în km^2 - și forma bazinului. După această ultimă caracteristică ele pot fi înguste sau largi; această caracteristică influențează în mod direct regimul hidrologic al cursurilor de apă, debitele de inundații fiind cu atât mai mari cu cât bazinul este mai larg.

Expresia cantitativă a formei bazinului este valoarea lățimii medii: $B = A/L$, unde:

B – lățimea medie a bazinului hidrografic;

A – aria bazinului hidrografic;

L – dimensiunea maximă a figurii geometrice a bazinului pe direcția generală de curgere a apei.

Alte mărimi care caracterizează bazinul sunt laturile sale medii pe partea dreaptă – B_d , respectiv pe partea stângă - B_s , a cursului de apă principal: $B_d = A_d/L$; $B_s = A_s/L$ (A_d și A_s sunt ariile din dreapta, respectiv stânga ale bazinului).

Coeficientul de asimetrie a bazinelor hidrografice este dat de relația:

$$a = 2 \frac{A_s - A_d}{A_s + A_d}. \quad (1.2)$$

Relieful și panta bazinului hidrografic sunt reprezentate pe hărți topografice prin curbe de nivel. Relația dintre curba de nivel și suprafața bazinului este dată de curba hipsografică, ca în Fig. 1.11:

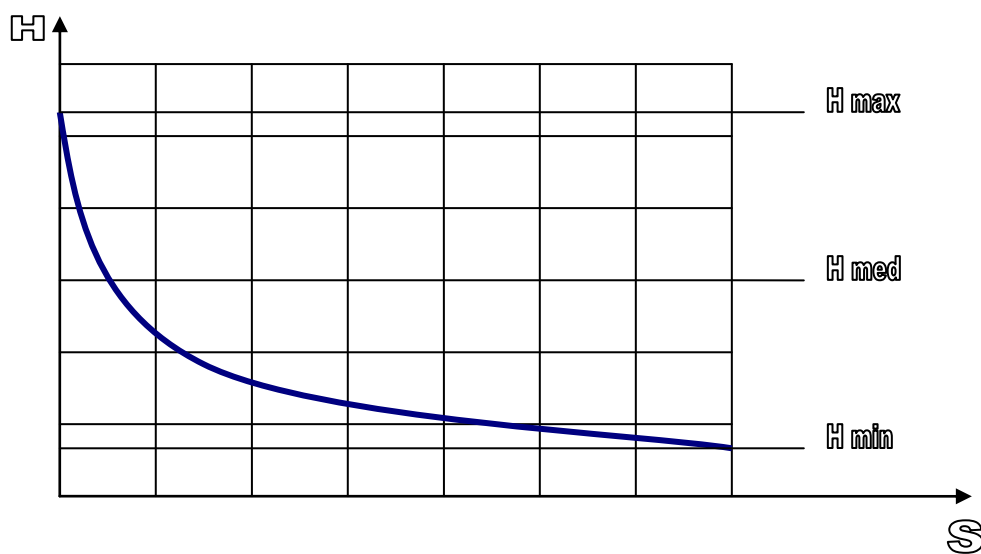


Fig. 1.11 Reprezentarea grafică a mărimii unui bazin hidrografic în funcție de altitudine

Panta medie a unui bazin hidrografic se determină calculând pantele parțiale între curbele de nivel ale unui număr de fâșii ale bazinului. Calculăm mai întâi lățimea medie a unei fâșii pentru două curbe de nivel aflate la o diferență de altitudine ΔH :

$$b_i = \frac{A_i}{L_{imed}}, \text{ unde:}$$

b_i – lățimea medie a fâșiei bazinului hidrografic;

A_i – aria fâșiei;

L_{imed} – media aritmetică a lungimii curbelor de nivel considerate.

Panta medie a fâșiei de bazin va fi:

$$I_i = \frac{\Delta H}{b_i}. \quad (1.3)$$

Cunoscând pantele fâșiilor de bazin se poate calcula panta medie a întregului bazin cu relația:

$$I_{med} = \frac{\sum I_i A_i}{A}, \quad (1.4)$$

care poate fi rescrisă:

$$I_{med} = \frac{\Delta H}{A} \sum L_{imed} [\text{‰}], \quad (1.5)$$

unde am notat: L_{imed} – lungimea medie a curbelor de nivel în km.

1.3.1 Caracteristicile principale ale cursurilor de apă

Cusurile de apă de la suprafața solului se cumulează și circulă prin depresiuni numite albie. O albie se caracterizează prin:

- secțiunea transversală;
- traseul în plan;
- profilul în lung.

Secțiunea transversală a unei albie cuprinde elemente caracteristice cu ajutorul cărora se determină locul geometric prin care se scurg apele, între maluri:

- albia minoră – locul prin care se scurg apele medii;
- talvegul – zona apelor celor mai adânci din albie;
- malurile – părțile laterale ale albiei minore;
- albia majoră – locul prin care se scurg viiturile;
- lunca – părțile laterale inundabile ale albiei majore;
- terasele – zonele mai ridicate, neinundabile de la marginea luncilor;
- versanții – racordul înclinat între lunci și terase.

Traseul în plan ce caracterizează cursurile apei de la izvoare pâna la vărsare este sinuos, format dintr-o serie de curbe și contracurbe, uneori mai puțin pronunțate alteori extrem de pronunțate, formând meandre (Fig. 1.12).



Fig. 1.12 Traseul unui curs de apă

Profilul în lung se caracterizează prin modificări permanente, cei mai importanți factori fiind panta și structura geologică a terenurilor pe care le traversează râul.

Panta medie a suprafeței apei unui râu este:

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (1.6)$$

unde:

H_1 , H_2 - altitudinile a două puncte considerate,

L – lungimea cursului între cele două puncte.

Panta râurilor este cuprinsă între 0,0001 și 0,005, în general mult mai pronunțată la munte decât la șes.

Suprafața liberă a apei din albie, numită luciul de apă sau oglinda apei are o înclinare în sens longitudinal apropiată sensibil de panta hidraulică. Pe lângă această înclinare ea are și o înclinare transversală pe sectoarele în curbă ale albiei.

Înclinația se manifestă printr-o supraînalțare a albiei spre malul concav și este direct proporțională cu curbura albiei și cu viteza de curgere a curentului; astfel luciul de apă face cu orizontala un unghi α , unde:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{mv^2}{R} \frac{1}{mg} = \frac{v^2}{Rg} . \quad (1.7)$$

În relația (1.7) am considerat:

$G = mg$ – forța de greutate;

$F_c = mv^2/R$ forța centrifugă;

R - raza de curbură a albiei;

v – viteza de curgere a curentului.

Vom avea supraînălțarea apei (Fig. 1.13):

$\Delta h = B \operatorname{tg} \alpha$, sau:

$$\Delta h = B \frac{v^2}{Rg} \quad (1.8)$$

unde:

Δh – supraînălțarea oglinzii apei spre malul concav;

B – lățimea albiei.

Un aspect important de care trebuie să se țină cont în dimensionarea construcțiilor hidrotehnice din zonele de curbură este faptul că, datorită acestei înclinări a suprefetei libere a apei în interiorul curentului iau naștere curenți transversali. Aceștia, compunându-se cu cel longitudinal, dau naștere unei mișcări elicoidale generale care influențează în mod major malurile prin depuneri pe malul convex și eroziuni ale malului concav.

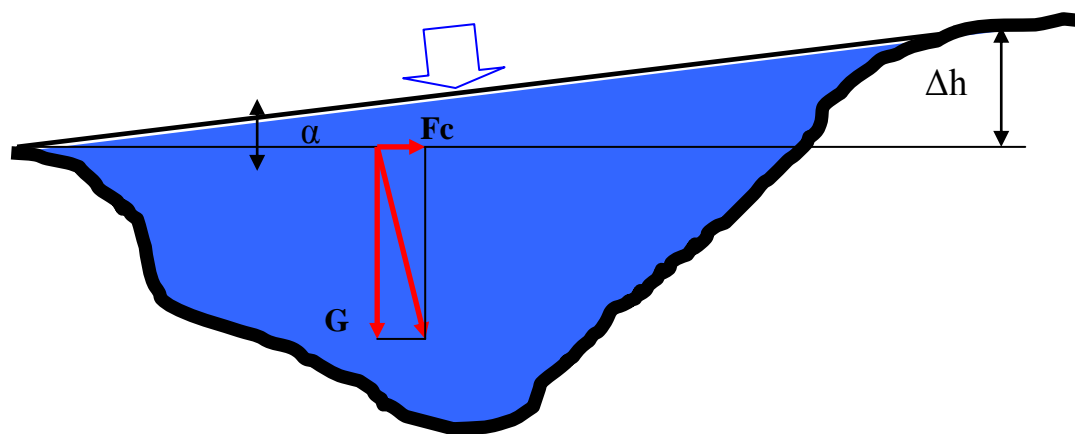


Fig. 1.13 Înclinarea albiei râurilor

În vederea realizării diferitelor construcții hidrotehnice de regularizare a cursurilor, de captare și acumulare a apelor, de construire a unor obiective în imediata vecinătate a lor sau de realizare a unor căi de comunicații care să le travezeze, trebuie să se determine caracteristicile cursurilor de apă.

Cele mai importante date studiate se referă la debitul de apă și la caracteristicile geologice ale terenurilor.

Debitul râurilor este cea mai importantă problemă pe care o ridică un curs de apă de suprafață când se are în vedere realizarea unei construcții hidrotehnice. Acesta se determină în funcție de secțiunea albiei și de viteza medie a curentului longitudinal de curgere prin relația:

$$Q = v_m S \text{ [m}^3/\text{s] , unde am notat:}$$

Q – debitul râului;

v_m – viteza medie a curentului longitudinal de curgere;

S – secțiunea albiei râului.

Cele două mărimi de care depinde debitul se pot determina prin măsuratori directe.

1.3.2 Viteza de curgere

Viteza de curgere se poate determina cu ajutorul flotorilor, cu moriști hidraulice, cu batometre-tahimetre sau cu alte instrumente de măsură cunoscute din hidraulică, cum ar fi tubul Pitot-Prandtl.

Cu flotori, viteza medie de scurgere a curentului longitudinal se determină măsurându-se prin observații directe viteza de scurgere la suprafață pe o atmosferă liniștită, fără vânt.

Vom obține la suprafață:

$$v = S/t$$

unde:

v – viteza măsurată la suprafața apei;

S – distanța parcursă de flotori ;

t – timpul necesar străbaterii distanței S .

Viteza medie de scurgere a apei în albie se determină prin formula:

$$v_{med} = v K,$$

unde:

v_{med} – viteza medie a curentului de scurgere longitudinală;

v – viteza măsurată la suprafața apei;

K – coeficientul de curgere al albiei, care se alege tabelar în funcție de raza hidraulică și rugozitatea fundului albiei. Aplicarea coeficientului K este necesară întrucât curgerea apelor nu este uniformă pe toată secțiunea apei, ea realizându-se, datorită interacțiunilor hidraulice dintre apă și profilul albiei, în straturi lamare. Aceste straturi sunt teoretic staționare în imediata vecinătate a pereților albiei și ating vitezele cele mai mari în centrul curentului de curgere (Fig. 1.14).

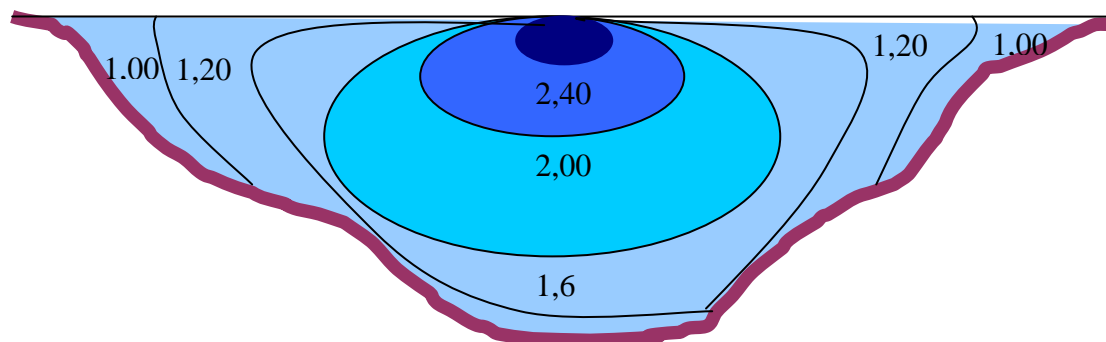


Fig. 1.14 Repartiția vitezei de curgere a apei pe secțiunea transversală a râului

1.3.3 Secțiunea de curgere

Determinarea secțiunii de scurgere se realizează prin măsurarea succesivă adâncimilor, la distanțe determinate astfel încât să permită desenarea cât mai exactă a profilului fundului albiei cu ajutorul sondeilor pe o secțiune transversală a râului.

Odată determinat profilul fundului se poate determina aria secțiunii transversale prin integrare. Calculul integralei se poate realiza prin metoda trapezelor.

$$A = \Sigma A_i,$$

unde:

A – secțiunea totală de scurgere;

A_i – secțiunea unui sector transversal de albie între două puncte de măsurare a adâncimii:

$$A_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} l,$$

unde:

h_i, h_{i+1} - adâncimile măsurate la capetele sectorului transversal de albie;

l – distanța dintre capetele sectorului.

Reprezentarea grafică a calculului secțiunii prin metoda trapezelor o vedem în Fig. 1.15:

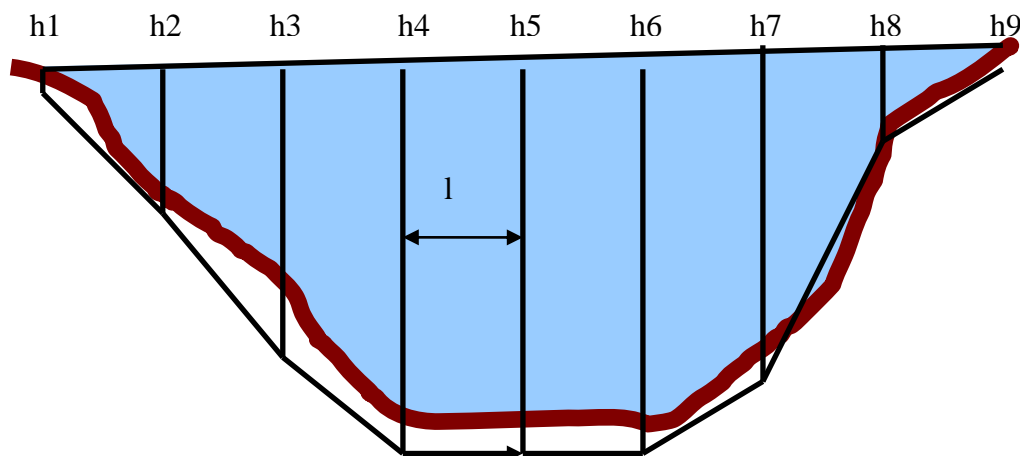


Fig. 1.15 Calculul secțiunii de curgere

1.3.4 Debitul de apă

Debitele de apă ale râurilor se măsoară prin metode indirecte – prin calcul, sau prin metode directe – prin observații.

Dintre metodele indirecte cele mai importante este și metoda indicatorilor. Aceasta din urmă se realizează prin introducerea unor soluții chimice, clorimetrice (NaCl) sau radiometrice și detectarea indicatorilor într-o secțiune din aval.

Metodele indirecte cele mai cunoscute sunt: metoda cu canal tip Venturi, care e utilizează numai la debite foarte mici de apă, cu mișcare turbulentă, unde alte metode sunt inexacte și metoda cu deversor, care nu este însă foarte exactă deoarece apar colmatari de aluviuni în amonte de deversor.

În consecință, cea mai apropiată valoare de debitul real o dă determinarea valorilor calculate pe baza secțiunii și a vitezei de curgere.

Calculul se realizează la fel ca și calculul secțiunii, împărțindu-se albia în fâșii sau sectoare transversale.

Debitul pe o fâșie de lățime l este:

$$dQ_i = v_i dA_i,$$

în care am notat:

Q_i – debitul pe o fâșie;

A_i – suprafața fâșiei;

v_i – viteza medie de curgere pe vertical pe fâșia respectivă.

Debitul total a râului va fi:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = l \sum_{i=1}^n h_i v_i,$$

unde n este numărul de fâșii de lățime l .

1.3.5 Puterea unui curs de apă

Datorită mișcării gravitaționale dinspre curbe de nivel mai înalte spre curbe mai joase, apele curgătoare produc un lucru mecanic realizat prin reducerea energiei potențiale și transformarea acesteia în lucru mecanic.

Cunoașterea puterii unui curs de apă este importantă pentru calculul și dimensionarea construcțiilor hidraulice asupra cărora se manifestă acest lucru mecanic și, acolo unde este cazul, pentru cunoașterea capacității utilizării energiei râului în realizarea unor amenajări hidroelectrice, prin construirea de baraje sau prin derivație.

Lucrul mecanic teoretic brut realizat de un curs de apă este direct proporțional cu greutatea apei și înălțimea de la care cade:

$$L = GH,$$

unde am notat:

L – lucrul mecanic realizat de cursul de apă;

G - greutatea apei aflată în cădere;

H – înălțimea de la care cade apa.

Puterea teoretică va fi:

$$P_t = \rho g Q H,$$

în care:

Q - debitul râului.

Valoarea puterii determinată cu formulele respective se numește putere brută sau putere cadastrală.

Pe un sector oarecare se poate determina puterea kilometrică – P_k care este egală cu puterea teoretică raportată la lungimea sectorului cercetat:

$$P_k = \frac{P_t}{L},$$

în care:

P_k – puterea kilometrică;

L – lungimea sectorului cercetat.

Putem calcula așadar și puterea totală P_T a unui râu dacă însumăm puterea kilometrică a râului pe toată lungimea lui:

$$P_T = \sum_{k=1}^n P_k ,$$

unde cu n am notat numărul total de sectoare pe toată lungimea râului.

Pentru un bazin hidrografic, puterea specifică se obține raportând puterea totală P_T la suprafața totală a bazinului:

$$P_s = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^n P_k .$$

unde cu S am notat suprafața totală a bazinului hidrografic.

1.4 Acțiunea apei mării asupra construcțiilor hidrotehnice de coastă

Suprafața scoarței terestre este acoperită într-un procent de peste 70% de apă. Procentual peste 90% din ceea ce numim apă se află în Oceanul Planetar. Doar câteva procente se regăsesc în “apa dulce”.

Din punct de vedere al construcțiilor hidrotehnice ne interesează în special modul în care această apă își produce efectele la limita cu uscatul.

În aceste zone se construiesc unele dintre cele mai importante construcții hidrotehnice, cele mai importante fiind:

- construcțiile hidrotehnice destinate reducerii sau înlăturării efectelor apelor marine asupra coastelor sau a zonelor inundabile: diguri sparge-val, diguri de protecție a zonelor de uscat, consolidări de maluri (Fig. 1.16).
- construcții hidrotehnice destinate transporturilor navale și a transferurilor multimodale de mărfuri: porturi, ecluze, șenale navigabile.

Așadar, acțiunea apelor mării trebuie luată în calcul acolo unde se realizează aceste tipuri de construcții. Ele își produc un dublu efect asupra acestor construcții:

- efecte hidro-aerodinamice, datorită acțiunii combinate a vântului, valurilor și curenților;
- efecte mecanice – datorate acțiunii mecanice a valurilor, manifestate prin fenomene de transmitere a impulsului mecanic dinspre val înspre elementele constructive ale construcțiilor hidrotehnice, cavitație la suprafața acestora și frecare între apă și acestea. La aceste efecte se pot adăuga șocurile mecanice ale ciocnirii cu navele în timpul manevrelor. Aceste efecte au drept consecință o uzură în timp a elementelor construcțiilor prin erodarea abrazivă sau distrugerea mecanică a elementelor construcțiilor hidrotehnice;



Fig. 1.16 Construcții hidrotehnice de apărare a unui bazin portuar

- efecte fizico-chimice – datorate compoziției chimice a apei de mare, infiltrațiilor apelor în zonele de fundare și ciclurilor termice ale apei. Aceste efecte care se manifestă fie printr-o corodare accelerată a suprafețelor de contact, fie prin slăbirea rezistenței zonelor de fundare ori chiar prin reducerea rezistenței materialelor utilizate la realizarea elementelor construcțiilor hidrotehnice.

Valurile sunt mișcări ale suprafeței libere a masei de apă. Ele se produc datorită unui număr de factori care influențează masa de apă, dintre care cei mai importanți sunt:

- frecarea dintre apă și curenții rezultați din mișcarea maselor de aer;
- mișcările seismice și alunecările subacvatice sau din imediata vecinătate a mării;
- atracția gravitațională exercitată de satelitul natural al Pământului;
- mișcări ale unor corpuri la suprafața apei sau în imediata ei apropiere.

În interiorul valului traiectoriile particulelor de lichid sunt cercuri de rază descrescătoare odată cu adâncimea (vezi capitolul 4).

Amplitudinea valului la suprafață reprezintă raza cercului de mișcare a particulei de lichid.

Raza de mișcare variază exponențial cu adâncimea după legea (Fig. 1.17):

$$r = a_1 = a_0 e^{\frac{2\pi z_1}{\lambda}}$$

unde:

a_0 - amplitudinea valului la suprafață;

λ este lungimea de undă a valului;

z_1 - adâncimea apei.

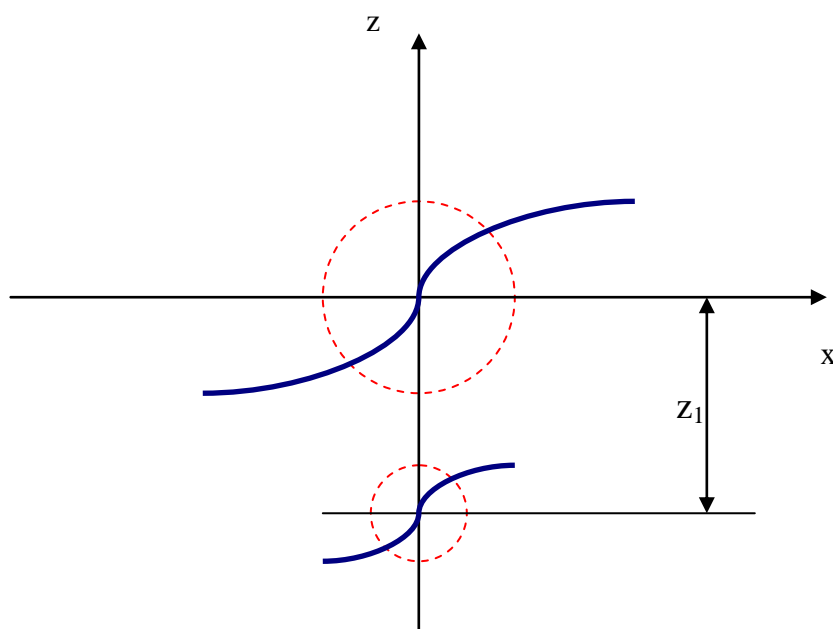


Fig.1.17 Variația amplitudinii valului cu adâncimea

Înălțimea valului se definește ca fiind distanța dintre o creastă și un gol de val:

$$h = 2 a_0.$$

Datorită faptului că la suprafața liberă a apei deplasarea unei crează iluzia unei deplasări a maselor de apă, valul poartă și denumirea de val călător.

În apropierea coastelor, acolo unde ne interesează în mod special comportamentul valurilor pentru a studia efectul acestora asupra construcțiilor hidrotehnice, înălțimea h a valului depășește adâncimea datorită profilului fundului mării. Din această cauză în zonele de coastă apare o dereglare a mișcării uniforme a valului, caracterizată prin formarea de creste și spargerea valului de țărm (Fig. 1.18).

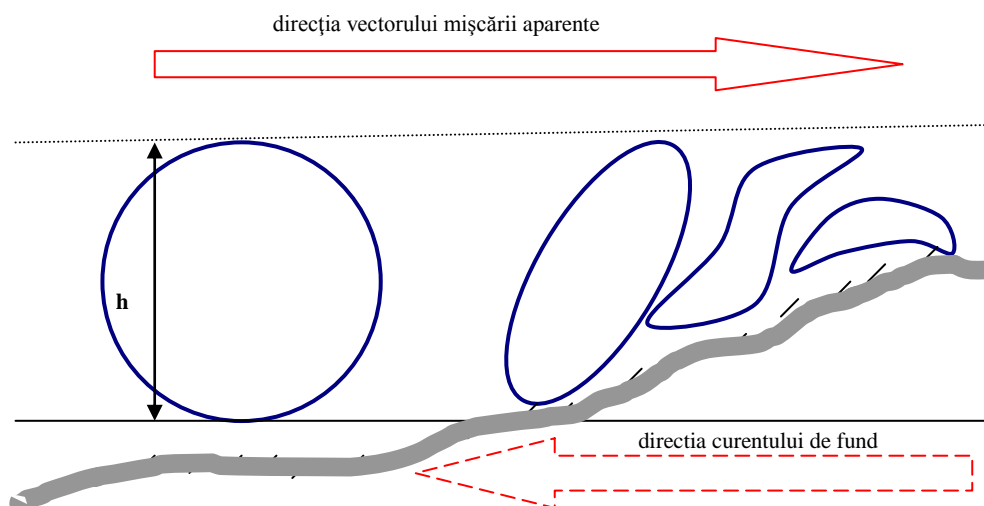


Fig. 1.18 Deformarea valurilor în apropierea malului

Această dereglare a uniformității transmiterii undei este responsabilă pentru apariția unui complex de fenomene, a căror rezultată este o mișcare turbulentă specifică acestor zone de delimitare a țărmlui (Fig. 1.19).

Mișcarea include fenomene dintre care cele mai importante sunt cele de cavitație, de transmitere a unui impuls mecanic în funcție de mărimea și forța valului de origine prin spargerea acestuia de limitele fixe ale țărmlui, curenți gravitaționali de fund având drept consecință defluirea apei în sensul invers al transmiterii undei și altele.



Fig. 1.19 Spargerea valurilor în apropierea coastei

Această mișcare complexă trebuie avută în considerație, în funcție de caracteristicile fiecărei zone costiere atunci când se dimensionează, se proiectează și se execută orice tip de construcții hidrotehnice sau hidroedilitare în larg sau pe țărm.

2. Metode de studiu ale acțiunii apei asupra construcțiilor hidrotehnice

În general, fenomenele hidraulice sunt deosebit de complexe, ceea ce face dificilă studierea lor.

Această complexitate a fenomenelor hidraulice a făcut să se încerce studierea lor prin mai multe metode care să permită obținerea unor rezultate ce pot fi aplicate în practică.

Metodele folosite în studiul mecanicii fluidelor pot fi grupate în două mari categorii: metode teoretice și metode experimentale.

2.1 Metoda infinitezimală

Este o metodă teoretică folosită încă de la fundamentarea hidraulicii ca știință modernă.

În esență, această metodă constă în aplicarea legilor generale ale mecanicii teoretice (legea conservării masei, legea conservării energiei, teoremele impulsului etc.) atât referitoare la punctul material cât și la sistemele de puncte materiale a unui model idealizat, acceptat pentru corpurile fluide.

Acest model este modelul de mediu continuu folosit pentru reprezentarea corpurilor fluide și care înlocuiește structura reală, discontinuă, moleculară a fluidelor printr-o structură continuă și omogenă înzestrată cu toate proprietățile fizice macroscopice ale fluidelor. Oricât am diviza acest mediu continuu se obțin fracțiuni care păstrează proprietăți fizice ale întregului, fracțiuni care se numesc particule fluide. Forma acestor particule este arbitrară, ceea ce ne permite să alegem forma cea mai convenabilă pentru o particulă fluidă în funcție de problema pe care o studiem la un moment dat.

Înlocuirea structurii reale discontinue prin această structură continuă este justificată de faptul că orice moleculă de fluid exercită o influență semnificativă doar într-un spațiu restrâns în jurul ei.

Dimensiunile corpurilor fluide și solide care intervin în desfășurarea diferitelor fenomene hidraulice sunt mult mai mari decât dimensiunile spațiului în care se face simțită influența unei molecule.

Deci, dacă dimensiunile corpurilor fluide și solide le considerăm de un anumit ordin de mărime, atunci dimensiunile particulelor fluide sunt infiniți mici, de ordinul întâi față de aceste corpuri, iar moleculele sunt infiniți mici, de ordinul doi.

Deci, particulele fluide sunt suficient de mari în raport cu moleculele, astfel încât se poate considera că sunt alcătuite dintr-o infinitate de molecule, iar în cadrul unei particule influența unei molecule este ne semnificativă.

La rândul lor, particulele fluide sunt suficient de mici în raport cu dimensiunile corpurilor solide și fluide, astfel încât se poate considera că un corp fluid este alcătuit dintr-o infinitate de particule fluide.

La scara la care se desfășoară fenomenele hidraulice, cel mai adesea este suficient dacă ne oprim cu diviziunea la nivelul particulelor fluide fără să apelăm la structura discontinuă moleculară.

Marele avantaj al utilizării modelului de mediu continuu constă în aceea că proprietățile fluidului pot fi descrise cu ajutorul funcțiilor continue, și în consecință se vor putea utiliza cunoștințele legate de aceste funcții din analiza matematică, din teoremele ecuațiilor diferențiale ordinare, cu derivate parțiale și altele.

2.2 Metoda analizei dimensionale

Este o metodă teoretică a cărei aplicare se recomandă atunci când folosirea metodei infinitezimale nu conduce la găsirea unei legături funcționale între diferiți parametrii care intervin în fenomenul hidraulic studiat.

În această metodă, pe baza principiului omogenității dimensionale și a unor considerații privind natura mărimilor fizice care intervin în fenomenul respectiv, se pot obține informații privind modelul matematic al fenomenului respectiv.

Chiar dacă această metodă nu permite întotdeauna obținerea unei legături funcționale explicite între factorii care intervin în fenomenul respectiv, rezultatele obținute permit orientarea cercetărilor de laborator.

Prima etapă a analizei dimensionale este stabilirea mărimilor fizice ce descriu fenomenul fizic. Analiza dimensională utilizează *metoda Rayleigh* și *teorema produselor adimensionale* sau *teorema Π* .

Conform metodei Rayleigh, o mărime fizică care caracterizează un fenomen fizic este proporțională cu un produs de puteri al celorlalte mărimi fizice ce intervin în fenomenul analizat. Impunând acestei relații condiția omogenității dimensionale obținem un sistem de ecuații având ca necunoscute exponenții mărimilor fizice. În fenomenele mai complexe numărul ecuațiilor este

mai mic decât numărul necunoscutelor, sistemul fiind nedeterminat. Rezolvarea lui implică exprimarea unor necunoscute în funcție de celelalte, ceea ce face să apară un număr de mărimi adimensionale.

Metoda teoremei Π se bazează pe afirmația:

„Orice funcție implicită, dimensional omogenă, de mai multe mărimi fizice se poate reduce întotdeauna la o altă funcție având un număr mai mic de variabile adimensionale:

$$f(A_1, A_2, \dots, A_k, B_{k+1}, \dots, B_n) = 0 \quad (2.1)$$

în care A , reprezintă cele k mărimi fundamentale, iar B , cele $n - k$ mărimi derivate.”

În conformitate cu teoremei Π f se reduce la funcția:

$$\varphi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) = 0, \quad (2.2)$$

numită ecuația criterială,

în care:

$$\Pi_1 = \frac{B_{k+1}}{\prod_{i=1}^k A_i^{x_i}}, \Pi_2 = \frac{B_{k+2}}{\prod_{i=1}^k A_i^{y_i}}, \dots, \Pi_{n-k} = \frac{B_n}{\prod_{i=1}^k A_i^{z_i}}. \quad (2.3)$$

2.3 Metoda valorilor medii

Se bazează pe constatarea că pentru majoritatea aplicațiilor practice ale hidraulicii nu este necesară cunoașterea mișcării fiecărei particule de fluid, ci este suficientă cunoașterea valorilor medii ale acestor parametrii, definitorii pentru fenomenul respectiv.

Medierea se poate face într-un anumit volum sau pe o anumită suprafață.

Dacă se urmărește transportarea unui anumit debit de apă printr-o conductă, atunci nu interesează cunoașterea vitezei cu care trec diferitele particule de lichid prin secțiunea respectivă, ci este suficient dacă se cunoaște o viteză medie, adică acea viteză unică pe care ar trebui să o aibă toate particulele de lichid într-o curgere imaginară, astfel încât debitul să fie același ca în cazul curgerii reale.

Tot această metodă se utilizează atunci când se face trecerea de la ecuațiile diferențiale la ecuațiile cu diferențe finite, această transformare permițând integrarea numerică cu ajutorul calculului electronic.

2.4 Metoda coeficienților experimentali

Este o metodă cu caracter experimental, care se aplică cel mai adesea împreună cu una din metodele teoretice anterioare.

Această metodă constă în reproducerea în laborator la scară naturală și se utilizează pentru corectarea, cu ajutorul unor coeficienți, a erorilor introduse ca urmare a schematizărilor acceptate la utilizarea metodelor teoretice anterioare sau se folosește pentru etalonarea unor instrumente de măsură.

2.5 Metoda analogiilor

Metoda are atât un caracter teoretic cât și unul experimental.

Această metodă se bazează pe faptul că două fenomene fizice de natură diferită pot să aibă același model matematic (fenomene analoge).

În acest caz, este posibil să se stabilească o corespondență biunivocă între mărimi diferite aparținând celor două fenomene, astfel încât cunoașterea mărimilor dintr-un fenomen să permită determinarea mărimilor corespunzătoare din celălalt fenomen.

În hidraulică este foarte cunoscută analogia electrohidrodinamică a lui Pavlovski. Ea se bazează pe faptul că ecuația de mișcare a apei printr-un mediu poros omogen (curgerea apei printr-un pământ omogen) coincide cu ecuația de propagare a curentului electric printr-un mediu conducător de electricitate.

Dacă ne referim la ecuația lui Laplace:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0,$$

în cazul curgerii subterane a apei φ este sarcina hidraulică, iar în cazul propagării curentului electric φ reprezintă potențialul electric.

Măsurarea în laborator a potențialului electric se poate face mult mai ușor și cu aparatură de înaltă precizie, față de măsurarea în natură a sarcinii hidraulice în diverse puncte pentru un curent de apă subterană.

Din acest motiv problemele de curgere a apelor subterane „se traduc” în probleme analoge privind propagarea curenților electrici, această „traducere” referindu-se în special la condițiile inițiale și la condițiile la limită, adică tocmai acele condiții care asigură unicitatea soluției unei probleme.

Se trece apoi la realizarea în laborator a unui montaj electric corespunzător, se măsoară potențialul electric în punctele care ne interesează, iar valorile obținute se traduc apoi în valori corespunzătoare ale sarcinii hidraulice în teren în punctele care ne interesează.

Analogia hidraulicii cu electrodinamica este extinsă la acțiunile hidrostatice și sonice.

Tratând problema căderilor de presiune în elementele sistemelor de acționare sonică, Gheorghe CONSTANTINESCU a studiat variațiile de presiune ca fiind produse de următoarele cauze:

- rezistența la mișcare a fluidului;
- variația vitezei fluidului ;
- comprimarea și dilatarea fluidului și a conductelor.

Rezistența la mișcare a fluidelor

Datorită frecării presiunea statică se micșorează întotdeauna în sensul curgerii fluidului în conducte. Conductele se comportă ca niște rezistențe care se opun mișcării fluidelor.

Numind **rezistență la mișcare** factorul de proportionalitate, R , dintre caderea de presiune, Δp și debitul Q , ridicat la puterea m , vom avea :

$$\Delta p = RQ^m. \quad (2.4)$$

$m=1$, pentru regim laminar ; $R = R_l$ – rezistența liniară;

$m=1,75$ sau 2 , pentru regim turbulent ; $R = R_t$ – rezistența neliniară.

Se observă analogia cu rezistența electrică.

Variația presiunii datorită variației vitezei

Pentru a imprima fluidului o variație de viteză este necesară o variație de presiune.

$$\Delta p = \frac{1}{S} m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (2.5)$$

Dar :

$$Q = S \frac{dx}{dt} \text{ și } \frac{dQ}{dt} = S \frac{d^2x}{dt^2} . \quad (2.6)$$

$$\Delta p = \frac{m}{S^2} \frac{dQ}{dt} = L \frac{dQ}{dt} . \quad (2.7)$$

$$L = \frac{m}{S^2} \text{ coeficient de inertie.} \quad (2.8)$$

În cazul în care purtatorul de energie are densitatea ρ , lungimea conductei l și secțiunea de diametru d , coeficientul de inertie va fi:

$$L = \frac{\rho l S}{S^2} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho l}{d^2} . \quad (2.9)$$

Dacă ne interesează puterea consumată, vom avea:

$$P = Q \Delta p = QL \frac{dQ}{dt}, \text{ dar } P = \frac{dE}{dt} = QL \frac{dQ}{dt} \Rightarrow E = L \frac{Q^2}{2} . \quad (2.10)$$

E – energia de presiune transformată în energie cinetică într-un element hidraulic.

Se observă analogia cu inducția din electricitate.

Capacitatea hidraulică de deformare a coloanei de fluid

Dacă presiunea fluidului variază cu dp , volumul său variază cu dV .

Definim:

$$C = \frac{dV}{dp} , \quad (2.11)$$

capacitatea hidraulică de deformare a coloanei de fluid.

$$dp = \frac{1}{C} \frac{dV}{dt} dt = \frac{1}{C} Q(t) dt,$$

$$\Delta p = \frac{1}{C} \int_0^t Q(t) dt, \quad (2.12)$$

sau

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{C}. \quad (2.13)$$

Analogia cu capacitatea electrică este evidentă.

Se observă că metoda are un caracter teoretic legat de modelul matematic și de traducerea datelor dintr-un fenomen în altul și are și un caracter experimental legat de realizarea montajului electric și de măsurarea mărimilor electrice.

De asemenea, simularea pe calculatorul analogic a diferitelor fenomene din diverse domenii tehnice poate fi inclusă tot în metoda analogiilor, în acest caz analogia stabilindu-se între fenomenul din natură și fenomenele din calculatorul analogic.

2.6 Metoda modelării hidraulice - similitudinea

Este o metodă utilizată în hidraulică, având atât caracter teoretic cât și experimental.

Ea constă în reproducerea în laborator, la scară redusă a unor fenomene din natură.

Pe modelele reduse la scară se măsoară diferitele mărimi fizice și acestea „se traduc”, după anumite reguli, în mărimi omologe din fenomenul din natură.

Teoria care se ocupă cu stabilirea regulilor după care se face „traducerea” rezultatelor din fenomenul de pe model la fenomenul din natură se numește *teoria similitudinii*, iar cele două fenomene se mai numesc și *fenomene similare*.

Modelul este prototipul la scară: fiecărui punct de pe model îi corespunde un punct de pe preototip (puncte omoloage care determină curbe, suprafețe și volume omoloage).

Similitudinea geometrică: se caracterizează prin existența raportului de asemănare (scara) geometrică.

Similitudinea cinematică a două fenomene fizice se caracterizează prin existența similitudinii geometrice și prin existența unui raport constant al timpilor omologi (scara timpului).

Similitudinea dinamică a două fenomene fizice se caracterizează prin existența similitudinii geometrice și prin existența unui raport constant al forțelor omoloage (pe lângă similitudinea cinematică să existe un raport constant al maselor).

Similitudinea fizică completă a două fenomene fizice se caracterizează prin existența corespondenței biunivoce a tuturor dimensiunilor fizice și a tuturor mărimilor fizice. Similitudinea fizică completă se caracterizează prin existența raportului de similitudine sau scara mărimilor fizice.

Scările mărimilor fizice mărimilor fizice pot fi fundamentale sau derivate:

Scara lungimilor λ , scara maselor μ , scara timpilor τ , scara temperaturilor θ etc.

$$v_n = \frac{l_n}{t_n}; v_m = \frac{l_m}{t_m}; \Rightarrow k_v = \frac{v_n}{v_m} = \frac{l_n}{l_m} \frac{t_m}{t_n} = \frac{\lambda}{\tau}. \quad (2.14)$$

În mod analog se deduc scara accelerațiilor $k_a = \frac{\lambda}{\tau^2}$, scara forțelor $k_F = \mu \frac{\lambda}{\tau^2}$ etc.

În afară de scări se folosesc mărimi complexe adimensionale (complecși adimensionali) formate din mărimile fizice care intervin în evoluția fenomenului respectiv. Acești complecși se numesc invarianți de similitudine sau criterii de similitudine. În fenomenele asemenea criteriile de similitudine păstrează aceleși valori atât pe model cât și pe prototip.

Similitudinea completă se realizează dacă fiecare criteriu de similitudine care se poate forma cu mărimile fizice ale fenomenului păstrează aceeași valoare pe model și pe prototip.

Fenomenele asemenea au ecuații criteriale identice și reciproc.

Similitudinea completă este foarte dificil, de multe ori imposibil de realizat, și de aceea se utilizează similitudinea parțială (numai o parte din criterii păstrează aceleși valori pe model și pe prototip). Apar și efecte secundare – efecte de scară care se diminuează construind modelul cât mai aproape de dimensiunea prototipului.

Metodele de stabilire a criteriilor de similitudine sunt:

- metodele analizei dimensionale (Rayleigh și teorema π);
- utilizarea directă a mărimilor fizice cu rol preponderent în evoluția fenomenului;
- utilizarea ecuațiilor ce caracterizează fenomenul.

În mecanica fluidelor se utilizează următoarele criterii de similitudine:

$$\text{Reynolds, } \text{Re} = \frac{vl}{\nu}; \text{ Froude, } \text{Fr} = \frac{v^2}{gl}; \text{ Strouhal, } \text{Sh} = \frac{vt}{l} \text{ și Euler, } \text{Eu} = \frac{p}{\rho v^2}.$$

În aceste studii, foarte importantă este precizia cu care se efectuează măsurătorile pe model, ținând seama că de regulă erorile efectuate se amplifică atunci când rezultatele „se traduc” pentru fenomenul din natură.

Frank Tipler vorbea în cartea sa „Fizica nemuririi” despre simularea fenomenelor din lumea fizică cu ajutorul calculatoarelor ca fiind o mare parte din știința acestora. Un model matematic al fenomenului studiat este codificat într-un program. Modelul include atâtea atribute ale obiectului fizic câte sunt posibile având ca limitări cunoașterea acestor atribute și capacitatea calculatorului. Dacă modelul inițial este precis și dacă suficiente trăsături cheie ale obiectului real sunt captate de către model, atunci evoluția temporară a modelului va mima cu o precizie bună evoluția temporală a fenomenului real.

O simulare exactă în mod absolut a unui obiect sau fenomen se numește emulație. Până acum nu au fost emulate pe calculatoare decât alte calculatoare, deși mulți consideră, iar Tipler a demonstrat, că emulațiile adevărate sunt în principiu posibile.

2.7 Metoda statistică

Este o metodă teoretică bazată pe renunțarea la modelul de mediu continuu și adoptarea unui mediu dispers compus din grupări de particule și grupări de vârtejuri.

Nu se urmărește stabilirea parametrilor de mișcare ai fiecărei particule sau ai fiecărei grupări, ci determinarea unor valori medii și a probabilității de realizare a acestor valori.

În general, metoda se poate aplica în studiul fenomenelor de turbulență.

2.8 Calculul computerizat al curgerii fluidelor

Calculul computerizat al curgerii fluidelor – CFD (Computer Fluid Dynamics) cuprinde metodele de rezolvare ale ecuațiilor de bază ale Mecanicii Fluidelor implicând un număr mare de elemente. Această abordare conduce automat la un număr mare de necunoscute.

Analizele CFD sunt utilizate pentru:

- studiul conceptual și proiectare;
- dezvoltarea detaliată a componentelor instalațiilor;
- determinarea defecțiunilor și a cauzelor lor;
- reproiectare.

Tehnicile de bază CFD sunt:

Metoda elementului de frontieră (BEM – Boundary Element Method) este utilizată pentru curgerile potențiale. Pentru curgerile potențiale, integrala pe întregul domeniu poate fi transformată în integrala pe frontiera domeniului. Trecerea de la 3D la 2D simplifică grid-ul (rețeaua) ușurând astfel calculele computerizate.

Aplicațiile pentru curgerea potențială la nave – de ex. rezistența de val – care utilizează BEM se numesc metode panel. Metoda panel divide suprafața navei (uneori și o parte din suprafața înconjurătoare) în elemente discrete (panele). Fiecare din aceste elemente satisfac ecuația lui Laplace.

Metoda elementului finit (FEM - Finite Element Method) utilizează, ca punct de plecare, un model integral al fenomenului studiat. Acest model poate fi obținut, de exemplu, cu ajutorul calculului variațional. Această metodă se bazează pe aproximarea locală pe porțiuni sau subdomenii. Datorită folosirii unui model integral ca bază de plecare și a unor seturi de funcții continue pe porțiuni, metoda elementului finit nu mai este condiționată de existența unei rețele rectangulare. Cu ajutorul ei se pot discretiza practic corpuri geometrice oarecare. Datorită performanțelor sale ridicate, metoda elementului finit a devenit aproape o metodă standard de analiză și proiectare în ingineria construcțiilor și în alte domenii.

Metoda diferenței finite (FDM - Finite Difference Method) discretizează, ca FEM, întreg domeniul de fluid. Derivatele domeniului sunt approximate cu diferențe finite. Metoda diferențelor finite, face parte din categoria metodelor numerice de rezolvare a ecuațiilor cu derivate parțiale și deci și a ecuației lui Laplace. Folosește dezvoltarea în serie Taylor a funcției necunoscută $f(x,y)$ în jurul punctului (x_0, y_0) .

Metoda volumului finit (FVM – Finite Volume Method). Domeniul este împărțit într-un set de volume de control – celule. Ecuațiile cu derivate parțiale sunt discretizate într-un sistem algebric de ecuații.

Ecuația generală de conservare a masei, momentului și energiei este:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \Phi V dA = \oint_A \Gamma \nabla \Phi dA + \int_V S_\Phi dV, \quad (2.15)$$

în care primul termen se referă la curgerea nepermanentă, al doilea la convecție, al treilea la difuzie și ultimul la generare.

În funcție de valoarea lui Φ (1, u, v, h) ecuația generală se transformă în ecuație de continuitate, în ecuația x_{mom} , în ecuația y_{mom} sau în ecuația energiei.

2.9 Metode cercetare utilizate în teză

Putem afirma că în lucrarea de doctorat am utilizat cu precădere următoarele metode de cercetare:

- metoda infinitezimală;
- metoda analizei dimensionale;
- similitudinea hidrodinamică – metoda modelării hidraulice;
- calculul computerizat al curgerii fluidelor.

Modelarea matematică referitoare la viteza de deplasare a nivelului de lichid din ecluză se bazează pe rezolvarea analitică a ecuațiilor diferențiale, deci o **metodă infinitezimală**. Variația debitului de lichid în forma lui liniară este preluat din situația reală rezultată în urma experimentărilor făcute la ecluza Cernavoda. Au fost utilizate datele experimentale (metoda experimentală) ale unor importante instituții de cercetări pentru a compara rezultatul demersului matematic cu cel din natură – modul de variație al nivelului rezultat din calcul cu cel din măsurătorile experimentale. Deci metoda experimentală a fost utilizată în mod indirect pentru a valida modelul matematic infinitezimal.

Analiza dimensională a stat la baza modelării hidraulice. Am folosit funcția implicită care determină fenomenul acțiunii curentului, în special, dar și a vântului sau a valurilor asupra digurilor, funcție de mărimile fizice implicate: densitatea fluidului, viteza sa, viscozitatea cinematică (dinamică), presiunea etc. Funcția implicită se poate transforma într-o altă de un număr mai mic de variabile adimensionale – complecși adimensionali (criterii de similitudine) – care descriu fenomenul. Rămâne să vedem, în simularea ulterioară, care dintre criteriile de similitudine vor fi luate în considerare pentru a realiza o modelare cât mai corectă.

Metoda modelării hidraulice este metoda utilizată cu precădere în cercetarea noastră. Am utilizat pentru calculul **computerizat al curgerii fluidelor** simulatorul FLUENT (program care se bazează pe **metoda volumului finit - FVM**) pentru a analiza fenomenul atât în mărime naturală, cât și pe model. Comparând aceste rezultate ne-am putut da seama în ce măsură ideea de a utiliza programul FLUENT ca stand de probe este valabilă. Mai mult, am utilizat similitudinea la două scări pentru fenomenele care se petrec în cazul unor structuri lungi (discutăm aici despre digurile a căror lungime este mult mai mare decât lățimea sau înălțimea lor). Tot simularea cu programul FLUENT ne-a dat răspunsul asupra valabilității ipotezelor

noastre în ceea ce privește utilizarea unor scări diferite pentru lungime și pentru lățime (înălțime), dar și pentru utilizarea FLUENT-ului ca stand de probe și în acest caz.

3. Structuri hidrotehnice actuale. Canalul Dunăre-Mare Neagră

3.1 Generalități

Canalul Dunăre - Marea Neagră este o cale navigabilă care, în conformitate cu normele adoptate de Conferința Europeană a Ministerelor Transporturilor din 1992, corespunde clasei a VI-a (cea mai mare clasă de canale interioare). El figurează în Acordul european privind marile căi de navigație (A.G.N.), încheiat la Geneva la 19.01.1996, drept cale navigabilă de importanță europeană sub indicativul E 80-14.

Canalul Dunăre - Marea Neagră, împreună cu canalul Poarta Albă- Midia, Năvodari (Fig. 3.1) are funcțiuni complexe : navigație, gospodărirea apelor, producerea de energie electrică, alimentarea cu apă potabilă și industrială, evacuarea viiturilor provenite din precipitații. Schema hidrotehnică realizată are în vedere satisfacerea în bune condiții a tuturor folosințelor enumerate.

Întreaga activitate de proiectare a canalului, inclusiv studiile de laborator, cercetările experimentale și cele privind echipamentele hidromecanice și de automatizare au fost realizate integral în țară.

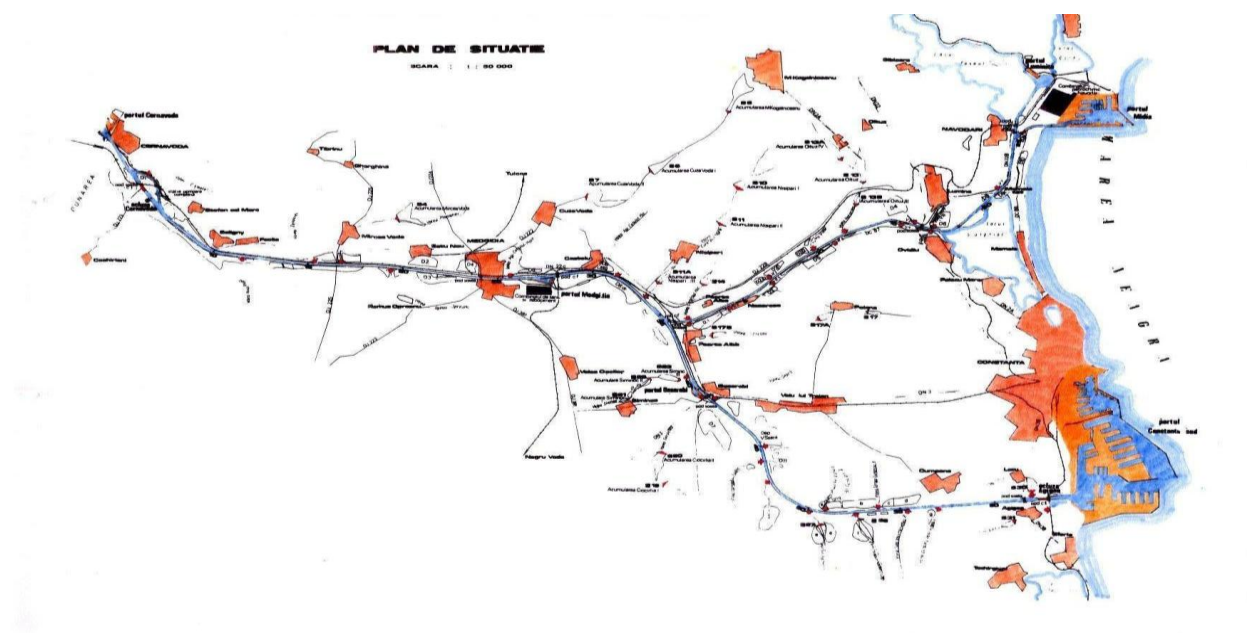


Fig. 3.1 Canalele navigabile Dunăre- Marea Neagră și Poarta Albă- Midia Năvodari

Alegerea traseului canalului navigabil Dunăre - Marea Neagră s-a făcut după examinarea a 8 grupuri de variante, principial diferite, iar precizarea acestuia în plan, pe diferite sectoare, a necesitat examinarea a încă 132 variante locale, care au avut în vedere folosirea maximă a condițiilor naturale de teren, a lucrărilor executate anterior în zonă, menținerea în funcțiune a căilor de comunicații și a sistemului de irigații existente.

A fost realizată varianta care se desprinde din Dunăre la Cernavodă și urmând Valea Carasu, traversează platoul Dobrogean ce separă bazinul Dunării de litoralul Mării Negre, pe direcția Nord Agigea.

3.2 Modificări morfologice pe Dunăre în regim barat și îndiguit

Acest capitol și cel ulterior se bazează pe studiile hidrologice efectuate pe Dunăre de către Institutul de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare [78] și I.P.T.A.N.A.-S.A. [79].

Schema de captare studiată prevede captarea gravitațională din Dunăre prin canalul cu dublă folosință (pentru captare și pentru navigație) de la Cernavodă.

Caracteristicile unei astfel de captări sunt determinate de caracteristicile hidrologice ale Dunării (niveluri și debite).

Problemele hidraulice ale funcționării captării se reduce practic numai la diminuarea cantității de aluviuni venită odată cu debitul lichid, în principal aluviuni în suspensie ce se depun la intrarea în priza și pe traseul canalului de aducțiune.

Depuneri de aluviuni se produc de asemenea în zona de racordare cu albia Dunării, datorită unui schimb de apă între canal și albie.

Intensitatea schimbului de apă, deci a depunerilor, este determinată în principal de nivelul în albie.

În etapa I de amenajare la niveluri mari și mijlocii, datorită schimbului permanent de apă între canal și albie, se depun, prin decantare, în zona de racordare a canalului cu albia Dunării, o parte din aluviunile în suspensie existente în apă.

De asemenea, o parte din aluviunile în suspensie existente în debitul captat se depun în această zonă datorită diferenței dintre viteza din albie și viteza din canal.

La niveluri mici, în perioada captării apei, debitul de schimb este foarte redus, viteza din canal este relativ aceeași cu cea din albie și deci nu există condiții de decantare a aluviunilor în suspensie. Condițiile de depunere a aluviunilor există numai în perioada când nu se captează apa. În această perioadă există un schimb de apă relativ redus între canal și albie.

Rezultă din acestea că în acumularea Cernavodă vor intra anual în medie (în perioada de calcul de 25 ani) cca 26 mil. tone/an, din care se vor depune cca 35 - 40%, adică aproximativ 10

mil. tone/an. În calculele efectuate după aceeași metodă folosită și în studiul acumulărilor din amonte, s-a considerat o granulometrie medie a aluviunilor transportate caracterizată prin $D_{65} = 0,03$ mm, față de valoarea $0,05$ mm considerată în calculele efectuate pentru C.H. Tr. Magurele (fig.3.2); aceasta pentru a ține seama de efectul de depunere preponderentă a fracțiilor mai mari în acumularea din amonte.

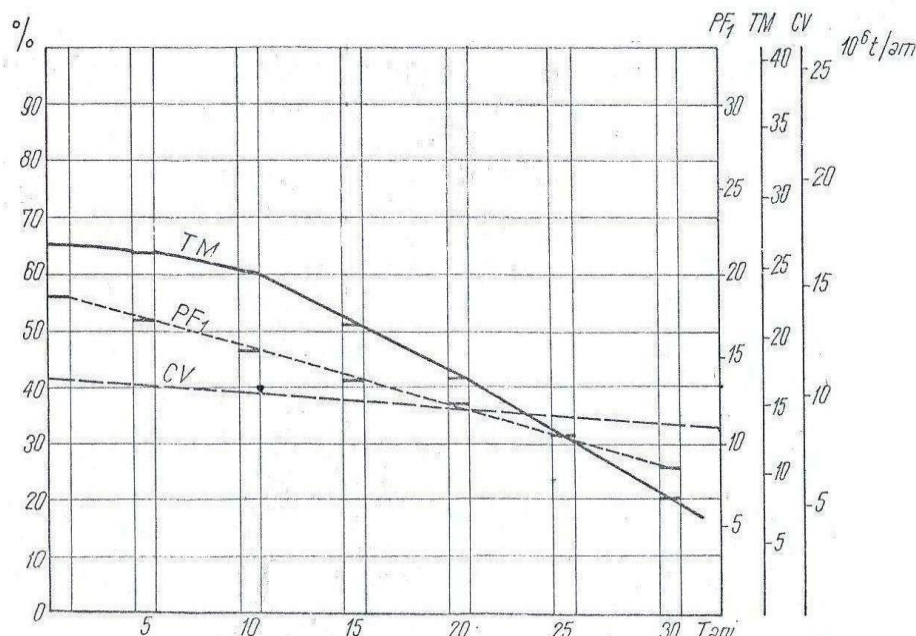


Fig. 3.2 Variația în timp a depunerilor medii de aluviuni în acumulările de pe Dunăre: Portul de Fier 1 (PF₁), Turnu Măgurele (TM), Cernavodă (CV)

Pe model, prin vizualizarea cinematicii scurgerii, s-au pus în evidență fenomenele hidrodinamice din această zonă.

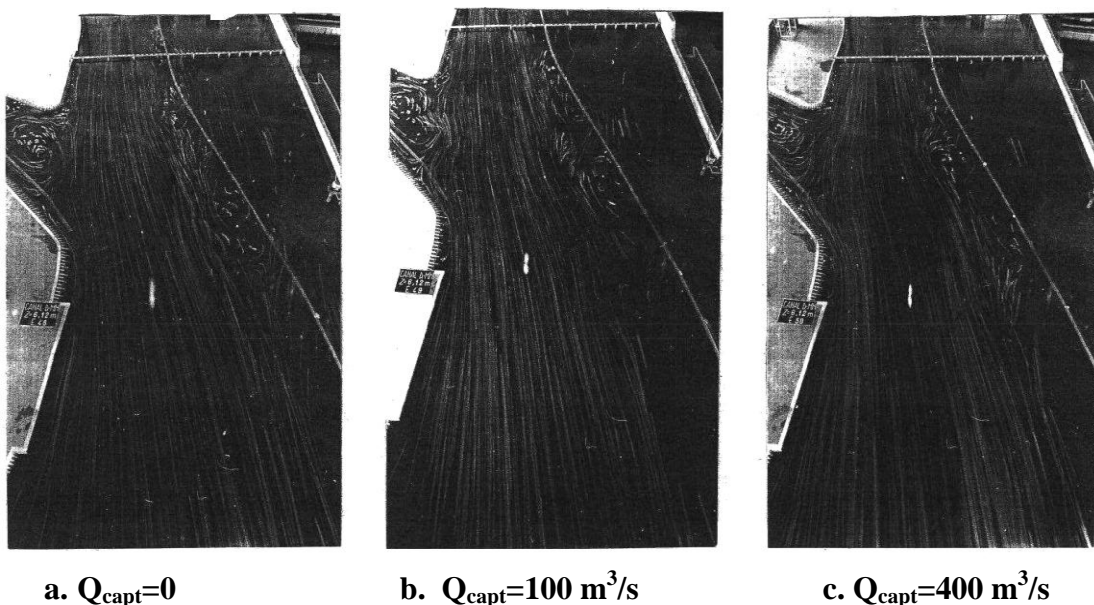
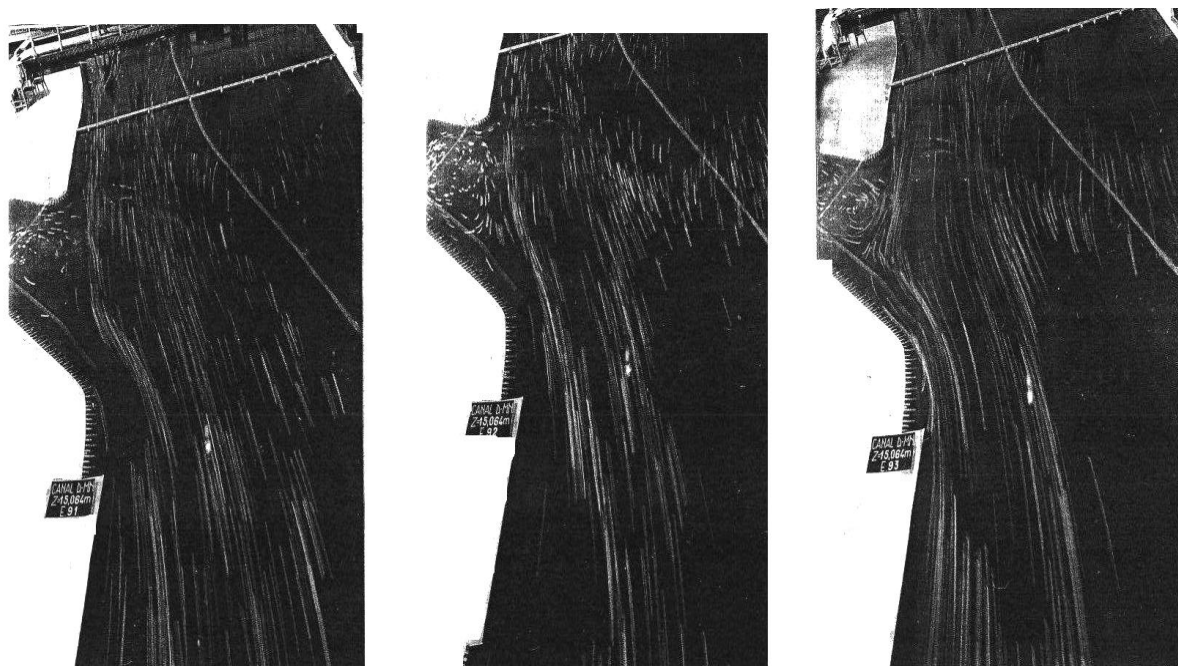


Fig. 3.3 Regim îndiguit $Z = 12$ m

Mișcarea rotațională existentă în această zonă materializează fenomenul schimbului de apă dintre canal și albie, fenomen care favorizează depunerea aluviunilor în zona de racordare a canalului cu albia Dunării (Fig. 3.3).

a. $Q_{\text{capt}}=0$ b. $Q_{\text{capt}}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ c. $Q_{\text{capt}}=400 \text{ m}^3/\text{s}$ **Fig. 3.4 Regim barat $Z = 15,06 \text{ m}$**

În etapa II de amenajare (regim de scurgere barat) există condiții favorabile depunerii aluviunilor, în zona de racordare, tot timpul anului, datorită nivelurilor mari și vitezelor mici din canal (Fig. 3.4).

Studiile s-au efectuat considerând amenajarea zonei în doua etape:

- etapa I - amenajarea canalului Dunărea-Marea Neagră și a unui nou port Cernavodă, amplasat imediat aval de intrarea în canal, în regim indiguit de scurgere în albia Dunării;
- etapa II- completarea amenajărilor din etapa I cu construcția unui baraj, prevăzut cu ecluză pentru navigație, la km 297 și deci condiții de scurgere modificate în albia Dunării (niveluri și debite).

Studiile privind turbiditatea apei din canalul navigabil au fost făcute pentru estimarea volumului mediu anual al dragajelor de întreținere pe canal și în porturile de pe canal.

Au fost considerate ca surse de aluviuni următoarele:

- a). alimentarea cu apa din Dunăre - regim indiguit și regim barat;
- b). afluenții canalului, având ca sursă ploile;
- c). aportul eolian semnalat (nu sunt date pentru evaluarea cantitativă).

Alimentarea cu apa din Dunăre

Volumul total de apă V_t pompat anual în canal a fost admis de 2,9 miliarde m^3/an .

Pentru determinarea volumului de aluviuni care pătrund în canal din Dunăre, s-au considerat două ipoteze pentru alimentare cu apă a canalului :

a).regim îndiguit;

b).regim barat.

a). Regim îndiguit

Pentru a calcula volumul aluviunilor în această ipoteză au fost folosite turbiditățile medii la Cernavodă în perioada apelor mari și în perioada apelor mici pe Dunăre, având în vedere:

$$\begin{array}{c} \text{ape mari} \\ \rho_{\text{mediu}} = 330 \text{ g/m}^3 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \text{ape mici} \\ \rho_{\text{mediu}} = 90 \text{ g/m}^3 \end{array}$$

Pentru diametrul mediu corespunzător s-a admis valoarea de $50\% = 0,018 \text{ mm}$

S-a considerat că turbiditatea corespunzătoare apelor mari se realizează patru luni pe an, iar în restul anului se mențin turbiditățile corespunzătoare regimului de ape mici (pomparea făcându-se din Dunăre în mod continuu în tot cursul anului).

În continuare s-a admis că întreaga cantitate de suspensii introdusă prin pompă decantează în canal, realizându-se o greutate volumetrică a depunerilor de $1,5 \text{ tone/m}^3$.

A rezultat un volum de depuneri $V = 213.000 \text{ m}^3/an$. Calculul este acoperitor dacă se ia în considerație faptul că pomparea apei nu se face direct din Dunăre, ci de pe traseu, la cca 4 km de albie, unde turbiditățile sunt mai reduse.

b). Regim barat

În lacul de acumulare are loc o decantare a materialului aluvionar. Ținând seama de studiile anterioare făcute în I.C.I.F., se apreciază reducerea turbidității până la 50% față de situația în regim indiguit.

Efectuându-se în continuare calculele ca mai sus, a rezultat un volum anual de depuneri de cca. $106.500 \text{ m}^3/an$.

Afluenții

Suprafața totală St a văilor care debușează în canal a fost considerată de 516 km² conform datelor avute la dispoziție în decembrie 1973.

Norma de aluviuni antrenate pe hectar și an, de către apele meteorice indicată în studiul I.M.H. – 1970 este de 5 tone/ha/an.

Dacă această cantitate ajunge în întregime în canal, volumul de depuneri care rezultă, admițând de data aceasta o greutate volumetrică $\gamma_v = 0,9 \text{ tone/m}^3$, este de 236.000 m³/an.

Volumul calculat mai sus corespunde ipotezei în care torenții afluenți sunt neamenajați.

Ca urmare a lucrărilor efectuate pentru combaterea eroziunii solului, norma de aluviuni antrenate scade la 3 tone/ha. Conform datelor avute la dispoziție, volumul de aluviuni depus, se reduce la 140.000 m³.

Circulația suspensiilor în canal

Zona de depunere a materialului aluvionar este influențată de viteza apei în canal, viteza de sedimentare și adâncimea apei în canal. Pentru debitul de 210 m³/s, pompat din Dunăre, secțiunea transversal a canalului, trapezoidală, cu lățimea la fund B = 70 m, panta taluzului 1:4,5, adâncimea apei în canal 5,5 m, a rezultat o viteză a apei $v_{med} = 0,328 \text{ m/s}$. (S-a admis o viteză de sedimentare $w = 0,2 \text{ mm/s}$).

Ținând seama de aceste mărimi se poate aprecia o lungime a zonei de decantare de cca 15 km.

Navigația pe canal influențează fenomenul de decantare și, ca urmare, depunerea se va face pe o lungime mai mare decât cea rezultată din calcul.

În lungul biefului I depunerile sunt neuniforme și se prezintă astfel:

- cele mai mari depuneri se înregistrează la racordarea cu Dunărea, în spatele molului de la gura canalului (malul drept), unde depunerile maxime în 10 ani de exploatare au fost de 2,50 ÷ 3,00 m, înălțimea medie fiind de 2,50 m;

- se constată de asemenea depunerea unui volum însemnat de aluviuni în Dunăre pe zona de racord, precum și în aval de gura de intrare în canal, sub forma unei fâșii care se întinde în lungul malului drept al Dunării, datorită scăderii vitezei apei în aceste secțiuni;

- pe sectorul km 0+350 ÷ km 1+000 depunerea medie este de 1,50 m, iar în continuare până la racordarea canalului de derivație (km 2+000), înălțimea medie a depunerilor este de 1,00 m;

- pe lungimea porturilor de așteptare amonte, în ecluza Cernavodă, nu se constată depuneri mai mari de 20 ÷ 30 cm în 10 ani de exploatare;

- pe canalul de derivație se constată de asemenea depuneri mai însemnate la intrarea pe acest canal.

Colmatările constatate pe bieful I și pe canalul de derivație, deși mai mici decât cele calculate inițial, au drept efect afectarea navigației în sensul că, în condițiile arătate, apar restricții de pescaj și convoiul nu mai poate naviga la capacitatea nominală. În plus, nu mai poate fi prelevat debitul de apă necesar folosințelor canalului (irigații, navigație, alimentare cu apă, energie, apa de răcire etc.). Se impune deci executarea periodică a dragajelor de întreținere și de restabilire a secțiunii udate, precum și intervenții în Dunăre, în primul rând în zona gurii canalului până la racordarea cu șenalul navigabil al Dunării.

Semnalăm de asemenea necesitatea de a se acționa la Gura Bala pentru schimbarea raporturilor debitelor ce curg în prezent la ape mici pe Borcea și pe brațul Dunărea Veche.

În lungul biefului II volumul aluviunilor a fost apreciat la cca 140.000 m³/an. Deși aportul de aluviuni este maxim la debușarea văilor afluate, nu au fost constatate depuneri sub forma de conuri la racordarea acestor văi datorită circulației navelor și debitului vehiculat care determină o distribuire a acestor aluviuni pe distanțe apreciabile.

Se constată totuși depuneri de ordinal 20 ÷ 25 cm/an în canalele de liniștire de la baza și la intrarea în canal pe văile ce au lucrările de racordare nefinalizate, în timp ce, acolo unde aceste lucrări au fost executate, eroziunile pe versanți și debușările de aluviuni în canal sunt neînsemnate.

Se apreciază că pe văile cu lucrări de racordare nefinalizate au apărut ravene și alunecări ce necesită lucrări ample de consolidare, așa cum se constată de exemplu pe valea Cumpana – Potârnichea (km 55+550, mal drept). Rezultă deci necesitatea terminării tuturor racordurilor de văi afluate și asigurarea scurgerii controlate a apelor pe aceste văi. S-a mai constatat o colmatare accentuată a văii Plantației (km 16+200) din cauza nerealizării podețului prevăzut pe drumul național 22C și a neîntreținerii ei de către deținătorul terenului respectiv.

Există și probleme legate de poluare. Pe valea Carataiul Mare (km 33+500 mal stâng) ajung în canal reziduuri de la ferma de porci Nisipari. Se impune intervenția urgentă a Administrației Canalelor Navigabile pe lângă Regia Autonomă Apele Române și Direcția Strategii și Reglementări pentru Protecția Mediului, pentru a obliga unitatea zootehnică Nisipari, dar și alte instituții, să nu mai deverseze apele uzate în canal, care este sursă de apă de calitate I – a.

S-a mai constatat ca în canal s-a dezvoltat, pe valea Carasu în special (primii 25 km), o vegetație filiformă. Vegetația s-a instalat în lungul malurilor, în apele cu adâncime redusă (până la $2 \div 3$ m), fiind mai bogată în exteriorul curbelor.

Vegetația s-a dezvoltat foarte mult după punerea în funcțiune a C.N.E. Cernavodă datorită deversării în canal a apei calde provenită din răcirea agregatelor nucleare - electrice.

Pentru ținerea fenomenului sub control sunt necesare studii speciale.

3.3 Studii hidraulice pe model

3.3.1 Condițiile experimentărilor

Studiile hidraulice pe model pe care le vom prezenta au avut drept scop stabilirea condițiilor de captare a unor debite de $100 - 400 \text{ m}^3/\text{s}$ din Dunăre la km 299 (actualul port Cernavodă) și a condițiilor de navigație în zona de racord a canalului cu Dunărea [78].

Schema de amenajare studiată (varianta inițială) prevede punctul de captare în actualul port Cernavodă, portul amplasat imediat aval de intrarea în canal, platforma portului la cota 21,00 mMB, cu baraj la km 297 cu ecluza pe malul drept (Fig. 3.5).



Fig. 3.5 Complexul hidroenergetic Cernavodă. Plan de situație

La efectuarea cercetărilor pe model s-a avut în vedere dubla folosință a canalului: pentru captarea apei și pentru navigație.

Problemele hidraulice ale celor două utilizări sunt diferite. De asemenea, cele două regimuri de scurgere considerate creează probleme hidraulice diferite pentru cele două folosințe.

Studiile s-au efectuat pe modele hidraulice nedistorsionate, cu pat fix și cu pat mobil, respectând criteriul Froude de modelare.

Modelele hidraulice pe care s-au efectuat cercetarile au reprodus la scara 1:100 și la scara 1:125 albia Dunării în zona Cernavodă pe o lungime de cca 3 km și primii 500 m din canal.

Nodul hidrotehnic Cernavodă (Fig. 3.6) cuprinde cele două ecluze și canalul de ocolire pe care este amplasată stația de pompare și stăvilarul destinat alimentării gravitaționale a biefului Cernavodă Murfatlar la cote ridicate ale apei în Dunăre sau la exploatarea în regim barat.

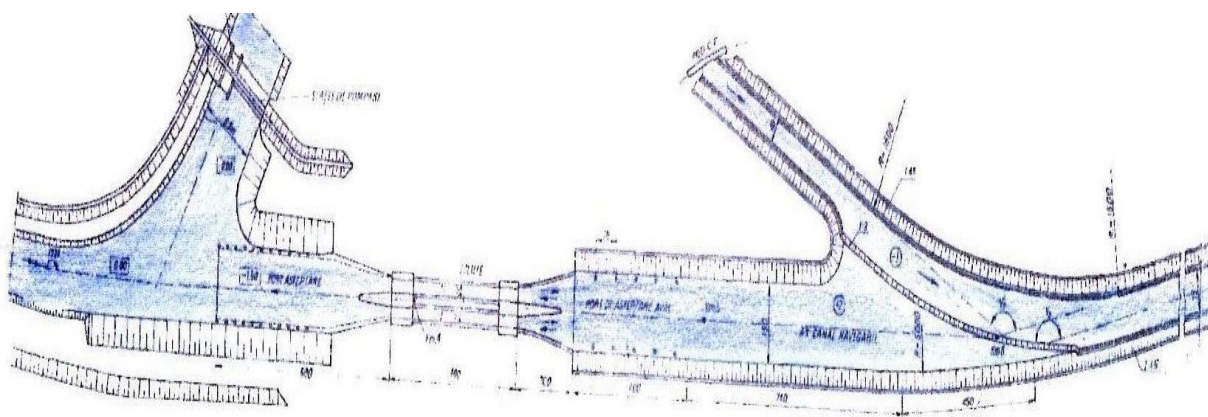


Fig. 3.6 Plan de ansamblu al nodului hidrotehnic Cernavodă

Cota apei în Dunăre +3,00 m ÷ +12,50 m (+ 18,50 m).

Cota apei în bieful Cernavodă-Murfatlar: +7,50 m

Debitul pompat: $Q = 216,50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Stația de pompare a fost studiată în două variante echipate astfel:

Varianta 1-a

7 pompe BVPS – 68 $Q = 23 \text{ m}^3/\text{s}$;

8 pompe OPQ – 165 $Q = 14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Patru dintre aceste pompe aveau destinația de evacuare a apelor provenite din ploi, din bieful Cernavodă – Murfatlar.

Varianta a 2-a

12 pompe proiectate și executate la Uzina de Pompe “Aversa” $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

În paralel cu frontul stației de pompare este prevăzută instalarea unui stăvilă care permite alimentarea gravitațională a biefului Cernavodă – Murfatlar în perioada când nivelul apelor în Dunăre este deasupra cotei +8,00m.

Experimentările s-au efectuat pe două modele de ansamblu care reproduc nodul hidrotehnic din amonte de ecluză (Fig. 3.7) și nodul hidrotehnic din aval.

Criteriul de modelare: Fr.

Experimentările privind condițiile de navigație și staționare ale navelor, s-au efectuat cu ajutorul unor convoaie 2 x 3 x 3000 tone, modelate la scara 1:25.

Problemele examinate pe cele două modele:

- cinematica curgerii apei în nodurile hidrotehnice în diverse condiții de exploatare;
- fenomenele hidraulice în porturile de așteptare în timpul ecluzarilor;
- navigația convoaielor împinse de 2 x 3 x 3000 tone prin nodurile hidrotehnice;
- staționarea convoaielor împinse în porturile de așteptare.

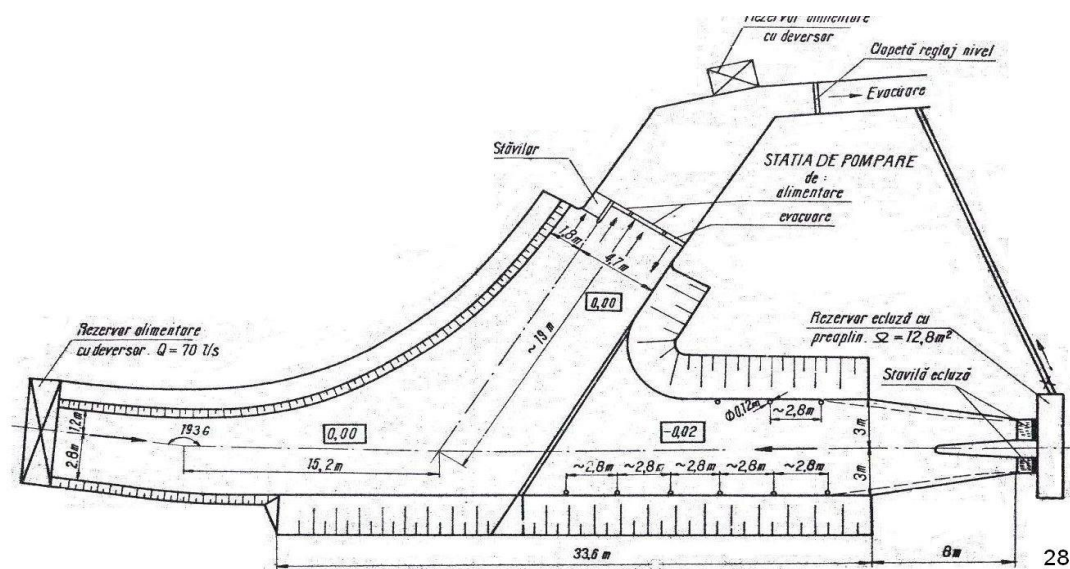


Fig. 3.7 Schema instalației experimentale pentru nodul hidrotehnic amonte

3.3.2 Cinematica curgerii apei în zona nodului hidrotehnic Cernavodă, amonte și aval

Experimentările privind cinematica curgerii prin **nodul hidrotehnic amonte** au fost efectuate în doua variante constructive și anume:

-Varianta 1 în care stația de pompare este echipată cu 15 pompe dintre care 4 având funcția de evacuare în Dunăre a apelor de ploaie din bief.

-Varianta 2 în care stația de pompare este echipată cu 12 pompe având numai funcția de pompare a apei în bieful Cernavodă – Murfatlar.

Cercetările pentru fiecare dintre cele două variante s-au efectuat pentru două niveluri ale apei în Dunăre (deci în amonte de ecluză și de stația de pompare):

-Nivelul apei la cota +3,00 m și $Q=216,50 \text{ m}^3/\text{s}$ reprezentând situația de exploatare cea mai defavorabilă în cazul funcționării stației de pompare (Fig.3.8).

-Nivelul apei la cota +8,00 m și $Q=216,50 \text{ m}^3/\text{s}$ reprezentând situația de exploatare cea mai defavorabilă în cazul funcționării stăvilarului (Fig.3.9).

În Fig. 3.10 este prezentată cinematica scurgerii la ecluzare.

Rezultatele experimentale au scos în evidență o distribuție destul de bună și paralelă a liniilor de curent. Anumite zone de curenți rotativi și de apă staționară, au fost constatați în zona frontului de aspirație în special datorită faptului că lățimea canalului în această zonă este mai mare decât lățimea stației de pompare și a stăvilarului ceea ce a impus efectuarea unor diguri transversale pe canalul de aducțiune. Aceste diguri au fost necesare și datorită faptului că stăvilarul și frontul de aspirație nu se afla pe aceeași linie.

În zona portului de așteptare aflat în aval de confluență nu au fost constatate fenomene importante de curgere.

În varianta cea mai defavorabilă (la nivelul apei +3,00 m) vitezele de curgere în lungul liniei de curent nu au depășit $0,30 \div 0,50 \text{ m/s}$ în zona portului de așteptare , în timp ce vitezele transversale pe axul canalului navigabil în zona de confluență, nu au rezultat mai mari de $0,20 \div 0,30 \text{ m/s}$.

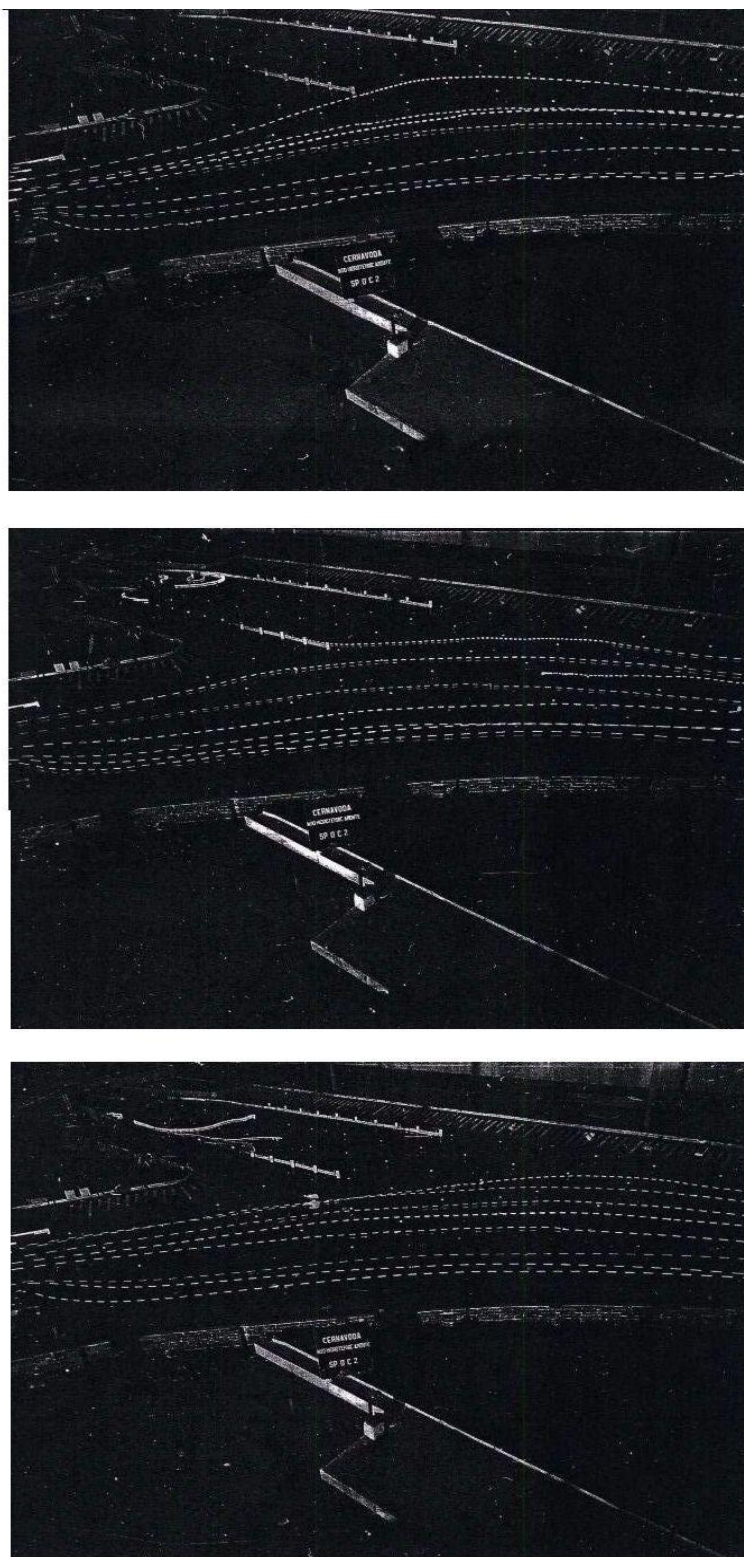


Fig. 3.8 Cinematica curgerii la nivelul + 3.00 m

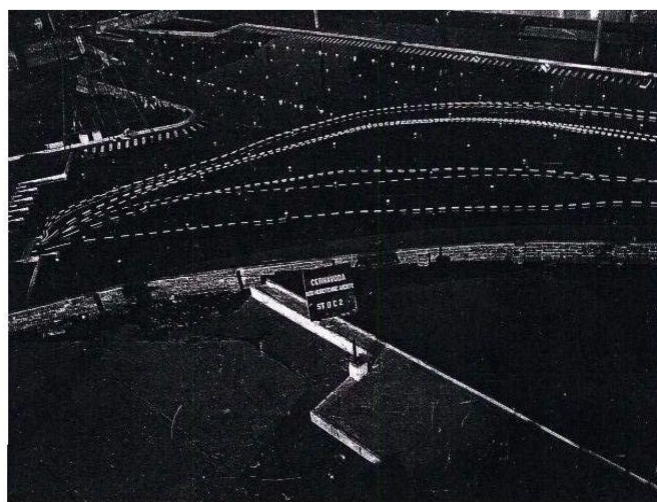
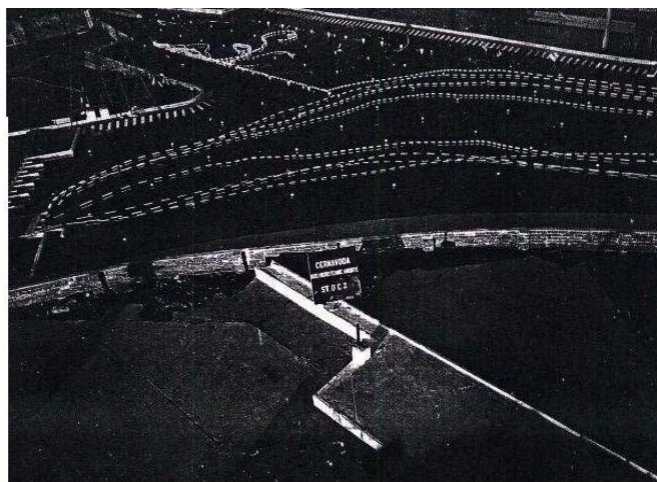


Fig. 3.9 Cinematica curgerii la nivelul + 8.00 m



Fig. 3.10 Cinematica curgerii la ecluzare

În Fig. 3.11 avem spectrul curgerii apei în nodul hidrotehnic aval de la ecluza Cernavodă.

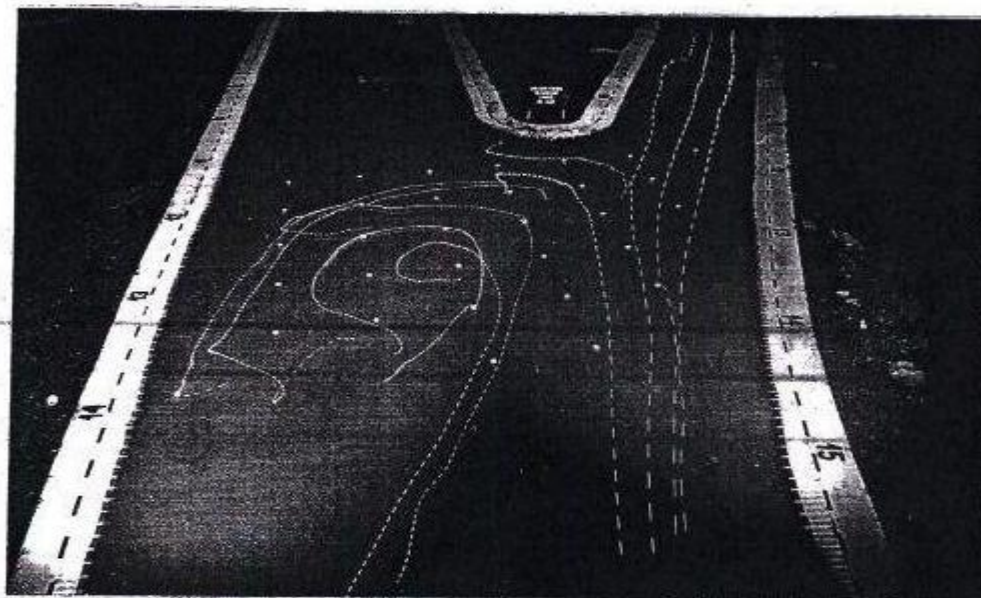


Fig. 3.11 Spectrul curgerii apei în zona de confluență aval de ecluza Cernavodă.

Din figură se constată că liniile de curent sunt paralele cu axul canalului de aducțiune până în apropierea de zona de confluență, unde există o tendință a acestora de centrare spre stânga axului. Pe malul stâng al canalului se constată o zonă de desprindere a curentului datorită curbării acestuia cu raze destul de mici.

Pe malul drept al canalului de aducțiune precum și pe întreaga zonă de confluență din dreapta în sensul de curgere Dunăre - Marea Neagră se constată o mare suprafață de curenți care se rotesc cu raze mari de rotație fără vortexuri.

Vitezele de curgere în lungul liniei de current nu depășesc $0,30 \div 0,50$ m în zona de confluență, iar vitezele perpendiculare pe axul canalului navigabil nu depășesc, în zona de confluență, $0,10 \div 0,20$ m/s.

3.3.3. Fenomene hidraulice în timpul ecluzărilor

Reproducerea pe model a fenomenului de ecluzare s-a efectuat pe baza curbelor de variație în timp a debitelor și nivelurilor în ecluză puse la dispoziție de către ISPH (Fig.3.12),

pentru următoarele date de bază corespunzătoare ecluzei și nodului hidrotehnic Cernavodă – amonte:

- Sarcina hidraulică: $H = 4,50\text{m}$;
- Coeficientul de debit: $\mu = 0,65$;
- Secțiunea galeriilor: $\omega = 40,50\text{ m}^2$;
- Suprafața unui sas: $\Omega = 8000\text{ m}^2$;
- Timpul de deschiderea vanei de $T_u = 180\text{ sec}$.

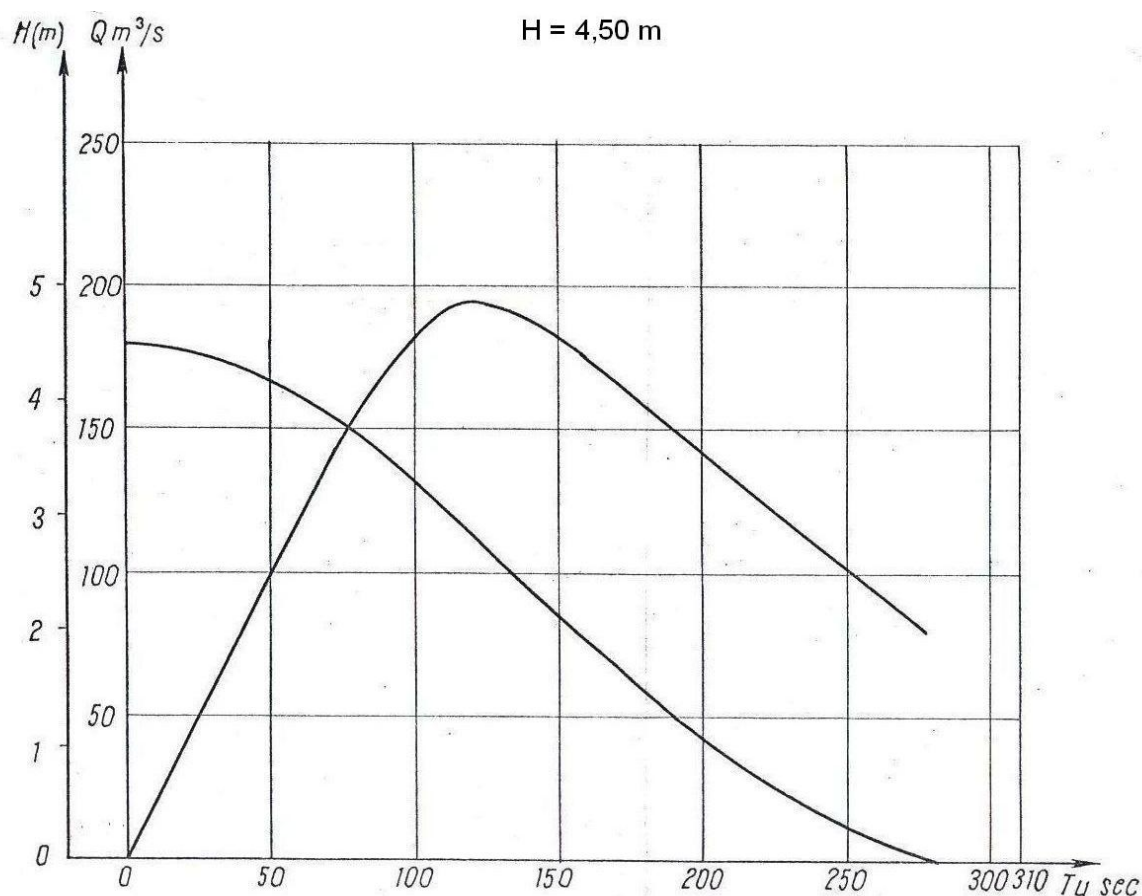


Fig. 3.12 Elementele hidraulice ale golirii sas-ului ecluzei Cernavodă

Studiind variațiile nivelurilor în timpul ecluzărilor în sas și în diverse secțiuni ale portului de așteptare se constată că oscilațiile de nivel nu depășesc în amplitudine $H = 0,35\text{ m}$ în secțiunea de tranziție spre portul de așteptare și scad la $H = 0,10\text{ m}$ la o distanță de 350 m de la ecluză.

Analizând cinematica curgerii în timpul ecluzărilor s-a constatat că la golirea unei ecluze apar deplasări asimetrice ale flotorilor. Aceste deplasări se fac cu viteză redusă care nu depășește $0,30 \div 0,40$ m/s și afectează o zonă de cca 100 – 150 m din portul de așteptare.

În timpul golirii unei ecluze se produc în portul de așteptare și în zona de racordare la celelalte ecluze o anumită agitație care ar putea pune în pericol intrarea sau ieșirea unui convoi.

De aceea se recomandă ca în timpul ecluzării, navele să fie acostate.

A fost studiată și navigația convoaielor împinse în zona nodului hidrotehnic amonte. Traiectoriile parcurse de convoiul de 2 x 3 x 3000 tone în zona nodului hidrotehnic amonte în ipoteza funcționării stației de pompare, au fost examinate pentru deplasări de intrare și ieșire a acestui convoi în ecluză.

Experimentările s-au făcut după așezarea navei în direcția pe deplasare cu menținerea cârmei la poziția zero, observându-se prin cronofotografiere viteza de deplasare și devierea de la aliniament a probei și pupei navei sub influența curenților de alimentare a stației de pompare.

Experimentările, care s-au efectuat cu o viteză de 7 – 8 km/h a convoiului, au pus în evidență devieri din prova și din pupa în zona de confluență.

Aceste devieri nu au rezultate prea importante, nava putând fi menținută pe direcție prin manevrarea cârmei.

Condițiile de navigație cât și cele de staționare sunt defavorizate de lungimea redusă a portului de așteptare, avându-se în vedere că în port nu poate staționa decât un singur convoi de fiecare parte a acestuia. În consecință, lungimea portului de așteptare trebuie să ajungă de 3-4 ori cât lungimea convoiului maxim .

Pentru nodul hidrotehnic aval a fost studiată cinematica umplerii și golirii sas-ului cu efectele ei în zona adiacentă ecluzei în două variante:

Varianta A: - propusă de beneficiar la care racordarea canalului cu ecluza se face prin ziduri vertical divergente (în sensul de curgere Dunăre - Marea Neagră). Molul central și estacadele de dirijare au fost executate pline până la fundul canalului.

Varianta B: - propusă de cercetător la care s-a prevăzut prelungirea canalului taluzat până în dreptul ecluzei. Molul central și estacadele de dirijare a navelor spre ecluze au fost executate perforate la partea de fund a canalului.

Experimentările au scos în evidență că în varianta A efectul golirii ecluzei de la cota +12,50 m se simte în tot portul de așteptare, în timp ce în varianta B se simte numai în avanport și nu ajunge până în portul de așteptare.

În cazul golirii ecluzei de la cota +18,50 m (regim barat) efectul ecluzării se simte până la maximum 300 m în portul de așteptare.

Variațiile de nivel ce iau naștere în timpul umplerii sau golirii ecluzelor în sas și în diverse secțiuni ale portului de așteptare sunt indicate în Fig.3.13 pentru varianta A și în Fig. 3.14 pentru varianta B.

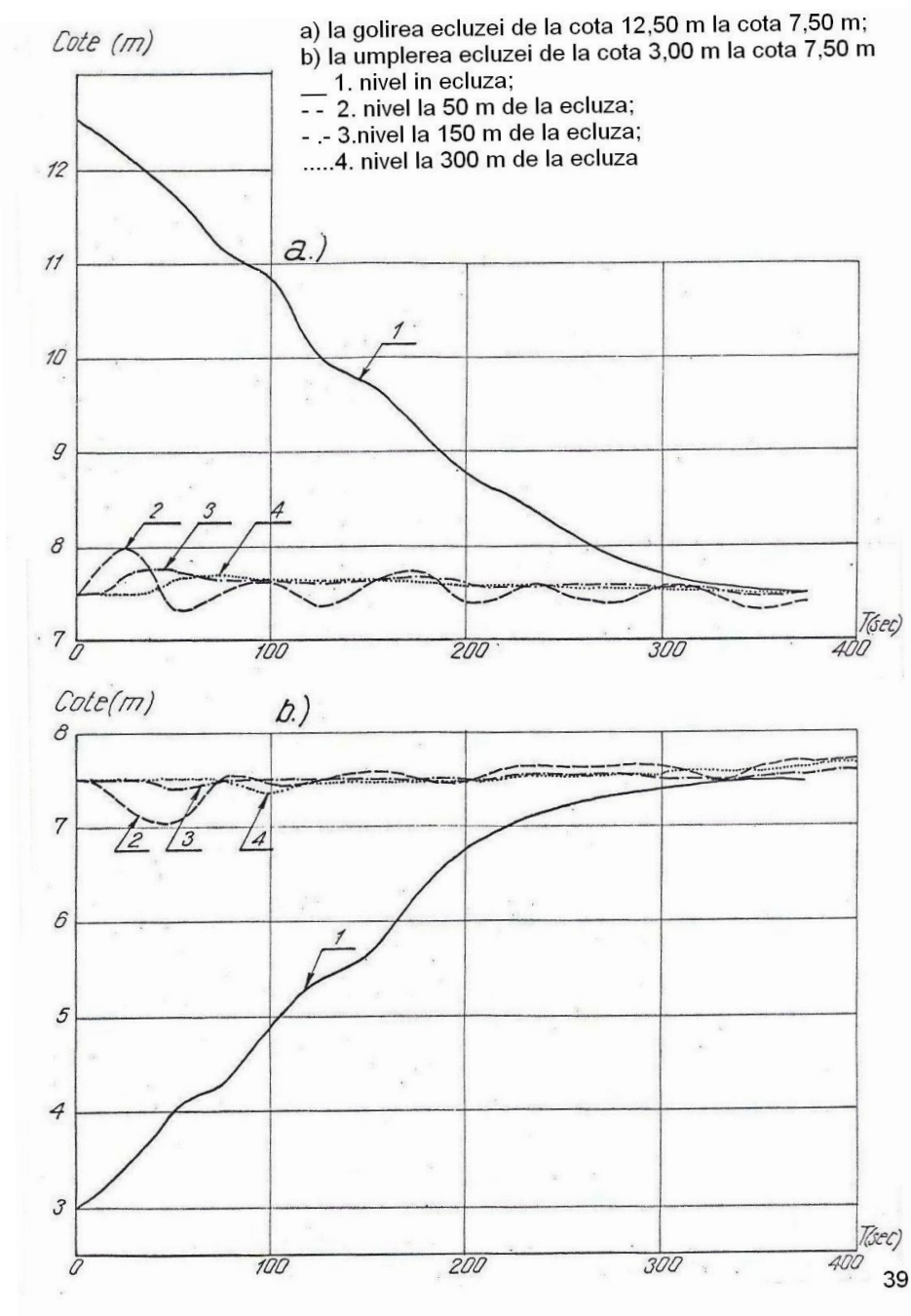


Fig. 3.13 Variația nivelului apei în timpul ecluzării – varianta A

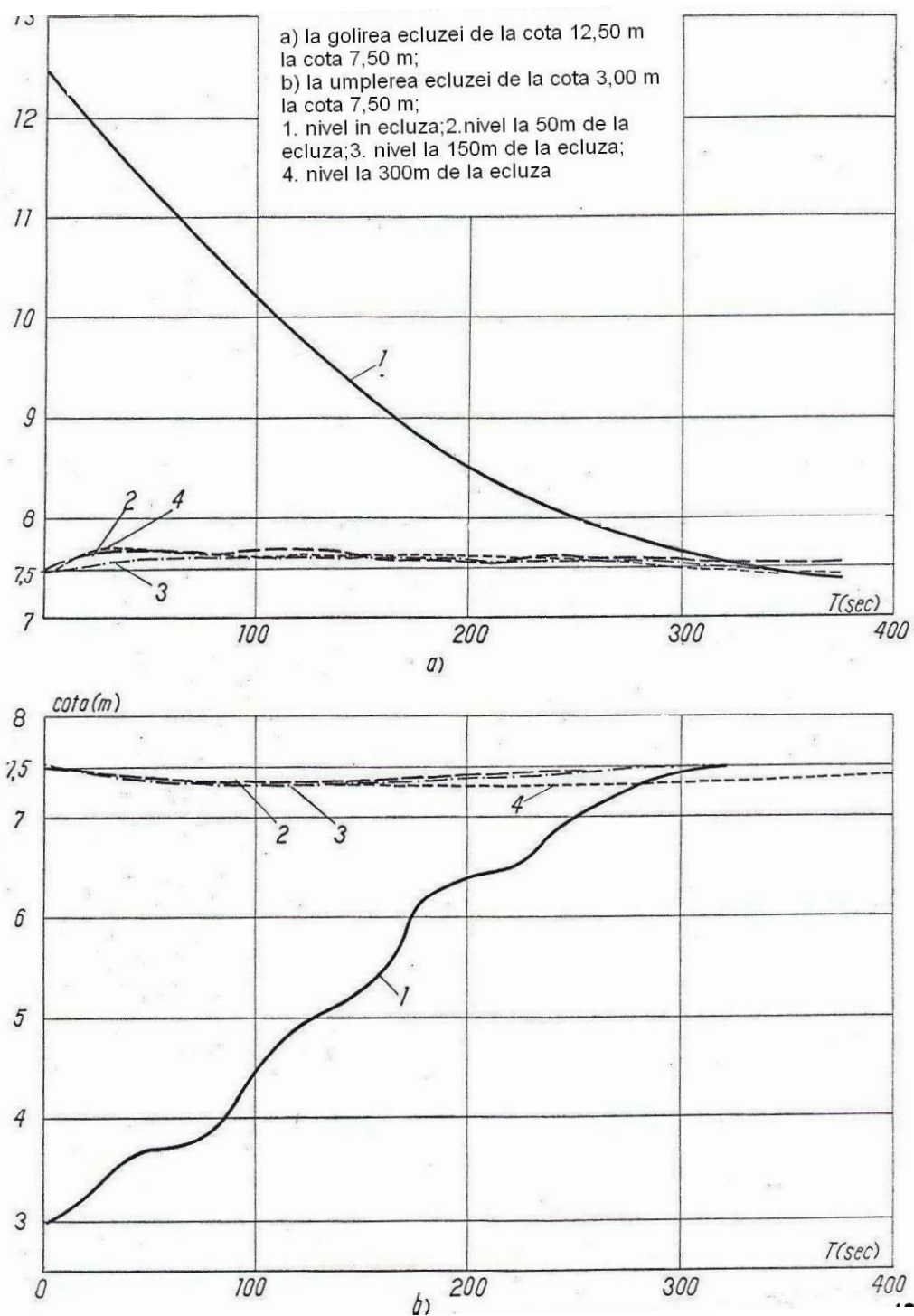


Fig. 3.14 Variația nivelului apei în timpul ecluzării – varianta B

Experimentările privind condițiile de navigație a convoaielor împinse în zona nodului hidrotehnic aval, au fost efectuate în aceleași condiții ca și la nodul hidrotehnic amonte, respectiv observarea deviației pupei și provei la trecerea prin zona de confluență cu cârma adusă la “zero” și cu viteza de navigație de $7 \div 8$ km/ora. Rezultatele experimentale au arătat că direcția convoiului este mai puțin afectată la trecerea acestuia prin culoarele opuse ramificației ce vine de la stația de pompare iar devieri mai importante se obțin pe culoarele din ce în ce mai apropiate de canalul de aducțiune.

Rezultatele au pus totodată în evidență faptul că există posibilitatea menținerii convoaielor pe direcția dorită pe oricare dintre culoarele de navigație prin acționarea corespunzătoare a cârmei. Problemele care se pun din acest punct de vedere pentru a fi studiate în viitor sunt acelea legate de vitezele minim admisibile ale convoiului la care poate să fie controlată direcția de navigație în zona de confluență.

Pe baza experimentărilor efectuate în ceea ce privește agitația în porturile de așteptare, se recomandă evitarea intrării sau ieșirii convoiului dintr-o ecluză în timpul în care cealaltă ecluză se umple sau se golește.

3.4 Concluzii

Pe baza studiilor efectuate s-au determinat caracteristicile principale ale scurgerii apei pe Dunăre în regim îndiguit și barat, pe sectorul Silistra - Hârșova.

Pentru precizarea debitelor maxime de diverse asigurări și a cheilor limnimetrice pe Dunăre în diverse secțiuni de calcul, s-a utilizat o metodologie nouă de studiu constând în tranzitarea în condițiile regimului îndiguit a celor mai mari viituri cunoscute pe Dunăre.

Modelul de calcul bazat pe integrarea numerică a ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale ale mișcării nepermanente a apei în albie deschise, a fost tarat pentru viitura din anul 1970, viitura cea mai mare înregistrată după îndiguirea aproape completă a luncii Dunării.

Pe baza calculelor hidraulice s-au stabilit cheile limnimetrice și curbele suprafeței libere a apei în regim îndiguit de scurgere, valorile debitelor maxime de diferite asigurări și ale debitelor medii și minime pe Dunăre în zona Călărași - Hârșova, valorile medii ale pantelor locale și variația vitezelor medii de scurgere pe verticală, în funcție de debit, în diverse secțiuni de calcul, alese în zona racordării canalului cu Dunărea.

Studiile hidraulice în regim barat pe Dunăre au fost efectuate pentru diverse variante de amenajare a nodului hidrotehnic (Hinog, Bob Fasole și Topalu). În cea mai probabilă schemă de amenajare cu amplasamentul barajului pe Dunăre în secțiunea Bob Fasole, se preconizează

formarea lacului numai pe brațul Dunărea Veche, brațul Borcea urmând a fi închis printr-un baraj nedeversor în zona Călărași.

Pe brațul Bala se prevede un baraj deversor cu centrală care, prin regimul de exploatare prevăzut, urmează să asigure repartiția naturală a debitelor pe cele două brațe, pentru debite cu asigurări cifrice mai mici de 80%.

Pentru graficul de exploatare stabilit de I.S.P.H., corespunzător nivelului normal de retenție 18,50 m rMB s-au determinat cheile limnimetrice și curbele suprafeței libere în regim barat.

De asemenea, s-au stabilit valorile medii ale pantelor locale și variația vitezelor medii de scurgere pe verticală, pe Dunăre, în regim barat, în diferite secțiuni de calcul alese în zona racordării canalului cu fluviul.

Prelucrarea datelor de măsuratori existente cu privire la modificările morfologice pe Dunăre duc la concluzia că în regim îndiguit nu sunt de așteptat modificări morfologice importante ale albiei Dunării, care să depășească limitele de variație normale, ca efect al îndiguirii albiei majore.

Modificări morfologice mai însemnate s-au constatat în condițiile regimului barat și anume depuneri de aluviuni în bieful amonte și eroziunea generală a albiei în bieful aval.

Pentru prognoza modificărilor morfologice s-au efectuat calcule hidraulice după o metodică elaborată în Institutul de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare, ținând seama de efectele de sedimentare a aluviunilor în amenajările de la Porțile de Fier și Turnu Măgurele-Nikopol și având în vedere anumite ipoteze privind decalajul în intrarea în funcțiune a acestor amenajări.

Rezultatele de calcul arată că în acumularea Cernavodă vor intra anual în medie (pe perioada de calcul de 25 ani) cca 26 mil.tone/an, din care se vor depune cca 10 mil. tone/an. Aceste depuneri produc o înaltare medie a patului albiei, ce ajunge la aproximativ 2,00 m în apropierea barajului, după perioada de 25 ani.

Ca urmare a acestor depuneri se produc și supraînălțări ale nivelului apei, ce pot atinge valori de $50 \div 70$ cm pentru debite mari.

Analizând distribuția depunerilor în lungul acumulării, rezultă că modificările morfologice ce se vor produce în bieful amonte C.M. Cernavodă în perioada studiată, ca urmare a barării albiei, ținând seama și de amenajările din amonte, nu sunt de natură să afecteze navigația în zona de racordare a canalului cu Dunărea .

Eroziunea generală a patului albiei în bieful aval, estimată pe baza datelor inițiale de care s-a dispus, a rezultat de cca $1,50 \div 2,00$ m imediat în aval de baraj, după o perioada de $10 \div 15$ ani.

Eventuale completări și precizări ale datelor obținute se vor putea și după efectuarea altor studii hidraulice pentru C.H.Cernavodă.

Pe baza cercetărilor efectuate pentru nodul hidrotehnic din zona captării și a racordării canalului navigabil cu Dunărea la Cernavodă, s-au stabilit condițiile de captare a apei în scopul asigurării necesităților de irigație pe Valea Carasu, precum și condițiile de navigație în cele două etape de amenajare a zonei, în regim îndiguit și barat pe Dunăre .

Lucrările preconizate în zona captării în varianta inițială de amenajare asigură captarea gravitațională a 100 - 400 m³/s în ambele etape de amenajare, la debitele și nivelurile asigurate din Dunăre.

În regim îndiguit, la niveluri minime cu asigurarea mai mare de 80 % captarea debitului maxim de 400 m³/s sau a unor debite apropiate de acestea , va ridica probleme pentru sectorul de Dunăre aval de gură canalului, deoarece debitele disponibile pe acest sector se vor reduce simțitor .

În zona de racordare a canalului cu albia Dunării se vor produce depuneri de aluviuni datorită schimbului permanent de apă între canal și albia Dunării, precum și a vitezelor reduse din canal .Pentru asigurarea adâncimilor necesare în această zonă, se impun lucrări de dragare în perioada de exploatare. Volumul de aluviuni depuse în zona de racordare și pe primii 500 m din canal estimat pe baza măsurătorilor radiometrice pe model, pentru o turbiditate medie a apei de 200 gr/m³ este de cca 35.000 m³/an în regim îndiguit și de cca 100.000 m³/an în regim barat. În regim barat turbiditatea apei va fi redusă datorită decantării aluviunilor în lacul de acumulare și este de așteptat ca volumul de aluviuni depuse să fie mai mic decât cel estimat.

După punerea în funcțiune a Canalului Dunăre - Marea Neagră depunerile de aluviuni au fost monitorizate. Ele au ca principală sursă suspensiile din apa prelevată din Dunăre precum și aluviunile rezultate prin spălarea terenurilor adiacente de către scurgerile permanente sau temporare pe văile afluate.

Studiile hidrologice efectuate pe Dunăre de către Institutul de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare și I.P.T.A.N.A. - S.A. ne-au permis efectuarea unor analize comparative cu demersurile noastre matematice din Capittolul 7.

4. Forțele care acționează asupra structurilor hidrotehnice

4.1 Diagrama forțelor

Asupra digurilor acționează o serie întreagă de forțe, în marea lor majoritate de tip fluido-dinamic, forțe ce pot fi grupate în două mari categorii: forțe naturale și forțe datorate traficului naval.

Forțele naturale, fluido-dinamice, sunt provocate de vânt, curent și acțiunea valurilor. Trebuie să menționăm și forțele de tip hidrostatic, datorate presiunii, a căror valoare crește cu adâncimea. Traficul naval provoacă forțe de tip hidrodinamic – efect de vapor și mecanic, în cazul coliziunilor (fig. 4.1).

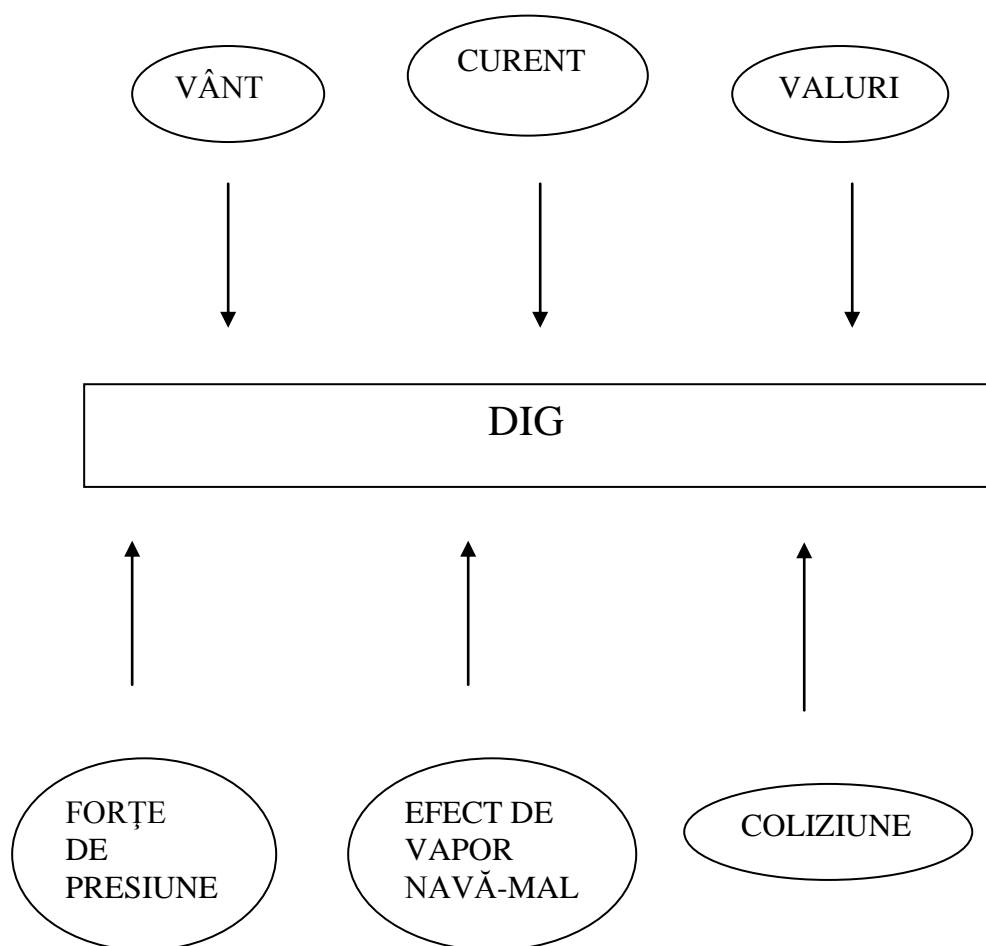


Fig. 4.1 Forțele care acționează asupra digurilor

Asupra șenalului navigabil, cu adâncime limitată, acționează forțele datorate deplasării navelor cu pescaj mare, apropiat de valoarea adâncimii (Fig. 4.2).

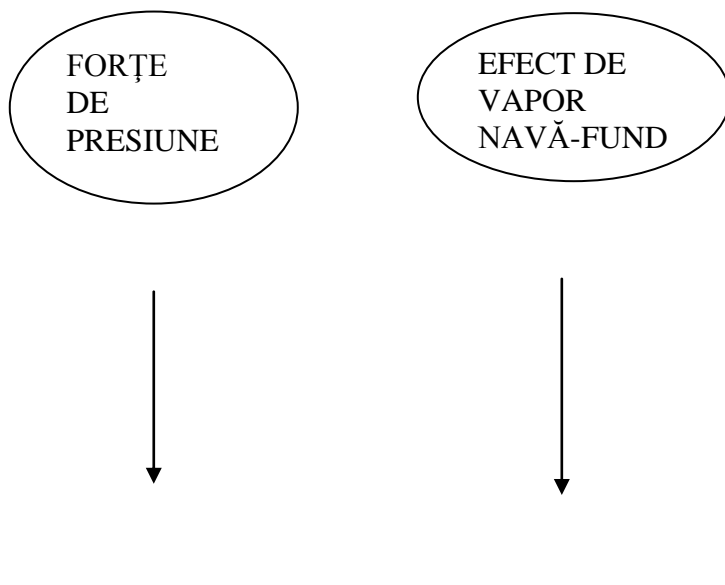


Fig. 4.2 Forțele care acționează asupra șenalului

În cazul canalelor, forțelor de presiune li se adaugă efectele navă-fund și navă-perete (Fig. 4.3).

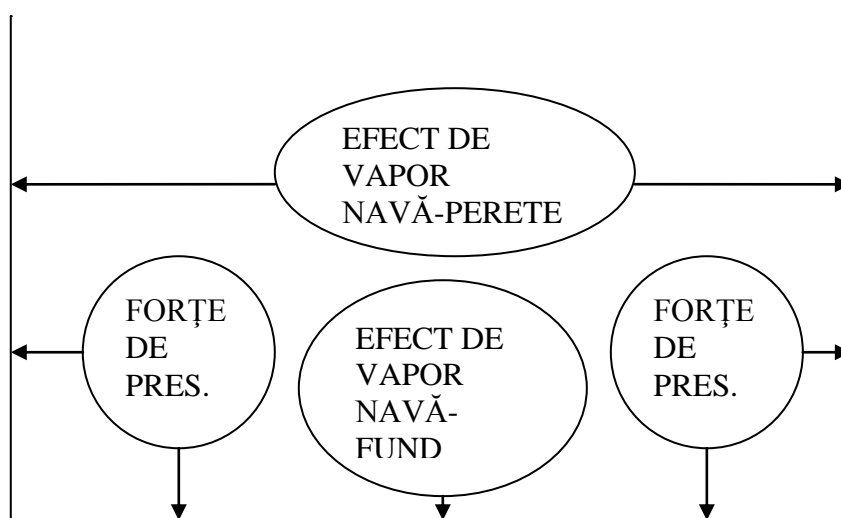


Fig. 4.3 Forțele care acționează asupra canalului

4.2 Modelarea matematică

În vederea modelării matematice trebuie să definim forțele care acționează asupra structurilor hidrotehnice cât mai exact cu putință. Aceste forțe acționează conform ecuațiilor mecanicii fluidelor, atât static cât și dinamic. După cum am mai spus, există forțe de natură mecanică, provenite tot din activitatea de transport maritim.

Computational Fluid Dynamics (CFD) este o metodă de a stabili curgerea fluidului, transferul de căldură și de masă, reacțiile chimice, ca și fenomenele legate de acestea rezolvând numeric setul de ecuații specifice. CFD FLUENT rezolvă ecuațiile pe baza metodei volumului finit, după cum vom vedea în capitolul următor.

Utilizarea programului FLUENT ne permite rezolvarea cu acuratețe a acestor ecuații. Punerea condițiilor inițiale și la limită, ca și interpretarea rezultatelor, reprezintă contribuții personale în analiza fenomenelor legate de acțiunea apei asupra acestor structuri nemetalice.

Un alt aspect legat de cercetarea acestor fenomene îl reprezintă simularea utilizând similitudinea la două scări. Este vorba de digurile de mare lungime la care, realizarea unui model la o singură scară ar conduce la dimensiuni foarte mici ale uneia din dimensiunile sale, respectiv înălțimea. De aceea, utilizarea unei scări pentru lungime și a uneia pentru înălțime și corelarea ulterioară a celorlate mărimi fizice care intervin în fenomen ar putea fi o soluție pentru o mai bună interpretare a rezultatelor experimentale.

4.3 Forțe hidrostatice

Să considerăm o suprafață oarecare A situată în partea imersă a digului, cheiului portuar sau a canalului. xOy este suprafața apei. Forța hidrostatică manifestată pe suprafața A este dată de relația:

$$\bar{F} = \int_A p \bar{n} dA . \quad (4.1)$$

p reprezintă presiunea relativă la o anumită adâncime în lichidul de greutate specifică γ ($p = \gamma z$), iar dA elemental de suprafață cu versorul normalei \bar{n} .

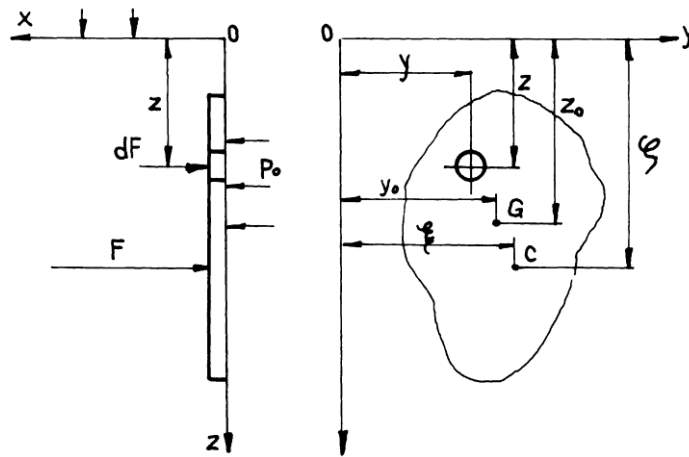


Fig. 4.4 Forțele hidrostatice

Notând cu y_0 și z_0 coordonatele centrului de greutate ale suprafeței A, putem scrie:

$$F = \int_A \gamma z dA = \gamma z_0 A = \gamma M_y, \quad (4.2)$$

unde M_y reprezintă momentul static al suprafeței A în raport cu axa Oy.

Coordonatele punctului de aplicație al rezultatei forțelor de presiune – centrul de presiune – sunt date de relațiile:

$$\zeta = \frac{\int_A z dF}{F} = \frac{\gamma \iint_A z^2 dA}{\gamma \iint_A z dA} = \frac{I_y}{M_y}; \quad (4.3)$$

$$\xi = \frac{\int_A y dF}{F} = \frac{\gamma \iint_A y z dA}{\gamma \iint_A z dA} = \frac{I_{yz}}{M_y};$$

unde I_y și I_{yz} reprezintă momentul de inerție al suprafeței A în raport cu axa Oy, respectiv momentul centrifugal în raport cu axele Oy și Oz.

4.4 Forțe hidrodinamice

4.4.1 Vânt

Curentul de aer în jurul digului este considerat uniform, de direcție și viteză constantă. Viteza vântului se obține ca viteza medie la înălțimea de 6 m deasupra nivelului apei.

Forța aerodinamică care acționează asupra digului depinde de viteza vântului, suprafața de contact și de coeficientul rezistenței la înaintare. Acesta la rândul său este o funcție complexă adimensională care depinde de forma digului, unghiul de atac al vitezei, tipul curgerii (numărul Reynolds), rugozitatea suprafețelor etc:

$$F_{\text{vânt}} = C_v \frac{\rho v^2}{2} S. \quad (4.4)$$

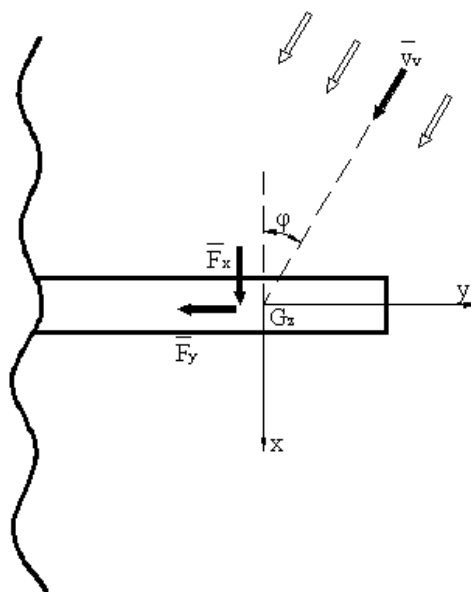


Fig.4.5 Forța de acțiune a vântului

În general această forță se manifestă paralel cu suprafața apei, deci are două componente $F_{\text{vântX}}$ și $F_{\text{vântY}}$ (Fig. 4.5):

$$F_{\text{vântX}} = C_{Xv} \frac{\rho v_x^2}{2} S_x;$$

$$F_{\text{vântY}} = C_{Yv} \frac{\rho v_y^2}{2} S_y;$$

unde: ρ reprezintă densitatea aerului; C_{xv} , C_{yv} - coeficienții adimensionali ai forțelor componente; v_x , v_y - componentele vitezei curentului; S_x , S_y - suprafața emersă a digului proiectată pe planele zOy și zOx .

4.4.2 Curent

Curentul este modelat ca o curgere permanentă, cu o anumită distribuție de viteze în planul apei (Fig. 4.6). Nu luăm în considerare o distribuție de viteze pe adâncime.

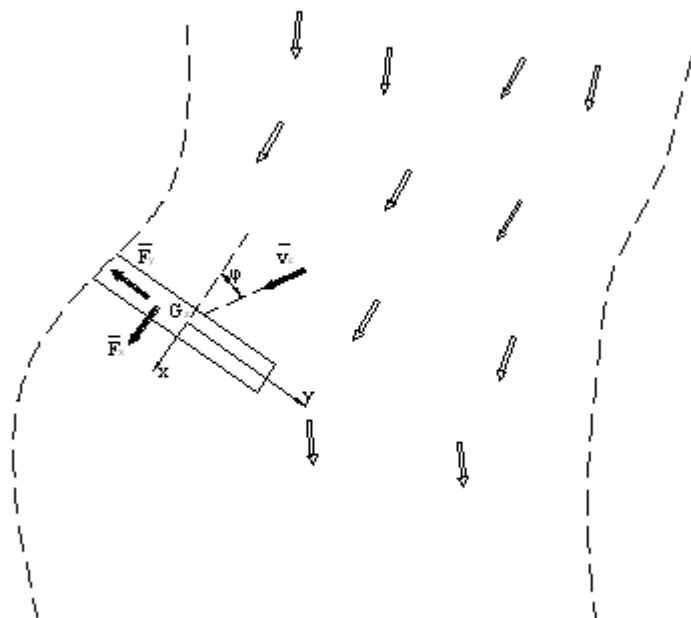


Fig.4.6 Forța de acțiune a curentului

La fel ca și în cazul vântului, forța curentului depinde de viteza sa la pătrat, de suprafața atacată, de densitatea lichidului și, prin coeficientul rezistenței la înaintare, de forma digului, tipul curgerii, unghiul de atac al vitezei, rugozitatea suprafețelor:

$$F_{curent} = C_{nc} \frac{\rho v^2}{2} S. \quad (4.5)$$

Și forța datorată curentului se manifestă, în general paralel cu suprafața apei având două componente pe direcțiile x și y .

4.4.3 Valuri

Într-un sistem de axe cu xOy suprafața apei și Oz orientat în sus, ecuația suprafeței valului, reprezentând o sumă de armonice, este dată de formula:

$$z(x, y, t) = \sum_1^n a_i \sin(k_{xi}x + k_{yi}y - \omega_i t + \varphi_i), \quad (4.6)$$

în care:

a_i - amplitudinea armonice i ;

k_i - numărul valului, lungimea de undă a valului fiind: $\lambda = \frac{2\pi}{k}$;

ω_i - frecvența armonice i ;

φ_i - faza armonice i .

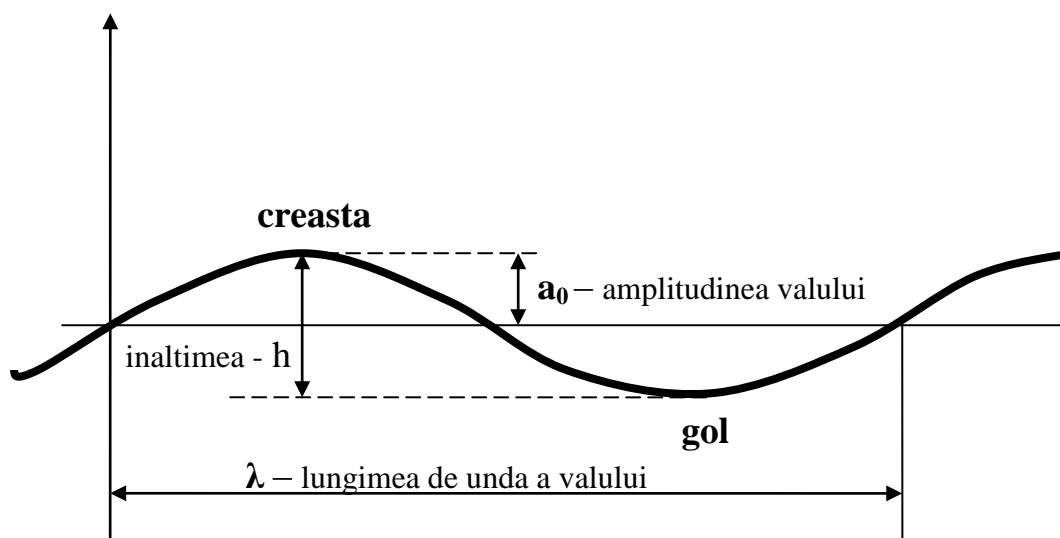


Fig. 4.7 Caracteristicile valului de mică amplitudine

În Fig. 4.7 este prezentată forma valului plan călător, de mică amplitudine.

În situația mișcării plane:

$$z(x, t) = \sum_1^n a_i \sin(k_{xi}x - \omega_i t + \varphi_i). \quad (4.7)$$

Traectoriile particolelor de lichid sunt cercuri.

Pentru cazul în care lichidul are adâncime finită (Fig. 4.8), relativ mică, condiția la limită:

$$z = -h; v_z = 0,$$

determină ecuația suprafeței valului:

$$z = a_2 \sin(kx - \omega t), \quad (4.8)$$

în care:

$$a_2 = -\frac{\omega^2 A}{g} \operatorname{ch}(kh) \text{ este amplitudinea valului și}$$

$$A = 2A_1 e^{-kh}.$$

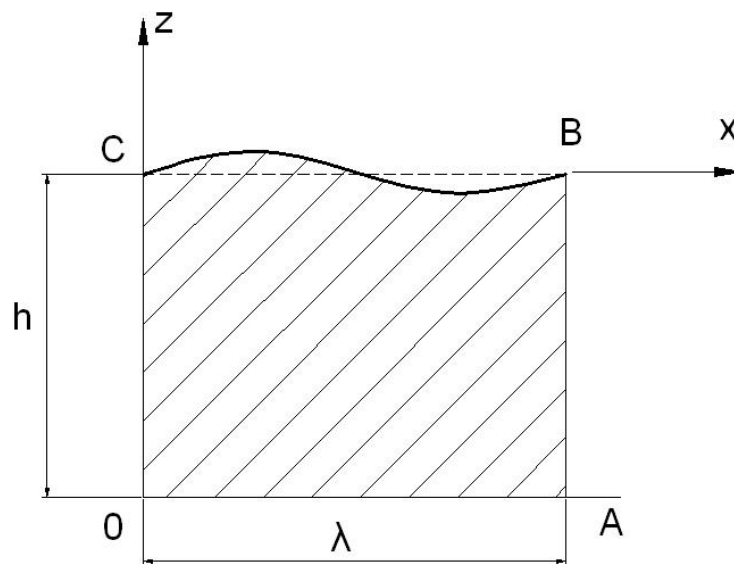


Fig. 4.8 Valul în lichid de adâncime finită

De această dată, traiectoriile particolelor de lichid sunt elipse.

Valurile determină forțe pe direcțiile x și y (o forță mai puțin importantă pe direcția z):

$$F_{xval} = C_{xval} \rho g L^2 H ;$$

$$F_{yval} = C_{yval} \rho g L^2 H ; \quad (4.9)$$

în care: L – lungimea structurii, H – înălțimea semnificativă, C_{xval} , C_{yval} și sunt coeficienți adimensionali care depind de forma structurii și de H .

4.5 Forțe de interacțiune cu navele

4.5.1 Navă – fund

Interacțiunea navelor cu fundul se manifestă în apele puțin adânci din apropierea porturilor, lângă diguri, pe fluvii etc. Influența este de natură hidrodinamică, astfel încât componentele forțelor pe direcția z și x au aceeași structură ca forțele de la capitolele 3.1 și 3.2:

$$F_{xfund} = C_{xfund} \frac{\rho v^2}{2} S ; \quad (4.10)$$

$$F_{zfund} = C_{zfund} \frac{\rho v^2}{2} S .$$

Coefficienții adimensionali C_{xfund} și C_{zfund} depind de raportul dintre adâncime și pescaj, H/T , de unghiul de înclinare al fundului, α , de numărul Re implicând viteza navei (Fig. 4.9).

$S = LT$, L – lungimea navei, T – pescajul.

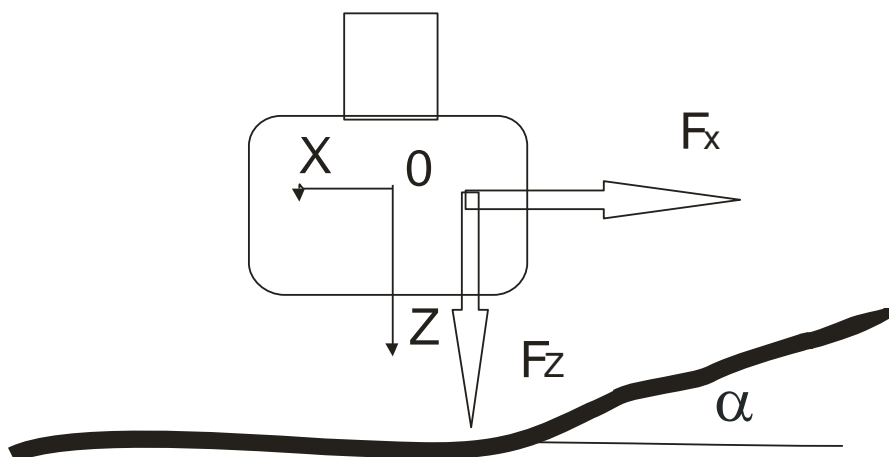


Fig. 4.9 Forța de interacțiune navă-fund.

Această forță se manifestă atât asupra nevei, cât și asupra materialului (nemetalic) al fundului.

4.5.2 Navă – perete (mal, dig)

Ca și forța de interacțiune cu fundul apei, forța de interacțiune cu digul perete (Fig. 4.10) este tot o forță de tip hidrodinamic, având componentele într-un plan paralel cu suprafața apei:

$$F_{xperete} = C_{xperete} \frac{\rho v^2}{2} S ; \quad (4.11)$$

$$F_{yperete} = C_{yperete} \frac{\rho v^2}{2} S .$$

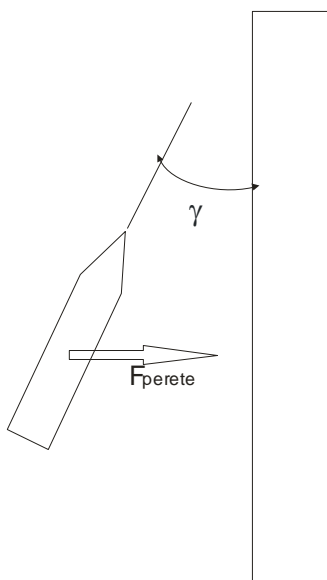


Fig. 4.10 Forța de interacțiune navă-dig

Coeficienții adimensionali $C_{xperete}$ și $C_{yperete}$ depind distanțele la perete pe cele două axe raportate la lungimea și lățimea navei, de unghiul dintre planul diametral al navei și marginea digului γ , de numărul Re etc.

4.5.3 Navă perete și fund (canal)

Natura hidrodinamică a forței de interacțiune navă-perete și fund (Fig. 4.11), determină relațiile de calcul:

$$F_{xcanal} = C_{xcanal} \frac{\rho v^2}{2} S ; \quad (4.12)$$

$$F_{zcanal} = C_{zcanal} \frac{\rho v^2}{2} S.$$

În acest caz există și o a treia componentă, F_{ycanal} , de aceeași formă:

$$F_{ycanal} = C_{ycanal} \frac{\rho v^2}{2} S. \quad (4.13)$$

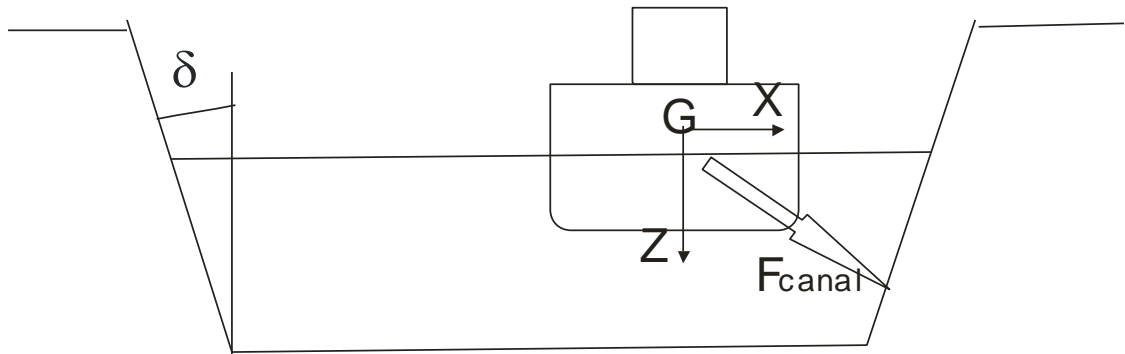


Fig. 4.11 Forța de interacțiune navă-perete și fund

Coeficienții C_{xcanal} , C_{ycanal} și C_{zcanal} depind de distanțele la pereții canalului raportate la lățimea și lungimea navei, de distanța față de fund raportată la pescaj, de unghiul de înclinare al malului, δ , de tipul curgerii prin numărul Re etc.

4.5.4 Coliziune

Forța de contact poate fi descompusă în două componente în plan orizontal, una normală F_x și una tangențială F_y :

$$\begin{aligned} F_x &= k_{x1} S + k_{x2} v_x \\ F_y &= k_y v_y \end{aligned} \quad (4.14)$$

unde v_x și v_y sunt cele două componente ale vitezei navei $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ (Fig. 4.12).

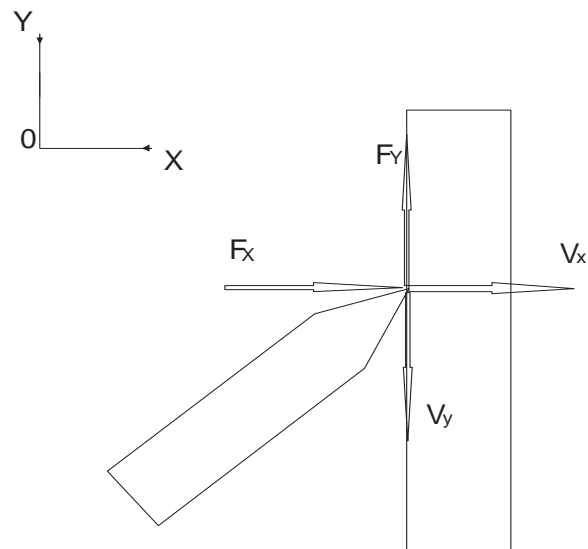


Fig. 4.12 Forța de coliziune cu digul

k_{x1} , k_{x2} și k_y sunt coeficienți dimensionali de rigiditate ai digului, iar S reprezintă suprafața de contact dintre navă și dig.

5. Modelarea acțiunii forțelor asupra structurilor hidrotehnice

5.1 Simulatorul FLUENT

Computer Fluid Dynamics (CFD) este știința care se ocupă cu calculul curgerii fluidelor, al transferului de căldură și masă, al reacțiilor chimice prin rezolvarea numerică a ecuațiilor care guvernează aceste fenomene.

Analizele CFD sunt utilizate pentru:

- studiul conceptual și proiectare;
- dezvoltarea detaliată a produselor;
- determinarea defecțiunilor și a cauzelor lor;
- reproiectare.

FLUENT este un program bazat pe calculul numeric al volumelor finite. Domeniul este discretizat într-un set de volume de control – celule. Ecuațiile cu derivate parțiale sunt discretizate într-un sistem algebric de ecuații.

Ecuația generală de conservare a masei, momentului și energiei este:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \Phi V dA = \oint_A \Gamma \nabla \Phi dA + \int_V S_\Phi dV, \quad (5.1)$$

în care primul termen se referă la curgerea nepermanentă, al doilea la convecție, al treilea la difuzie și ultimul la generare.

Ecuația generală se transformă în ecuație de continuitate dacă $\Phi = 1$, în ecuația x_{mom} dacă $\Phi = u$, în ecuația y_{mom} dacă $\Phi = v$ și în ecuația energiei dacă $\Phi = h$.

FLUENT rezolvă ecuațiile Navier-Stokes pentru diferite situații: mișcare permanentă sau nepermanentă, modele de turbulență etc.

$$\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z; \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_y}{\partial z} v_z; \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_z}{\partial z} v_z.$$

În Fig. 5.1 este prezentat schema modelului de calcul al programului FLUENT (după www.fluentusers.com).

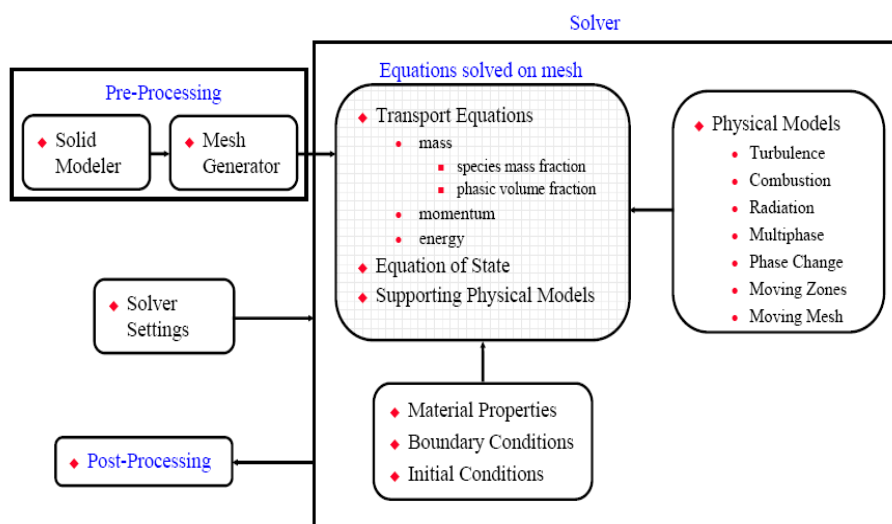


Fig. 5.1 Program FLUENT – schema modelului de calcul

Principalii pași ai unei analize CFD sunt:

1. Identificarea problemei și preprocesarea:
 - definirea scopului modelării;
 - identificarea domeniului ce urmează a fi modelat;
 - proiectarea și crearea rețelei de celule (grid-ului).
2. Executarea calculului iterativ:
 - introducerea datelor;
 - calculul și monitorizarea soluțiilor.

3. Postprocesarea:

- examinarea rezultatelor;
- revizia modelului dacă este cazul.

Pentru a efectua calculul este necesar să definim geometria corespunzătoare problemei și să creăm grila sau mesh-ul (volume în 3D sau suprafețe în 2D). Vom utiliza pentru aceasta programul GAMBIT. În noua variantă a programului, ANSYS FLUENT, există subprogramul Design Modeler, care înlocuiește programul suport GAMBIT.

În Fig. 5.2 este reprezentat un dig având o parte emersă și una imersă. xOy este suprafața apei. După transferul desenului în programul FLUENT putem modifica dimensiunile după cele trei axe în mod diferit. De asemenea, putem modifica unitățile de măsură.

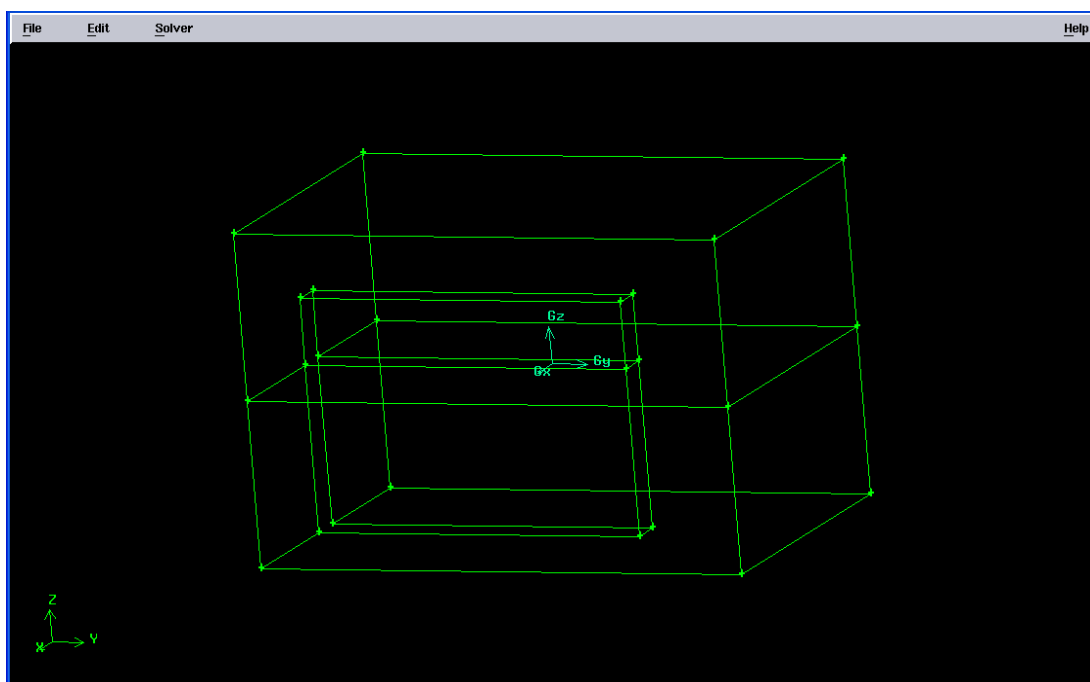


Fig. 5.2 Desenul digului in GAMBIT

În Fig. 5.3 este reprezentat domeniul de calcul împărțit în volume, discretizat.

După realizarea geometriei și a mesh-ului acestea sunt transferate în FLUENT (**File → Import → .msh**).

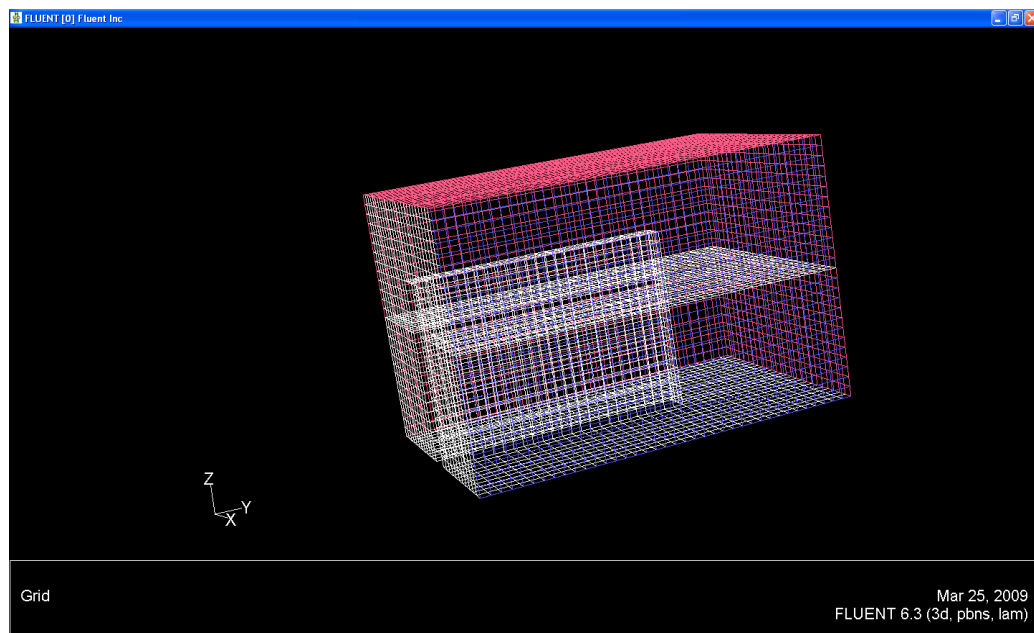


Fig. 5.3 Discretizarea domeniului

5.2 Acțiunea vântului asupra părții emerse a digului.

Acțiunea vântului asupra digului, mult mai puțin importantă decât acțiunea curentului, o vom studia în 2D. În Fig. 5.4 este reprezentată distribuția vectorială a vitezelor curentului de aer în jurul digului pentru o viteză a vântului de 10 m/s.

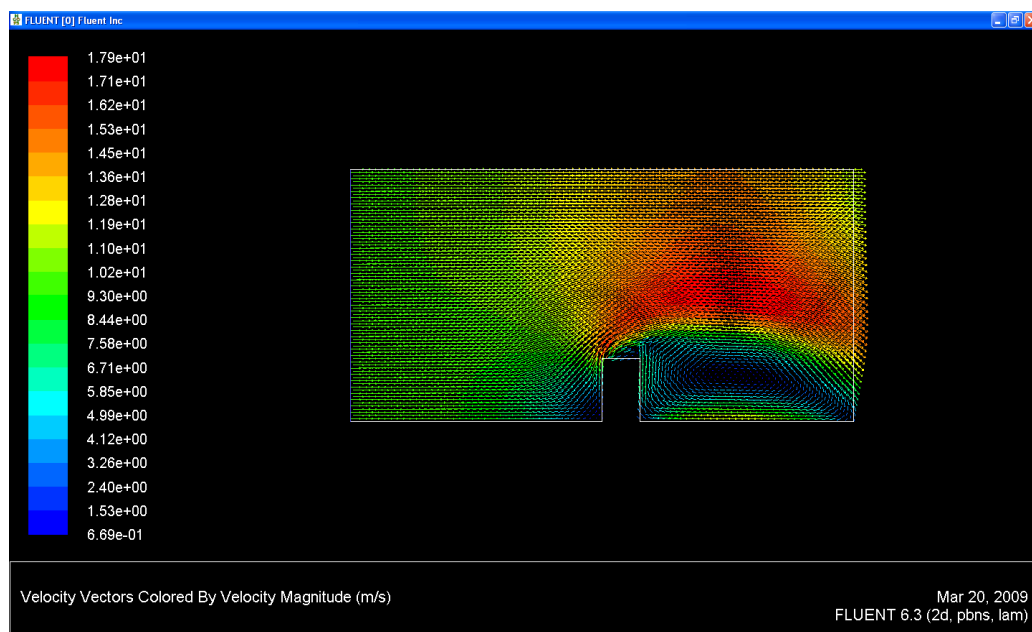


Fig. 5.4 Distribuția vitezelor în jurul digului.

Calculul a fost făcut în următoarele condiții la limită (conform notațiilor FLUENT):

- intrare – velocity inlet (viteza de intrare: 10m/s);
- ieșire – outflow;
- dig – wall.

Dimensiunea digului este de 2m înălțime și 1m lățime.

Calculul forțelor pe cele trei fețe ale digului ne dau următoarele rezultate (exprimate în N/m) (Tabelul 5.1):

Force vector: (1 0 0)

	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
e10 in vant	522.26	0.00067	522.26	852.68	0.001107465	852.6824
net	522.26	0.00067	522.26	852.68	0.001107465	852.6824

Force vector: (1 0 0)

	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
e11 sub vant	442.96	-0.00042	442.96	723.20	-0.00070053666	723.2021
net	442.96	-0.00042	442.96	723.20	-0.00070053666	723.2021

Force vector: (1 0 0)

	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
e12 deasupra dig	0	-0.0002054	-0.0002054	0	-0.0003354	-0.0003354
net	0	-0.0002054	-0.0002054	0	-0.0003354	-0.0003354

Tabelul 5.1

Pentru un dig de 200 lungime și 2 m înălțime forța vântului, la o viteză de 10 m/s, pe fața din vânt, va fi de $522 \times 200 = 104\,400 \text{ N} = 10,44 \times 10^3 \text{ daN}$.

Rezultă un efort relativ mic de $258,8 \text{ N/m}^2$, ușor suportabil de către un dig de 1 m grosime.

5.3 Acțiunea curentului asupra părții imerse a digului.

Digul în natură este așezat perpendicular pe direcția de curgere a unui fluviu pentru a proteja o incintă portuară.

Dimensiunile părții imerse a digului sunt următoarele: $L = 200 \text{ m}$; $l = 2,5 \text{ m}$, $h = 12,5 \text{ m}$. Viteza apei $v = 2 \text{ m/s}$.

Considerăm curgerea bifazică, curgere cu suprafață liberă, cu contact între aer și apă.

Condițiile generale de rezolvare a problemei sunt următoarele:

- formulare implicită;
- 3D;
- mișcare nepermanentă (unsteady): $\bar{v} = \bar{v}(\bar{r}, t)$;
- modelul de turbulență: k-omega.

Calculul pornește de la viteza de intrare, paralelă cu axa Ox, către sensul pozitiv: $v = 2 \text{ m/s}$.

După stabilizarea soluțiilor putem vizualiza conturul presiunilor statice (Fig. 5.5):

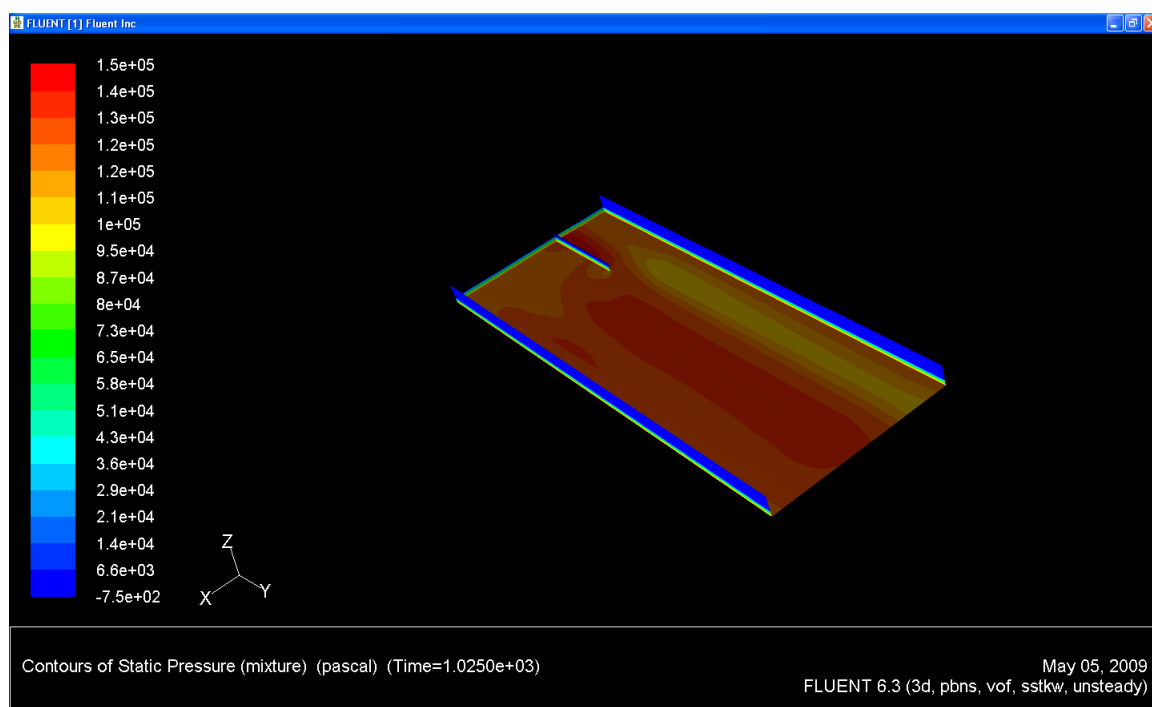
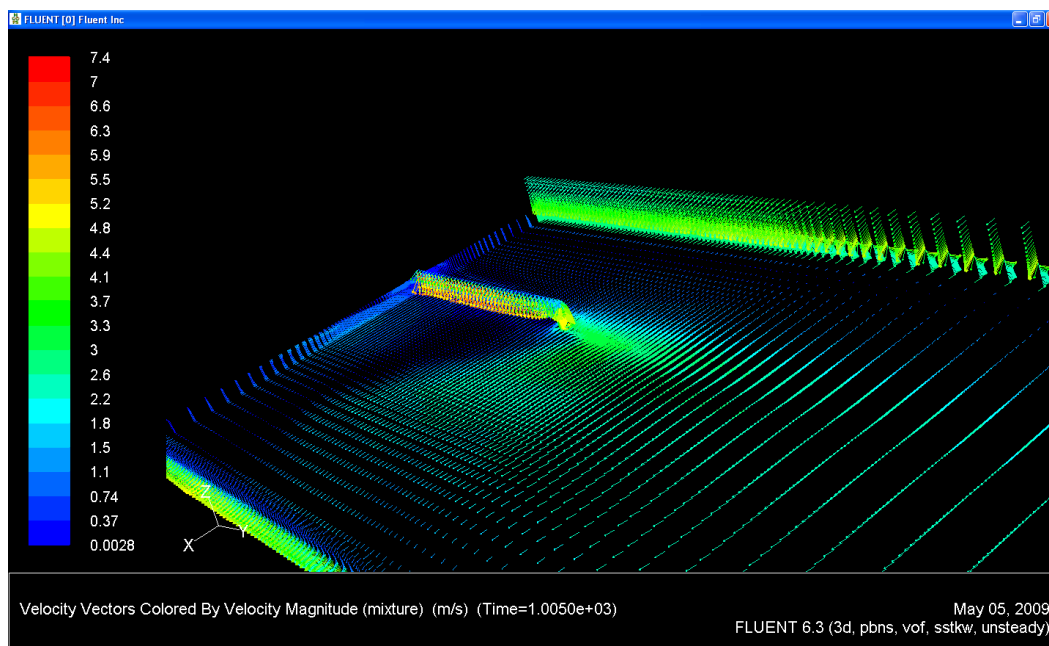
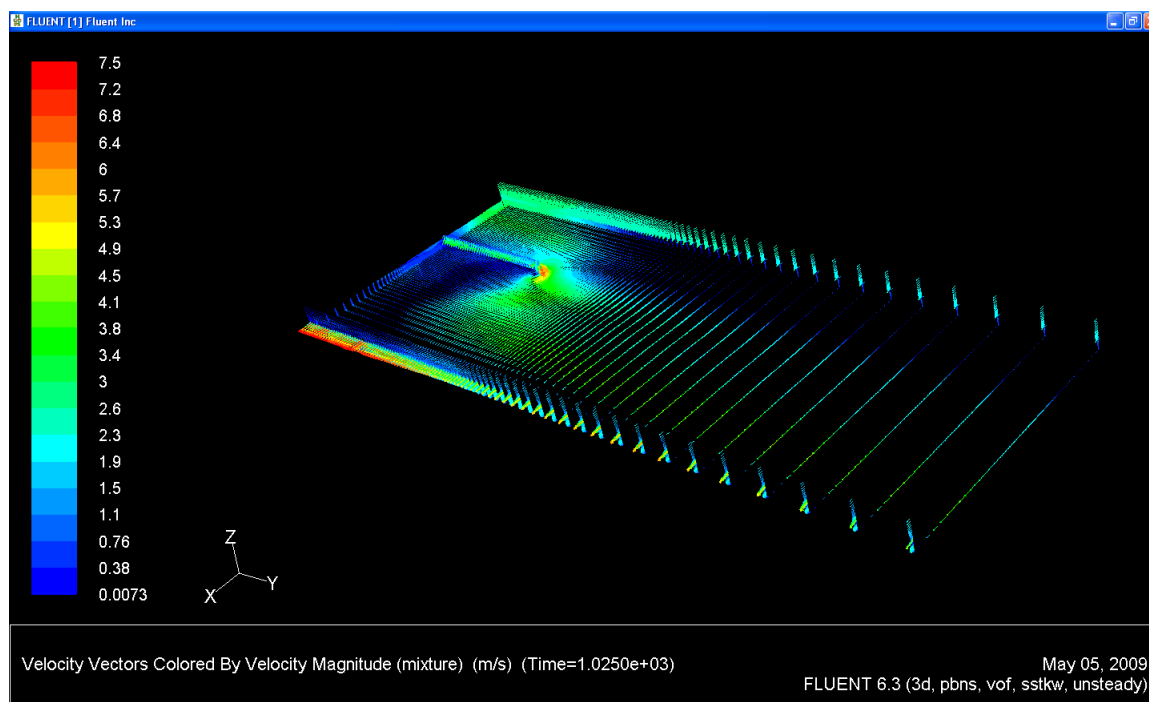


Fig. 5.5 Conturul presiunilor statice pentru digul în natură

În figurile 5.6 a și b sunt reprezentate distribuțiile de viteze în diferite secțiuni ale domeniului.



a.



b.

Fig. 5.6 Distribuția de viteze pentru digul în natură

Forța care acționează asupra digului este dată în tabelul 5.2:

Force vector: (1 0 0)

	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
fundul-apei	0	1320574.3	1320574.3	0	880.38283	880.38283
mal	0	-3526.4692	-3526.4692	0	-2.3509795	-2.3509795
dig	1.189e+08	149.354	1.18915e+08	79277	0.099569478	79277
mal.2	0	127.4361	127.43618	0	0.084957453	0.08495
net	1.189e+08	1317324.6	1.20232e+08	79277	878.21638	80155.31

Tabelul 5.2

În urma modelării acțiunii curentului asupra digului în mărime naturală am obținut pentru forța care acționează asupra digului valoarea:

$$F = 118\,900\,000\text{ N} = 11\,890 \times 10^3 \text{ daN}.$$

5.4 Acțiunea valului asupra digului

Acțiunea valului asupra digului este un demers destul de complicat dacă dorim să-l studiem în toată complexitatea sa. Ne vom limita să analizăm un val sinusoidal de lungime infinită (lungimea de undă mult mai mare decât înălțimea sa) în mișcare plan paralelă (particulele de apă nu au o componentă de viteză după axa y). De asemenea, vom considera valul într-un lichid de adâncime finită. Este cazul valurilor provocate de ambarcațiuni, pe apele interioare.

În Fig. 5.7 sunt prezentate caracteristicile valului:

- lungimea de undă, $\lambda = 5m$;
- amplitudinea, $a_0 = 0.25m$;
- înălțimea, $h = 0.5m$.

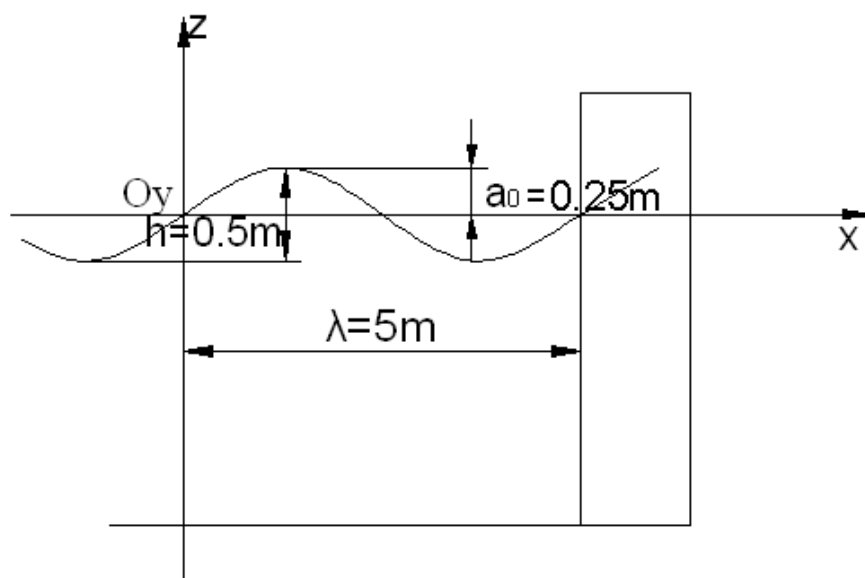


Fig. 5.7 Caracteristicile valului

Viteza aparentă de deplasare a valului, $v = 0.5$ m/s.

Dimensiunile digului (Fig. 5.7):

Partea emersă: $x = 1$ m, $y = 10$ m, $z = 2$ m.

Partea imersă: $x = 1$ m, $y = 10$ m, $z = -5$ m.

Forma digului este prezentată în Fig. 5.8.

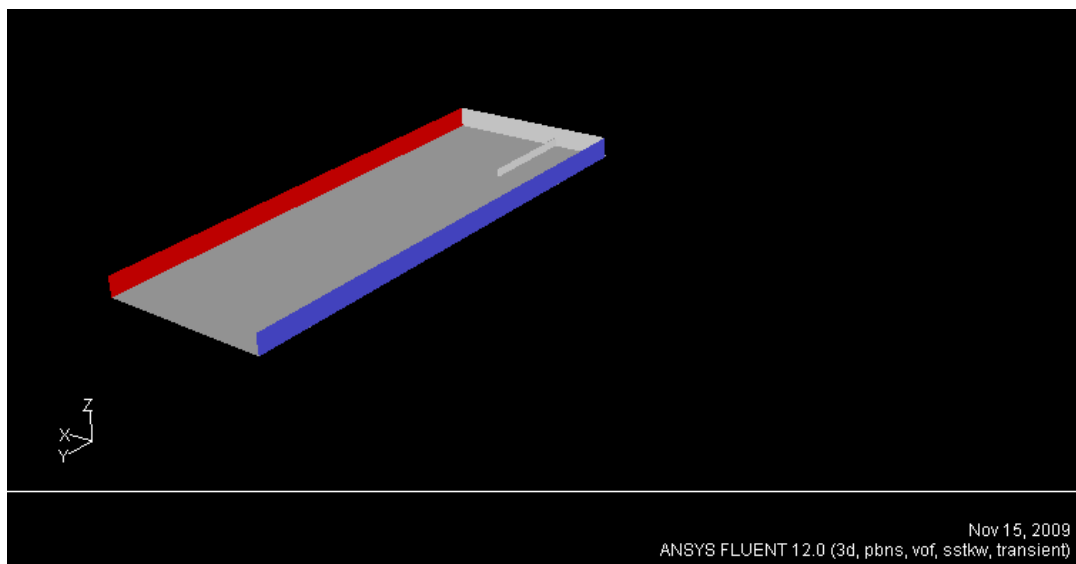


Fig. 5.8 Forma digului

Condițiile generale de rezolvare a problemei:

- formulare implicită;
- 3D;
- mișcare nepermanentă (unsteady): $\bar{v} = \bar{v}(\bar{r}, t)$;
- modelul de turbulență: kinetic energy $0.01 \text{ m}^2 / \text{s}^2$;
- pressure based;
- velocity: absolute;
- gravity: $z = -9.81 \text{ m/s}^2$;
- model: multiphases – Volume of Fluid;
- phases: air – primary phase, water – secondary phase.

În Fig. 5.9 este prezentată evoluția stabilizării soluțiilor. Se observă periodicitatea mișcării de val.

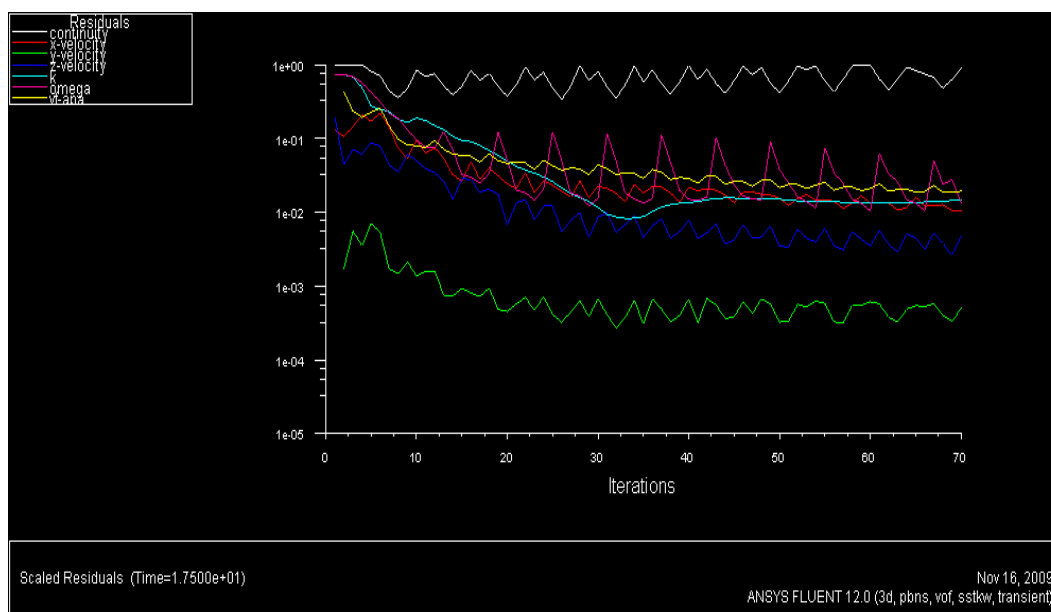
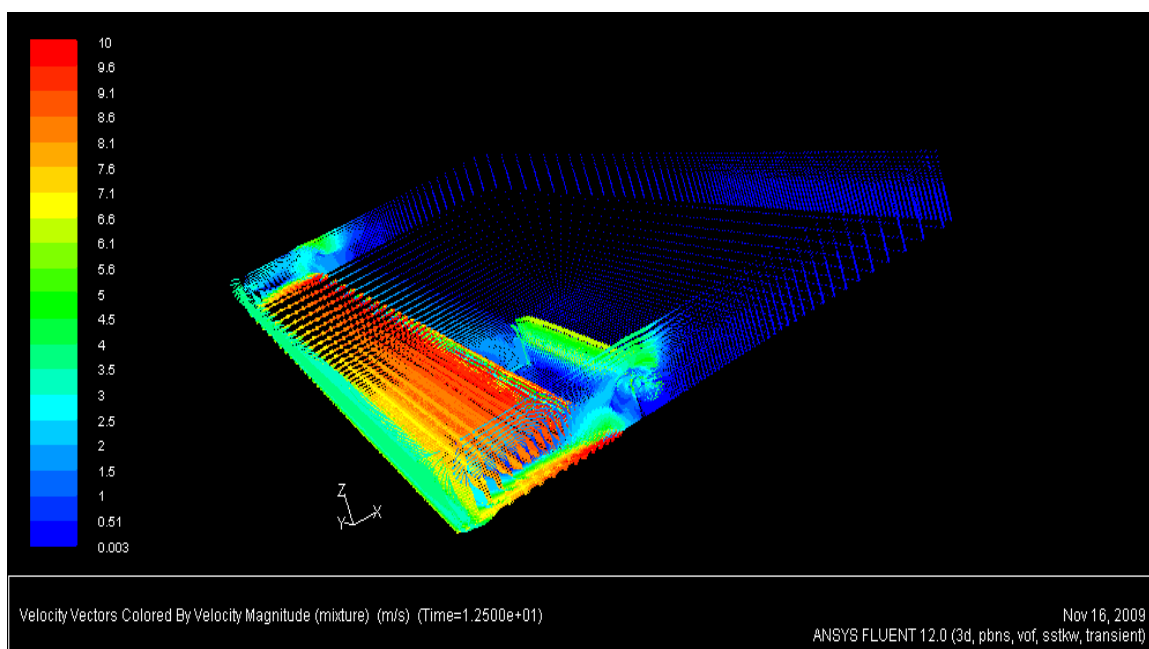
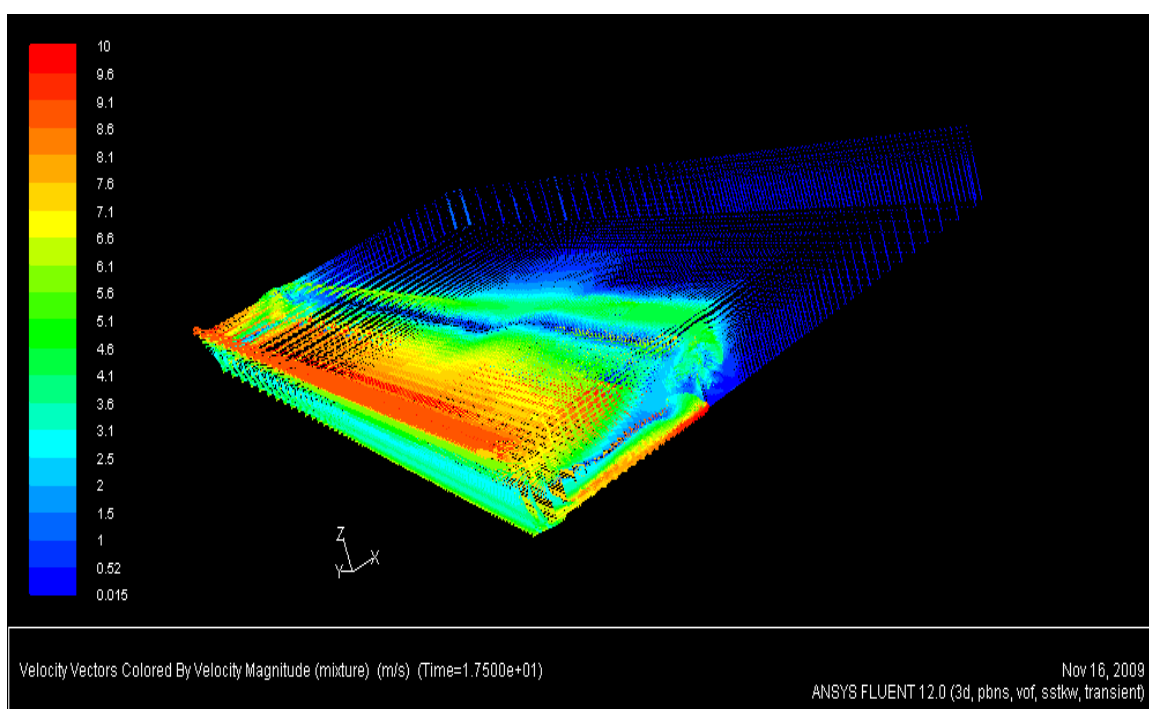


Fig. 5.9 Evoluția stabilizării soluțiilor

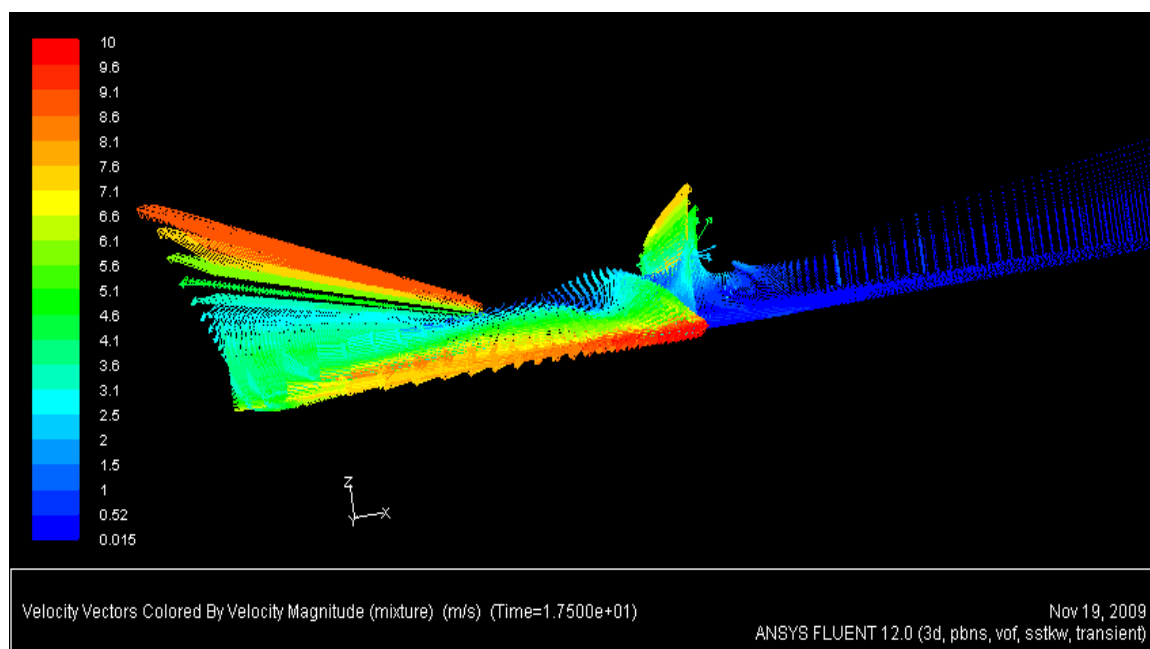
Figurile 5.10 a., b. și c. reprezintă contururile vectorilor viteză la diferite scări și în diferite poziții:



a.



b.



c.

Fig.5.10 Conturul vitezelor

Forța care acționează asupra digului este dată în tabelul 5.3:

Forces – Direction Vector (1 0 0)

Zone	Forces (N)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
fundul-apei	0	450266.5	450266.5	0	300.17	300.17
mal	0	148.55	148.55	0	0.0990	0.099
dig	91903.3	0.497	91903.888	61.268	0.000331	61.269259
mal.2	0	-0.424	-0.42462271	0	-0.00028	-0.0002830

Net	91903.3	450415.13	542318.52	61.26	300.27	361.54

Tabelul 5.3

După cum se observă acțiunea valului nostru de 0.5 m înălțime și cu o viteză de 0.5 m/s este de aproximativ 9190 daN pe o suprafață totală de aproximativ 52.5 m² (din care numai 5 m² în zona de acțiune a valului de amplitudine maximă, după aceea amplitudinea valului scade exponențial cu adâncimea).

5.5 Calculul forțelor pe modele la scară

5.5.1 Modelarea curgerii printr-un dig (baraj) rupt

Problema acțiunii curentului nu mai este așa de simplă, în special dacă este vorba de viteze mari ale apei cum este cazul viiturilor pe râuri.

Programul FLUENT ne permite să simulăm un experiment în laborator. Utilizând metodele teoriei similitudinii putem trece de la model la natură. Calculând cu FLUENT forțele care apar în natură, putem să analizăm modul în care teoria similitudinii, pe care nu o putem aplica decât incomplet (în cazul nostru utilizând numărul Fr), poate da informații asupra fenomenului la scara naturală.

Să presupunem realizarea unui experiment la scara 1:25 ($k_l = 25$) a curgerii printr-un dig (baraj) rupt. Dimensiunile reale sunt următoarele:

- diguri rămase, simetrice $L = 25$ m; $l = 2,5$ m, $h = 12,5$ m;
- distanța spărturii $d = 250$ m;
- viteza apei $v = 10$ m/s.

Aplicând similitudinea Fr , rezultă:

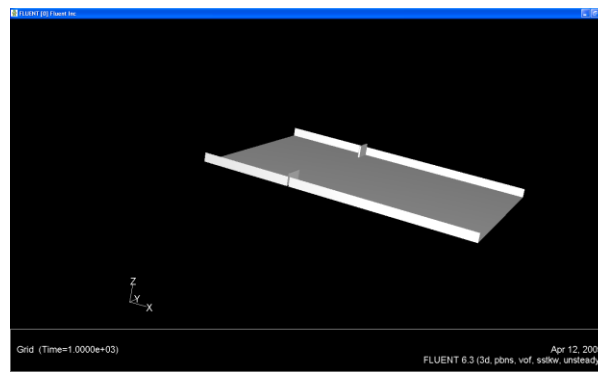
$$\frac{v^2}{gl} = \frac{v'^2}{g'l'} \quad (5.3)$$

(cu ' am notat mărimile de pe model).

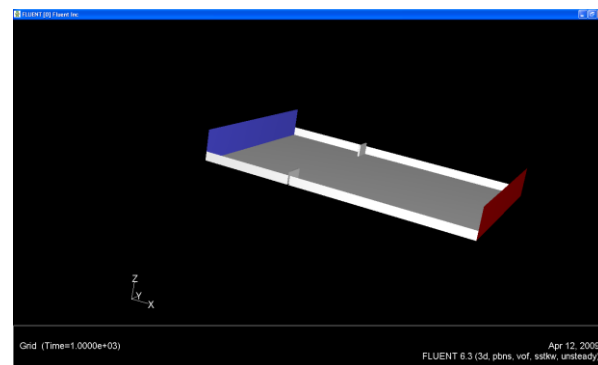
Având în vedere că $g = g'$, rezultă scara vitezelor:

$$k_v = \sqrt{k_l} = 5. \quad (5.4)$$

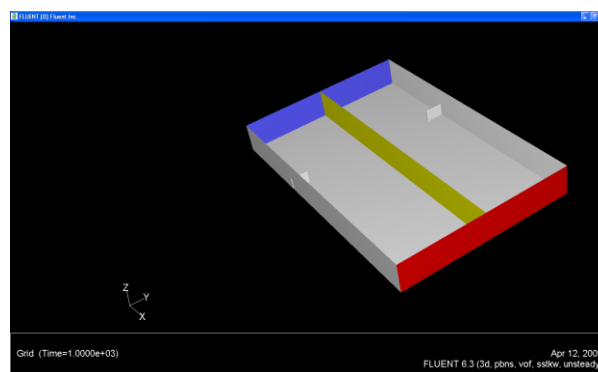
În Fig. 5.11 avem construcția în GAMBIT, pe etape, a modelului:



a.



b.



c.

Fig. 5.11 Modelul barajului rupt (a – fără intrare, ieșire; b – cu intrare, ieșire apă; c- cu axa de simetrie)

Deci $v' = 2$ m/s. Dimensiunile digurilor simetrice pe model:

$L' = 1$ m; $l' = 0,1$ m; $h' = 0,5$ m.

Distanța spărturii $d' = 10$ m.

Modelul discretizat este transmis în FLUENT. Mai întâi stabilim condițiile de rezolvare a problemei (Fig. 5.12):

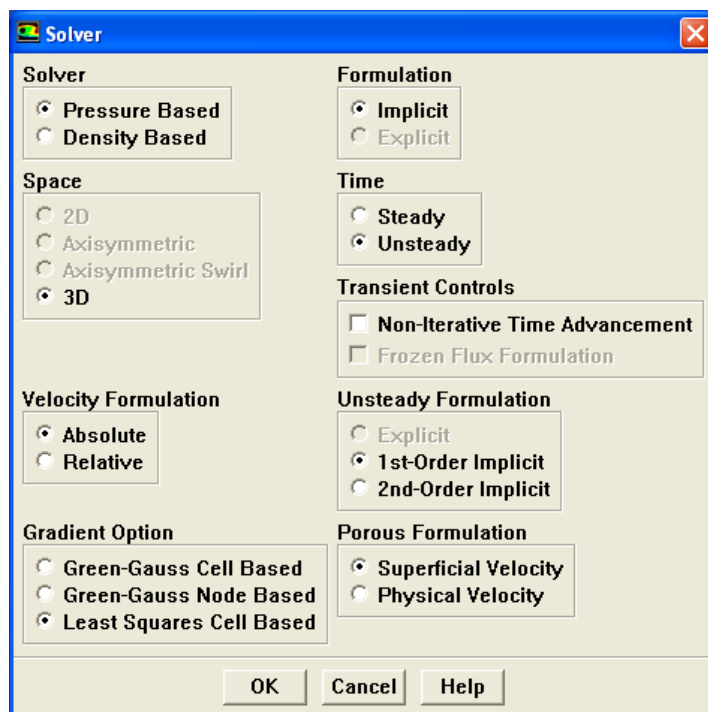


Fig. 5.12 Condițiile generale

Rezolvarea problemei se bazează pe noțiunea de presiune, cu formulare implicită. Se observă că lucrăm în 3D, condițiile de simetrie nu ne permit să utilizăm formularea simplificată 2D. Considerăm cazul general al mișcării nepermanente (unsteady): $\vec{v} = \vec{v}(\vec{r}, t)$. Viteza este cea absolută.

Foarte important: considerăm curgerea bifazică, curgere cu suprafață liberă, cu contact între aer și apă.

Calculul pornește de la viteza de intrare, paralelă cu axa Ox, către sensul pozitiv (Fig.5.13).

Condițiile la limită vor fi setate în felul următor:

- intrare – pressure inlet (viteza de intrare: 2 m/s);
- ieșire – pressure outlet;
- dig – wall;
- axa de simetrie – symmetry;
- perete lateral imers și emers – wall;
- fundul apei – wall.

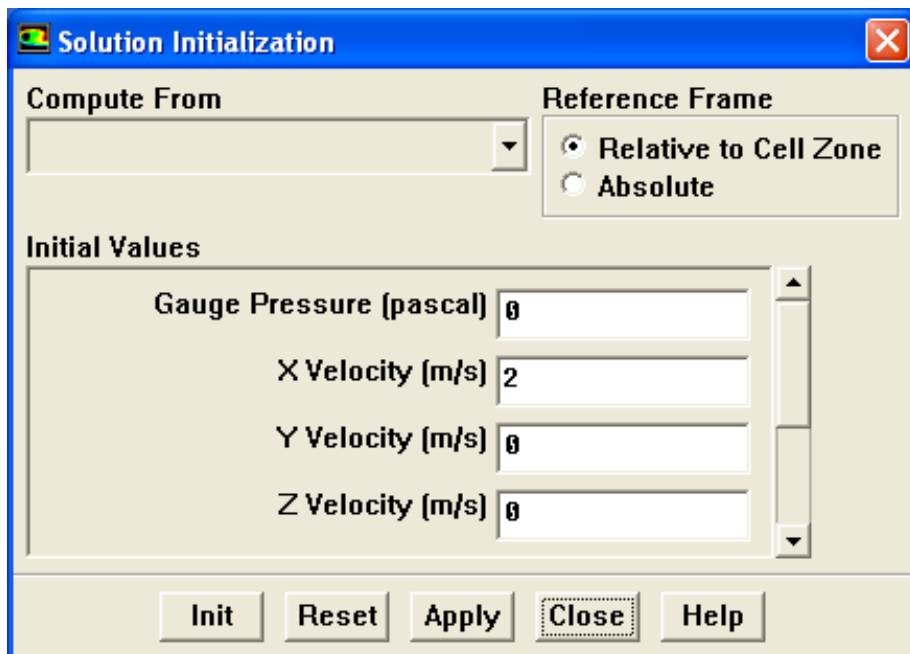


Fig.5.13 Inițializarea soluției

După efectuarea unui număr de 500 de iterații soluția se stabilizează și o putem vizualiza în diferite forme:

- conturul gridului fără (Fig. 5.14) și cu pereți (Fig. 5.15):

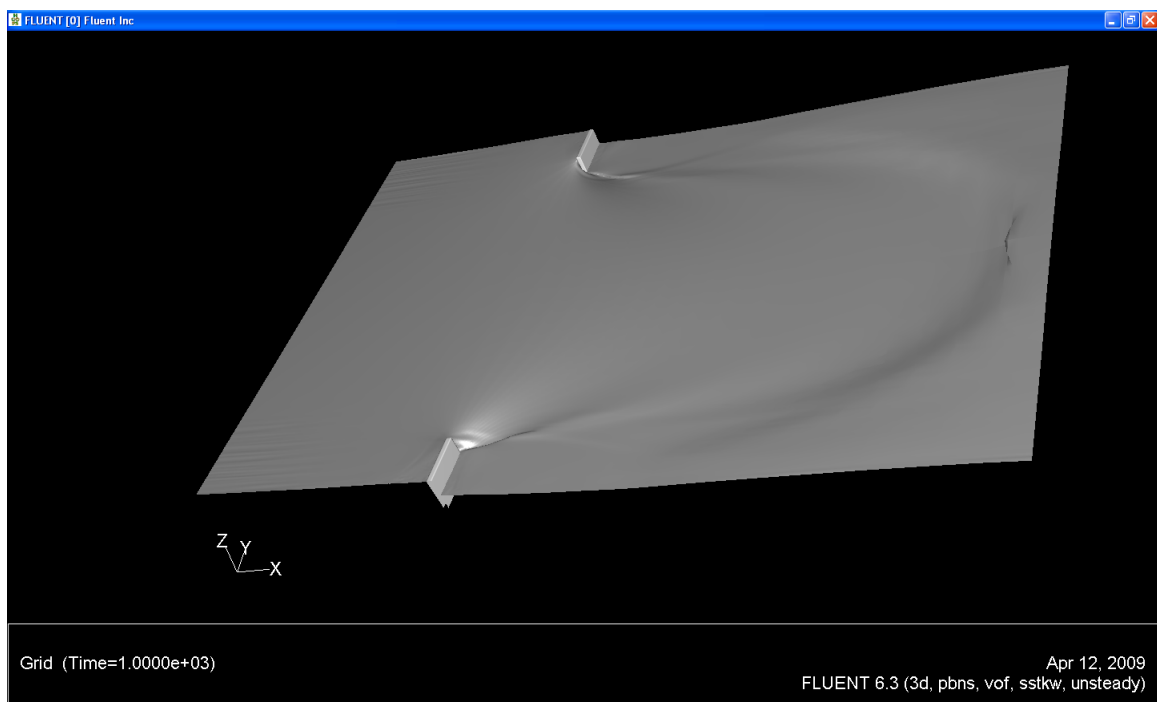


Fig. 5.14 Conturul gridului fără pereți

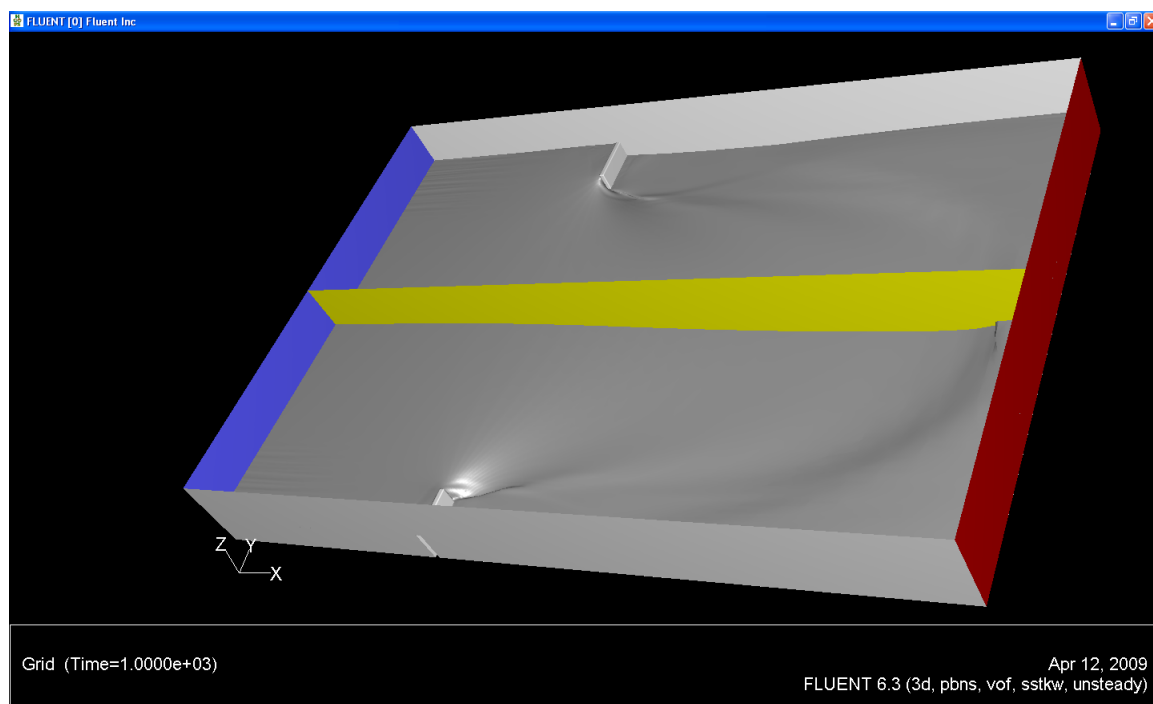


Fig. 5.15 Conturul gridului cu pereți și axă de simetrie

- conturul vitezelor (Fig. 5.16):

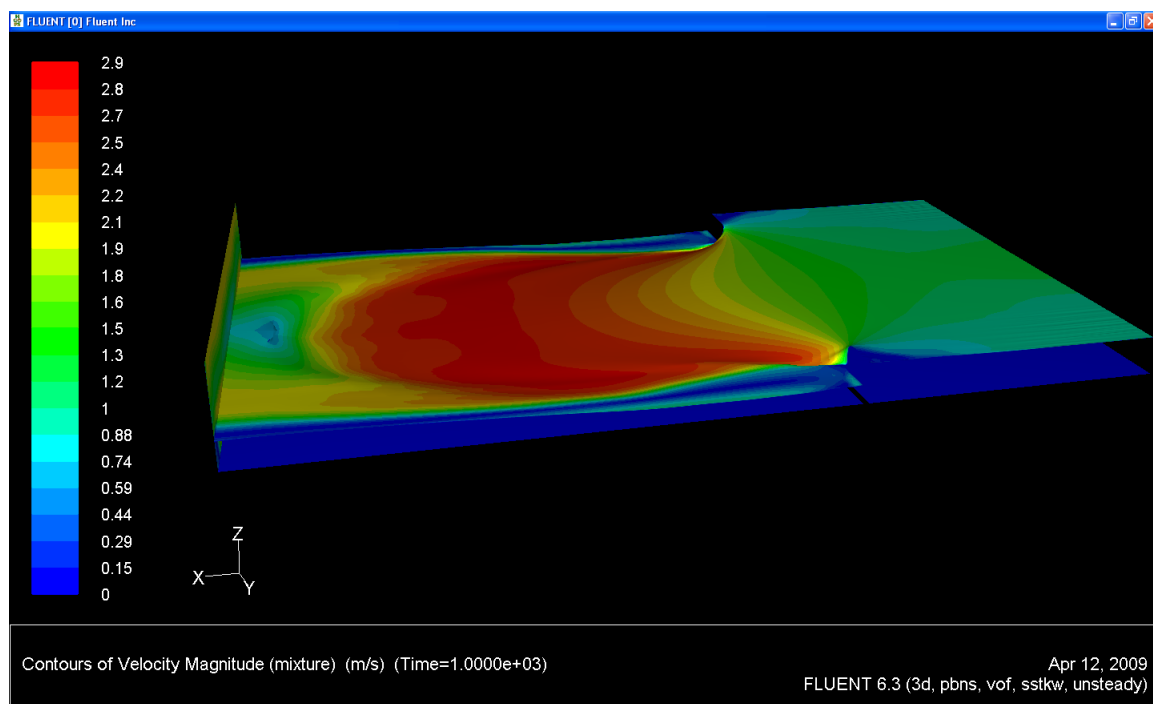


Fig. 5.16 Conturul vitezelor

- conturul presiunilor (Fig. 5.17):

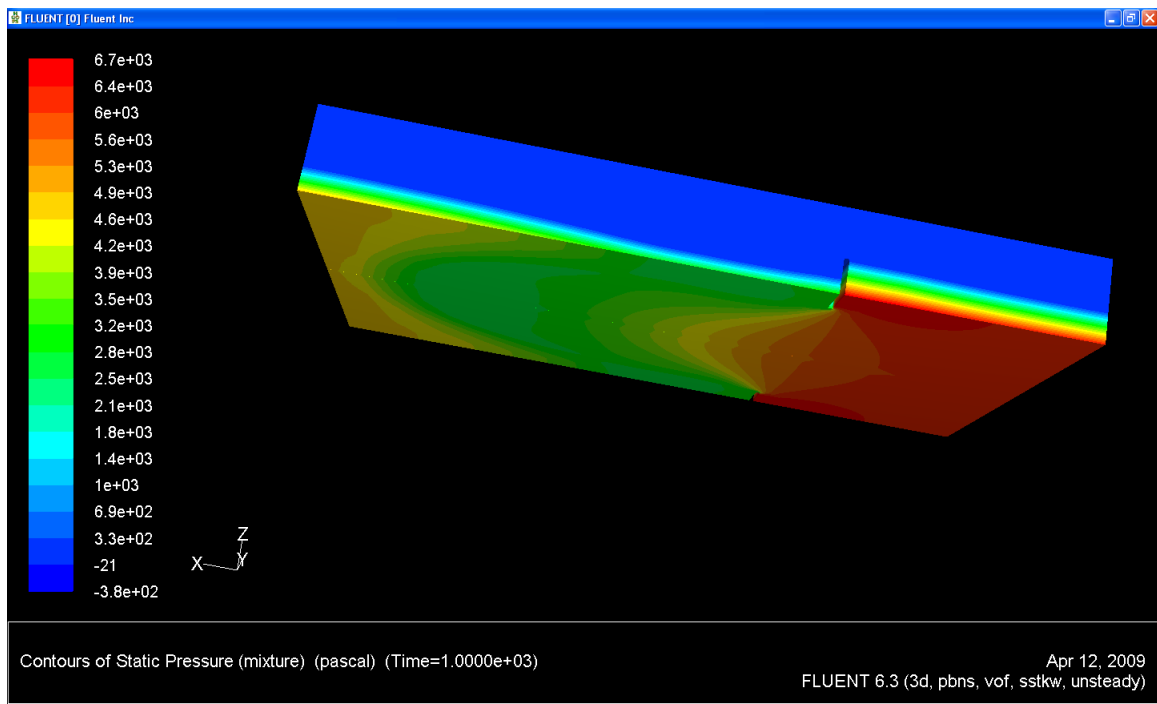


Fig.5.17 Conturul presiunilor

Putem reprezenta vitezele și ca vectori, în diferite secțiuni (Fig. 5.18):

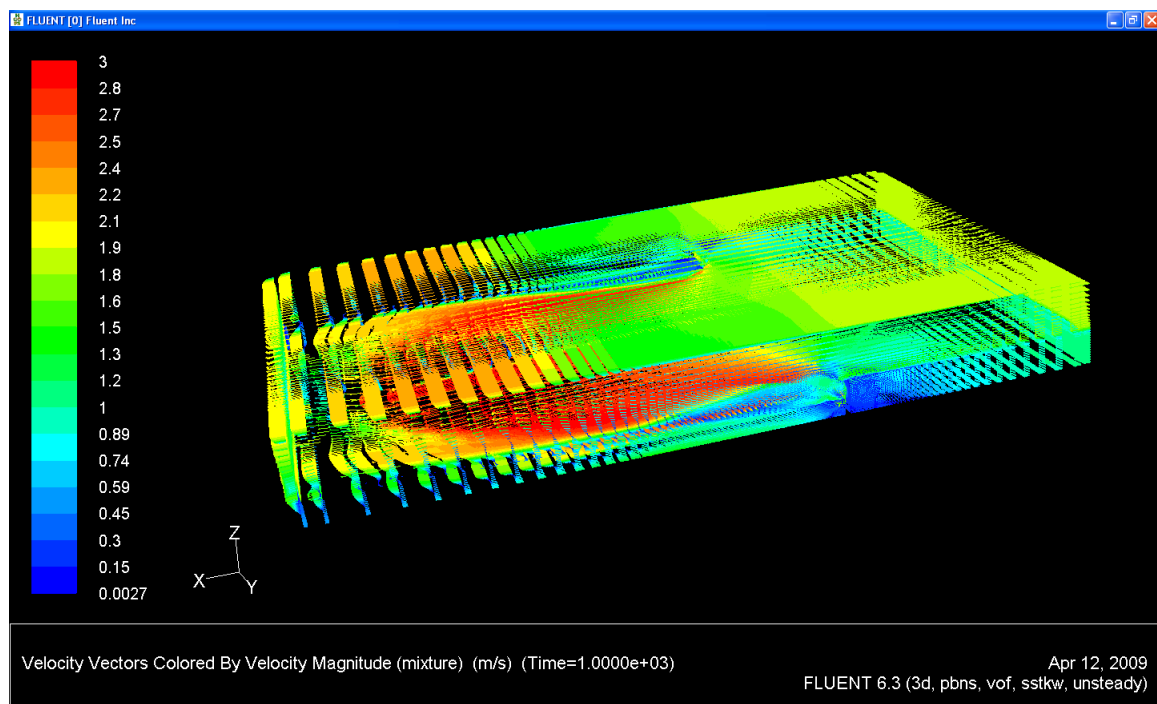


Fig. 5.18 Vitezele în diferite secțiuni ale domeniului

Forța care acționează asupra digului model este dată în tabelul 5.4:

Force vector: (1 0 0)

	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			
dig	1714.27	0.013	1714.283	1.1428	8.719774e-06	1.1428
net	1714.27	0.013	1714.283	1.1428	8.719774e-06	1.1428

Tabelul 5.4

Scara forțelor se stabilește utilizând formula $F = \gamma V$, în care γ este greutatea specifică a fluidului. Având același fluid – apa – atât pe model cât și în natură, putem concluziona că scara forțelor este egală cu scara volumelor, adică cubul scării lungimilor:

$$k_F = k_l^3. \quad (5.5)$$

Deci forța care acționează asupra porțiunii de dig rămasă în natură are valoarea:

$$F = 1714 \times 25^3 = 26\,781\,250 \text{ N} = 2\,678 \times 10^3 \text{ daN}.$$

Debitul masic care la intrare este calculat de FLUENT în tabelul 5.5:

Mass Flow Rate	(kg/s)
intrare	3620.84
Net	3620.84

Tabelul 5.5

După stabilirea scării timpului ($t = l/v$),

$$k_t = \frac{k_l}{k_v} = \frac{k_l}{\sqrt{k_l}} = \sqrt{k_l} = 5 \quad (5.6)$$

scara debitelor se calculează cu formula ($k_p = 1$, același fluid pe model și în natură):

$$Q_m = \rho V / t \Rightarrow k_Q = k_l^3 / \sqrt{k_l} = k_l^{\frac{5}{2}} = 3125.$$

Deci debitul la intrare, în natură, va fi:

$$Q = 3620 \times 3125 = 11\,312\,500 \text{ kg/s.}$$

Este vorba de o viitură de 10 m/s care trece printr-o secțiune foarte mare, aproximativ $250 \times 12,5 \text{ m}^2$.

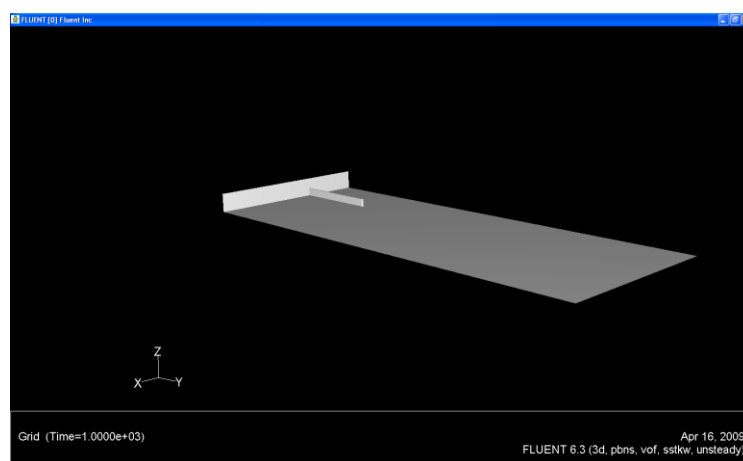
5.5.2 Modelarea acțiunii curentului asupra digului

Considerăm cazul unui dig așezat perpendicular pe direcția de curgere a unui fluviu destinat protejării unei incinte portuare.

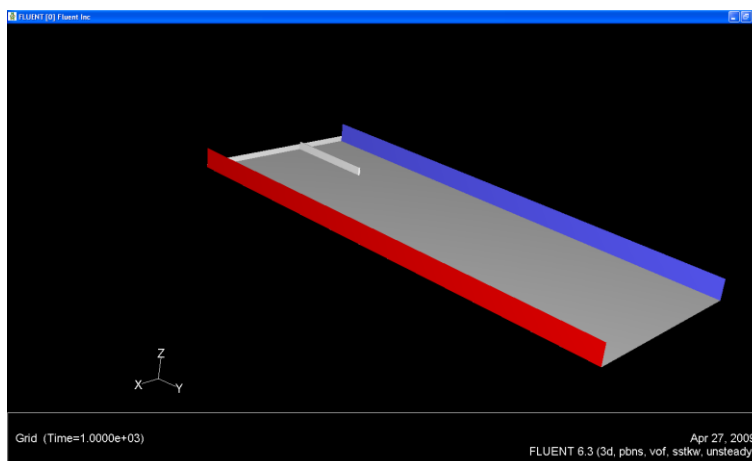
Dimensiunile părții imerse a digului sunt următoarele: $L = 200 \text{ m}$; $l = 2,5 \text{ m}$, $h = 12,5 \text{ m}$. Viteza apei $v = 2 \text{ m/s}$.

Modelul la scara 1:25 va avea dimensiunile: $L' = 8 \text{ m}$; $l' = 0,1 \text{ m}$, $h' = 0,5 \text{ m}$. Conform similitudinii Fr (vezi capitolul 5.5.1) $v' = 0,4 \text{ m/s}$.

În Fig. 5.19 avem construcția în GAMBIT, pe etape, a modelului:



a.



b.

Fig. 5.19 Modelul digului în curent de apă (a – fără intrare, ieșire; b – cu intrare, ieșire apă)

Condițiile generale de rezolvare a problemei sunt aceleași ca la capitolul 5.3:

- formulare implicită;
- 3D;
- mișcare nepermanentă (unsteady): $\bar{v} = \bar{v}(\bar{r}, t)$;
- modelul de turbulență: k-omega.

Considerăm curgerea bifazică, cu suprafață liberă și cu contact între aer și apă.

Calculul pornește de la viteza de intrare, paralelă cu axa Ox, către sensul pozitiv: $v = 0,4$ m/s.

După aproximativ 300 de iterații putem constata linearizarea soluțiilor pentru C_D – coeficientul rezistenței la înaintare (Fig. 5.20), componentele vitezelor pe cele trei axe, k, omega (Fig. 5.21).

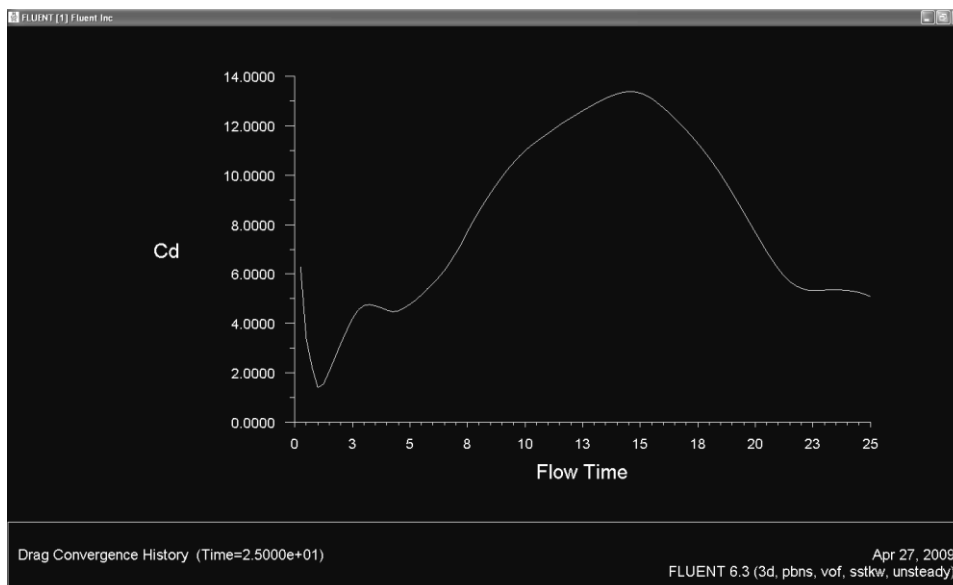


Fig. 5.20 Evoluția lui C_D

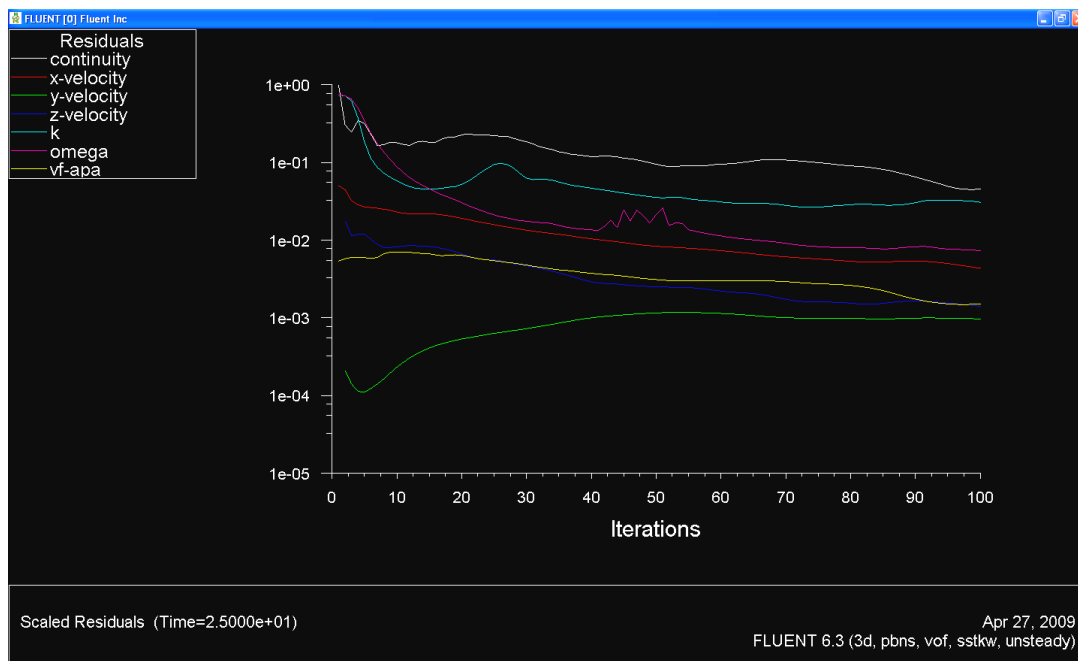


Fig. 5.21 Evoluția vitezelor.

După stabilizarea soluțiilor putem vizualiza conturul presiunilor statice (Fig. 5.22) și al vectorilor de viteză în diferite secțiuni (Fig. 5.23 a și b):

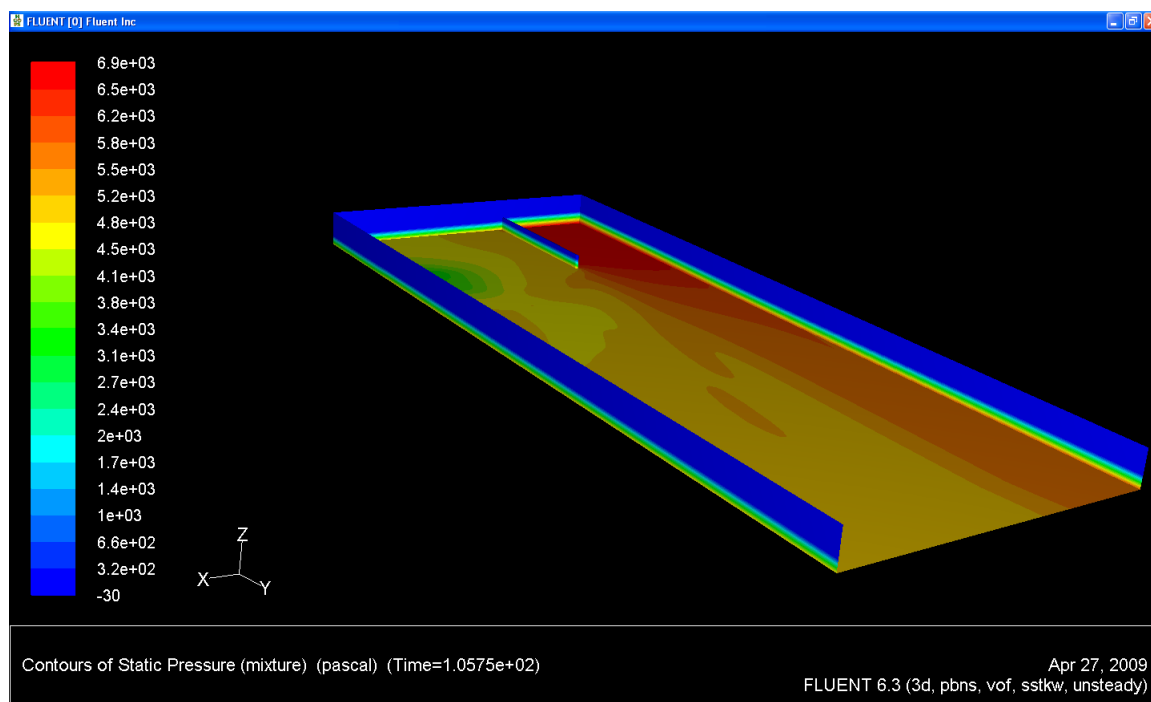
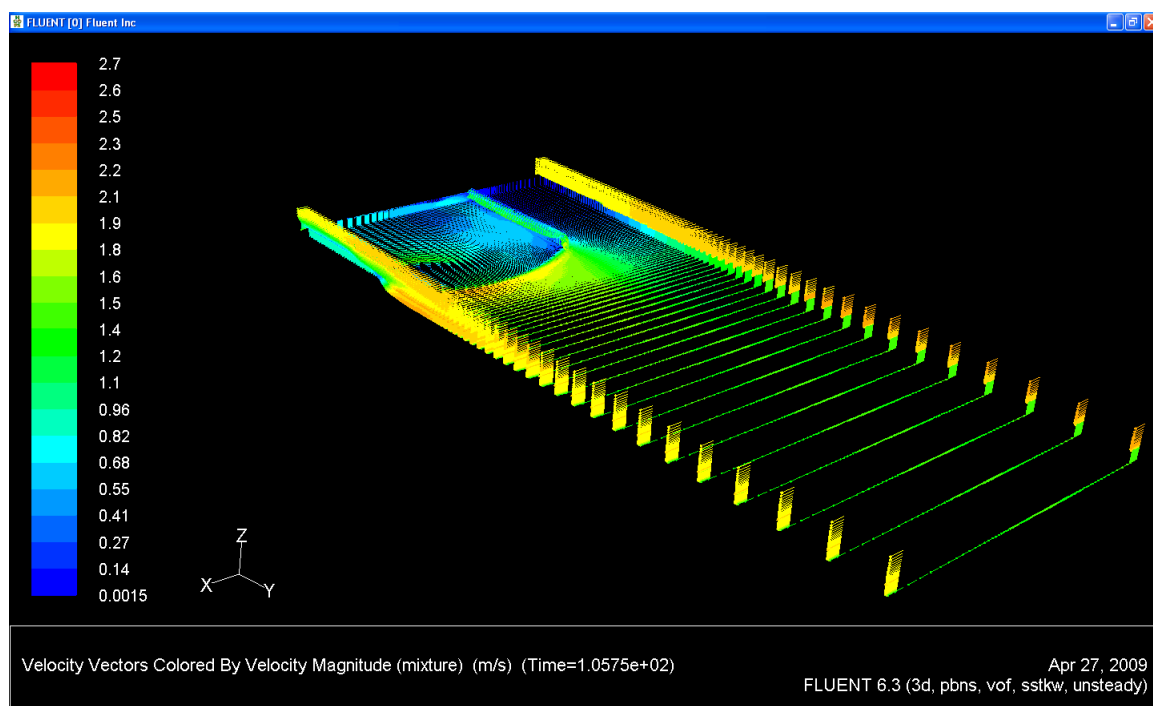
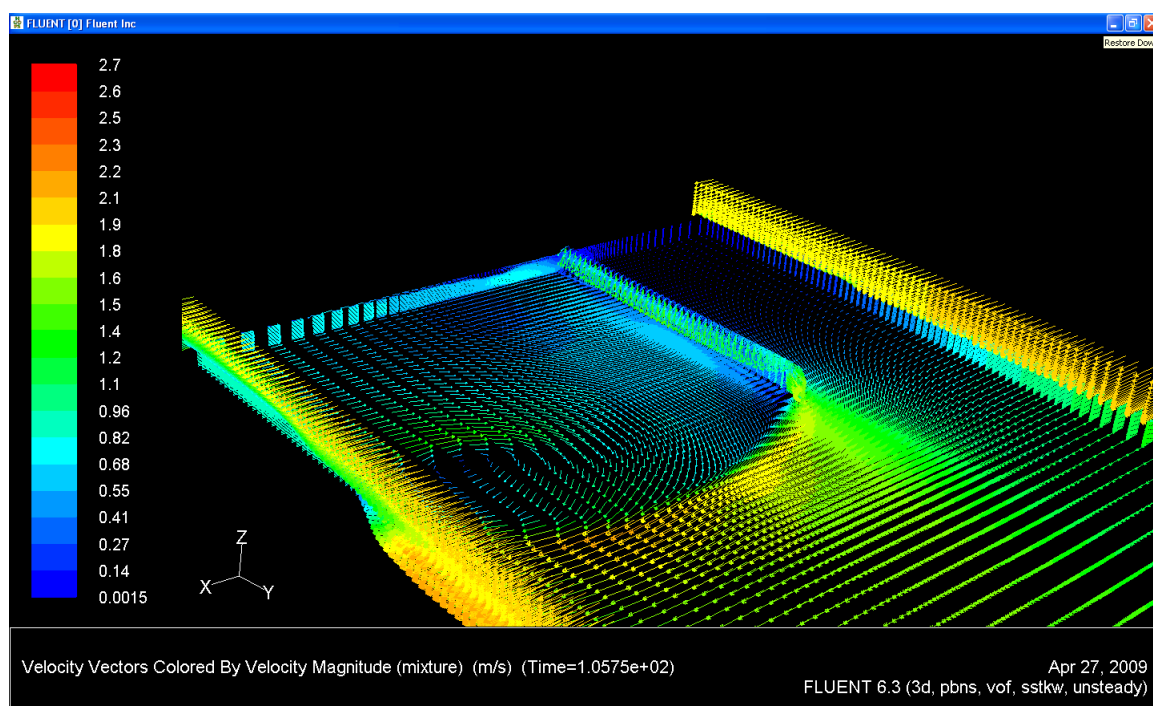


Fig. 5.22 Conturul presiunilor



a.



b.

Fig. 5.23 Vitezele în diferite secțiuni ale domeniului

Forța care acționează asupra digului model este dată în tabelul 5.6:

Force vector: (1 0 0)

	pressure	viscous	total	pressure	viscous	total
zone name	force	force	force	coefficient	coefficient	coefficient
	n	n	n			

fundul-apei	0	1803.9548	1803.9548	0	1.2026366	1.2026
mal	0	-2.540731	-2.540731	0	-0.00169382	-0.00169
dig	8681.01	0.10	8681.11	5.7873457	7.0015152e-05	5.787
mal.2	0	0.18278292	0.1827829	0	0.00012185	0.000121855

net	8681.01	1801.7019	10482.72	5.7873457	1.2011346	6.98

Tabelul 5.6

Pentru a determina forța care acționează asupra digului în mărime naturală, aplicăm scările mărimilor fizice de la capitolul 5.3.1:

$$\text{La } v = 2 \text{ m/s, } F = 8681 \times 25^3 = 135\,640\,625 \text{ N} = 13\,564 \times 10^3 \text{ daN.}$$

Pe suprafața de $10\,000 \text{ m}^2$ a părții imerse a digului acționează o forță de aproximativ 13 564 de tone în unități vechi. Deci un efort de compresie de aproximativ $0,135 \text{ daN/cm}^2$.

5.6 Concluzii

Digurile sunt solicitate la diferite forțe de tip hidro-aerodinamic (vânt, curent, valuri, interacțiune cu navele), hidrostatic, dar și mecanic (ciocniri). În acest capitol am prezentat o simulare a acțiunii vântului asupra părții emerse, care s-a dovedit a fi nesemnificativă în raport cu acțiunea valului, dar mai ales cu acțiunea curentului. Această acțiune a curentului este mai importantă atunci când ne referim la digurile sau barajele situate pe ape interioare (râuri, fluvii).

Simularea curgerii apei printr-un baraj rupt ne-a permis să constatăm distribuția vitezelor în acea zonă, dar mai ales să evaluăm forțele care acționează asupra digului rămas în picioare.

Acțiunea curentului asupra părții imerse a digului a fost calculată cu ajutorul programului FLUENT atât în mărime naturală cât și pe model. Compararea rezultatelor obținute ne-a permis să tragem niște concluzii referitoare la utilizarea programului FLUENT numai pentru studiu pe model urmând ca trecerea în natură să se facă cu ajutorul similitudinii. Diferența dintre valorile forțelor care acționează asupra digului obținute prin calculul digului în mărime naturală și valorile obținute prin calculul pe model și trecerea lui în natură cu ajutorul similitudinii Froude sunt foarte apropiate ($11\,890 \times 10^3$ daN față de $13\,564 \times 10^3$ daN). Această diferență de 11 % poate fi cauzată de mai mulți factori:

- utilizarea unei similitudini incomplete (după cum se știe nu putem ține cont de toate criteriile de similitudine și îl luăm în considerare pe acela care reflectă cel mai bine fenomenul – în cazul nostrum Fr);
- aproximarea calculului iterativ al programului FLUENT care nu mai este așa precisă pentru natură deoarece dimensiunile au crescut, pe toate cele trei axe, de 25 de ori.

De remarcat că valoarea obținută prin similitudine este mai mare, deci un calcul de rezistență, ținând cont că valoarea reală ar fi mai mică, este acoperitor.

Având în vedere aceste considerente, se poate spune că putem utiliza, în anumite situații, simulatorul FLUENT drept stand de probe, efectuând calculele pe un model la scară, rezultatele obținute putând fi trecute în natură cu ajutorul invarianților de similitudine. De ce am face acest lucru? Dintr-un motiv foarte simplu. Procesul de calcul ar fi mult redus, economia de timp și de resurse fiind evidentă.

Asocierea termenilor Program de calcul – Stand de probe poate părea ciudată, dar am folosit-o în această teză ca pe o idee originală menită să simplifice o abordare laborioasă a calculelor pentru structuri de mare anvergură.

Ideea poate fi dezvoltată într-un mod și mai spectaculos. Având în vedere faptul că digurile sunt structuri mult mai lungi decât lățimea și înălțimea lor, vom încerca, în capitolul următor să utilizăm similitudinea la două scări. Vom vedea în ce măsură, efectuând calculul în FLUENT (experimentând pe „stand-ul” FLUENT) pe un model distorsionat, rezultatele trecute în natură pe scările similitudinii la două scări, corespund cu calculul digului efectuat în mărime naturală.

6. Similitudinea la două scări a digurilor.

Există situații în care modelarea fizică a unei structuri nu poate fi realizată sau este dificil de realizat datorită diferenței mari dintre dimensiunile acesteia. Este cazul conductelor lungi în care dacă am aplica o singură scară pentru lungime și diametru, modelul rezultat ar avea o secțiune extrem de mică, care ar afecta evident fenomenul curgerii. În cazul temei noastre, digurile lungi ar fi mai bine modelate dacă vom utiliza două scări: una pentru lungime și alta pentru lățime și înălțime.

Utilizarea similitudinii la două scări este utilă și în reprezentările mai sugestive ale fenomenelor, dar mai ales în simulările computerizate care au devenit mai mult decât ilustrări ale diferitelor procese, au devenit, în urma perfecționării soft-urilor, adevărate metode de cercetare.

În capitolul de față ne propunem ca, utilizând programul ANSYS-FLUENT, să facem o comparație între rezultatele acțiunii curentului de apă asupra unui dig lung în cazul similitudinii la o scară și la două scări, rezultate comparate între ele și cu calculele făcute pe digul în mărime naturală.

6.1 Legea modelului

Pentru a putea scrie legea modelului la două scări, trebuie să precizăm, mai întâi, mărimile fizice care intervin în fenomenul curgerii curentului de apă (fluviu) în jurul digului: densitatea ρ a lichidului; viteza v de curgere; lungimea L a digului; h – înălțimea digului, accelerația gravitațională - g ; presiunea fluidului - p ; perioada - τ , viscozitatea - ν . Unghiul de atac α este perpendicular pe dig fiind același pe prototip și pe model.

Funcția implicită care descrie fenomenul de curgere în jurul digului este:

$$f(\rho, v, h, L, g, p, \tau, \nu, \alpha) = 0. \quad (6.1)$$

Pentru a aplica teorema Π funcției (6.1), studiem mai întâi matricea dimensională a variabilelor:

$$\begin{array}{cccccccc}
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\
 \rho & v & h & L & g & p & \tau & v \\
 \left\| \begin{array}{c} m \\ s \\ Kg \end{array} \right\| \begin{array}{cccccccc} -3 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -2 & -2 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right\|, & (6.2)
 \end{array}$$

de unde obținem sistemul de ecuații:

$$\begin{aligned}
 -3x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 - x_6 + 2x_8 &= 0; \\
 -x_2 - 2x_5 - 2x_6 - x_7 - x_8 &= 0; \\
 x_1 + x_6 &= 0.
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Soluțiile acestui sistem sunt:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= -x_6; \\
 x_2 &= -2x_5 - 2x_6 - x_7 - x_8; \\
 x_3 &= -x_4 + x_5 - x_7 - x_8.
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Putem scrie acum matricea soluțiilor:

$$\begin{array}{cccccccc}
 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\
 \rho & v & h & L & g & p & \tau & v \\
 \Pi_1 \left\| \begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\| & (6.5)
 \end{array}$$

Din matricea soluțiilor obținem criteriile de similitudine:

$$\Pi_1 = \frac{L}{h}; \Pi_2 = \frac{gh}{v^2}; \Pi_3 = \frac{p}{\rho v^2}; \Pi_4 = \frac{\tau h}{v}; \Pi_5 = \frac{v}{vh}. \tag{6.6}$$

și ecuația criterială în care introducem și unghiul de atac α :

$$\varphi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \alpha) = 0. \quad (6.7)$$

6.2 Scara mărimilor fizice

În modelul distorsionat notăm cu k_y scara lungimii digului și cu k_x scara lățimii și înălțimii sale. Raportul:

$$k_1 = \frac{k_y}{k_x} = \Pi_1 \quad (6.8)$$

Reprezintă raportul de distorsiune.

$$p = \gamma h \Rightarrow k_p = k_\gamma k_x. \quad (6.9)$$

Dar $k_\gamma = 1$, γ același pe model și în natură. Deci:

$$k_p = k_x. \quad (6.10)$$

Respectând similitudinea Froude:

$$\Pi_2 = \frac{1}{Fr} = 1, \quad (6.11)$$

vom avea:

$$\frac{v^2}{gh} = \frac{v'^2}{g'h'} \quad (6.12)$$

(cu ' am notat mărimile de pe model).

Având în vedere că $g = g'$, rezultă că scara vitezelor:

$$k_v = \sqrt{k_x}. \quad (6.13)$$

Pentru a stabili scara forțelor utilizăm relația:

$$F = \gamma V \Rightarrow k_F = k_\gamma k_x^2 k_y \quad (6.14)$$

sau, ținând cont că $k_\gamma = 1$:

$$k_F = k_x^2 k_y. \quad (6.15)$$

Revenim la cazul nostru prezentat în capitolul 5.5.2:

Este vorba de un dig așezat perpendicular pe direcția de curgere a unui fluviu destinat protejării unei incinte portuare.

Dimensiunile părții imerse a digului sunt următoarele: $L = 200$ m; $l = 2,5$ m, $h = 12,5$ m.

Viteza apei $v = 2$ m/s.

Considerăm scările geometrice în felul următor:

$$k_x = k_z = 25; k_y = 200. \quad (6.16)$$

Conform (6.8) raportul de distorsiune va fi:

$$k_1 = \frac{k_y}{k_x} = 8. \quad (6.17)$$

Modelul distorsionat va avea dimensiunile:

$$L' = 1 \text{ m}; l' = 0,1 \text{ m}, h' = 0,5 \text{ m}.$$

Conform similitudinii Fr – relația (6.12) și (6.13):

$$v' = 0.4 \text{ m/s}.$$

Conform relației (6.15) scara forțelor va avea mărimea:

$$k_F = k_x^2 k_y = 25 \times 25 \times 200 = 125\,000. \quad (6.18)$$

6.3 Modelarea curgerii pe model

În Fig. 6.1 avem construcția în programul GAMBIT a modelului:

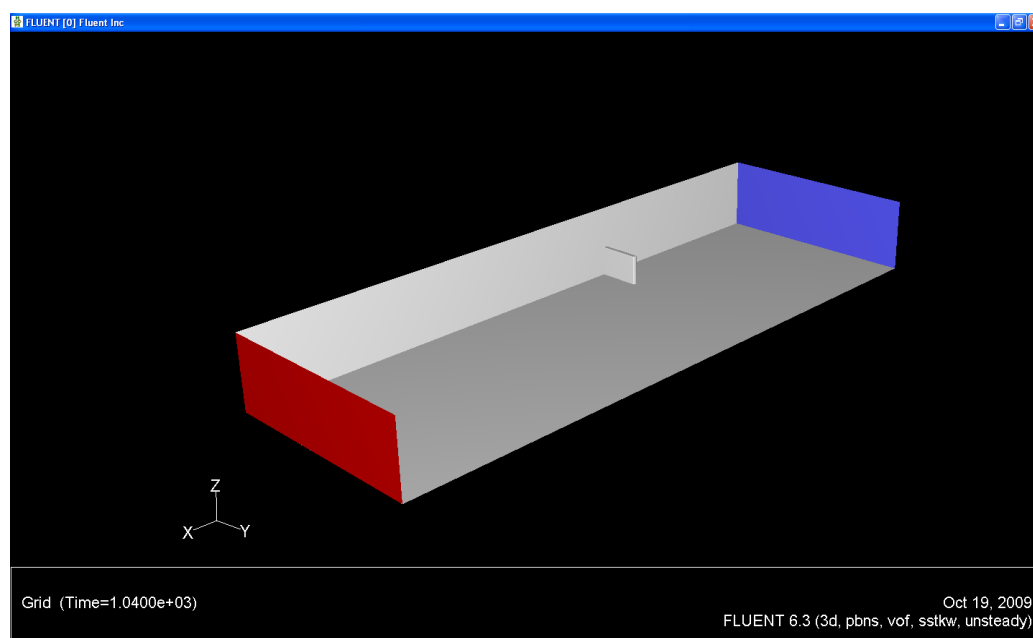


Fig. 6.1 Modelul distorsionat al digului

Condițiile generale de rezolvare a problemei sunt aceleași ca la capitolul 5.3:

- formulare implicită;
- 3D;
- mișcare nepermanentă (unsteady): $\bar{v} = \bar{v}(\bar{r}, t)$;
- modelul de turbulență: k-omega;
- VOF – Volume of Fluid pentru curgere cu suprafață liberă.

Considerăm curgerea bifazică, cu suprafață liberă și cu contact între aer și apă.

Calculul pornește de la viteza de intrare, paralelă cu axa Ox, către sensul pozitiv:
 $v = 0,4 \text{ m/s}$.

După stabilizarea soluțiilor putem vizualiza conturul presiunilor statice (Fig. 6.2):

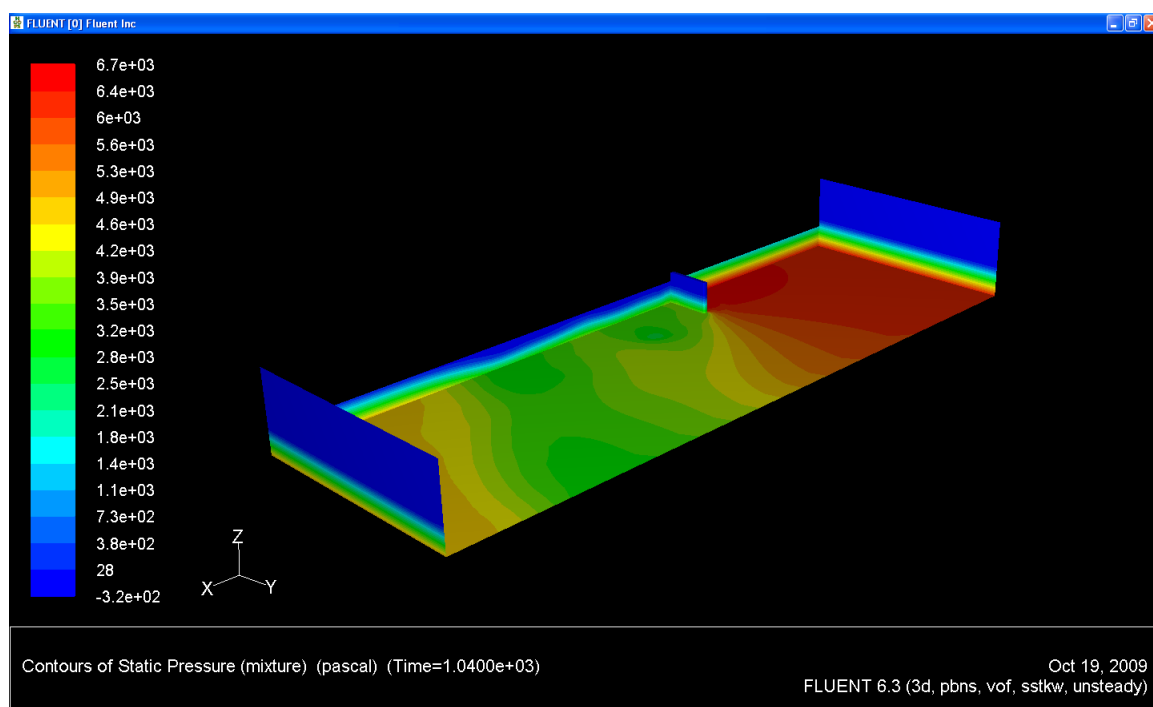


Fig. 6.2 Conturul presiunilor

În figurile următoare (Fig. 6.3, Fig. 6.4 a și b) sunt prezentate distribuțiile vectorilor de viteză în diferite secțiuni și vederi:

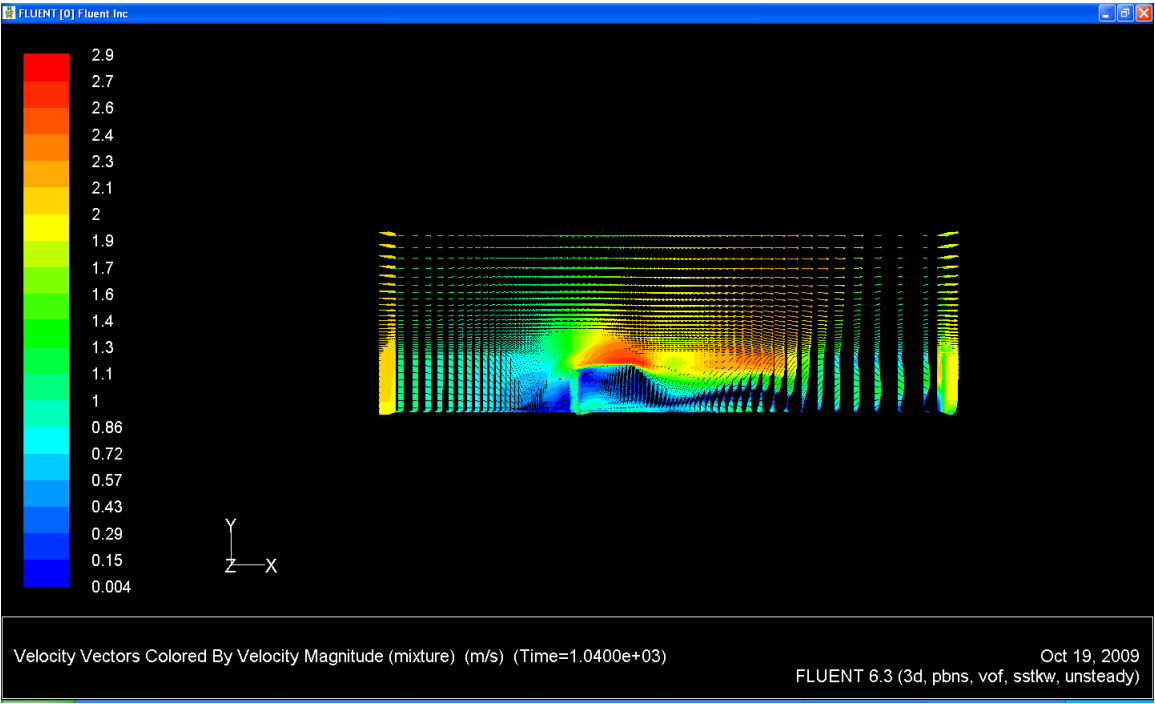
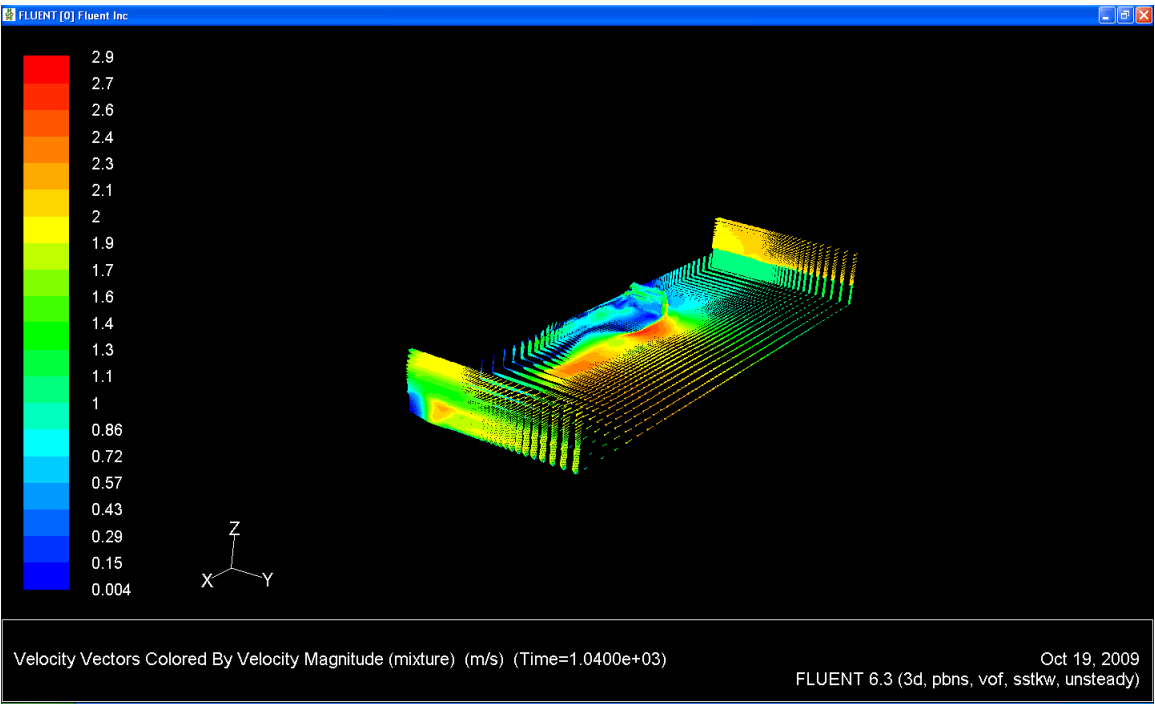
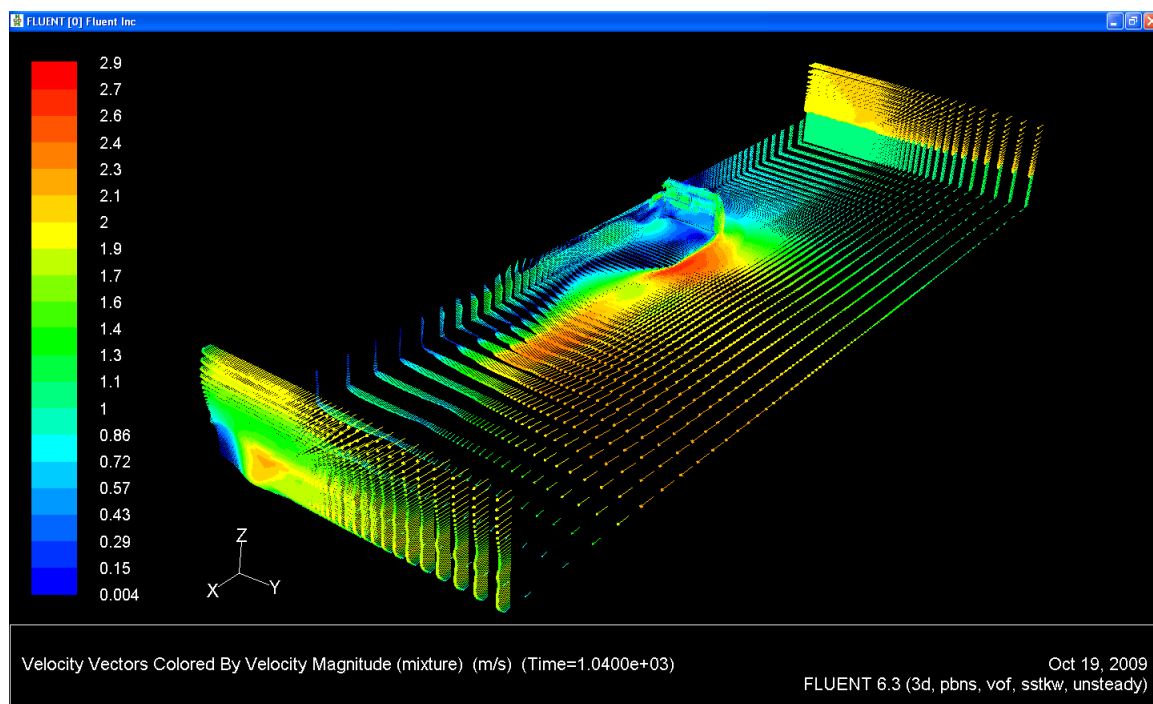


Fig. 6.3 Distribuția vitezelor (vedere de sus)



a.



b.

Fig. 6.4 Vitezele în diferite secțiuni ale domeniului

Forța care acționează asupra digului model este dată în tabelul 6.1:

Force vector: (1 0 0)

	pressure		viscous		total	
zone name	force	n	force	n	force	n
fundul-apei	0	380.88428	380.88428	0	0.25392285	0.25392285
mal	0	-2.4170322	-2.4170322	0	-0.001611354	-0.001611354
dig	1207.32	0.002225	1207.3285	0.804884	1.4837e-06	0.8048856
mal.2	0	0.95656317	0.95656317	0	0.00063770	0.000637708
net	1207.32	379.42603	1586.7523	0.804884	0.25295069	1.0578349

FLUENT

Version: 3d, pbns, vof, sstkw, unsteady (3d, pressure-based, VOF, SST k-omega, unsteady)

Tabelul 6.1

Pentru a determina forța care acționează asupra digului în mărime naturală, aplicăm scările mărimilor fizice de la capitolul precedent (6.18):

$$La \ v = 2 \text{ m/s},$$

$$F = 1207 \times 25^2 \times 200 = 150\,875\,000 \text{ N} = 15\,087,5 \times 10^3 \text{ daN}.$$

6.4 Modelarea curgerii în natură

Modelarea curgerii în natură a fost realizată la capitolul 5.3.

A fost luat în calcul digul cu următoarele dimensiuni ale părții imerse:

$$L = 200 \text{ m}; \ l = 2,5 \text{ m}, \ h = 12,5 \text{ m}.$$

$$\text{Viteza apei } v = 2 \text{ m/s}.$$

Digul în natură este așezat perpendicular pe direcția de curgere a unui fluviu pentru a proteja o incintă portuară.

Curgerea a fost considerată bifazică, în regim nepermanent (unsteady), cu suprafață liberă, cu contact între aer și apă.

Modelul de turbulență ales a fost k-omega.

Pe baza unui calcul laborios, efectuat cu programul FLUENT, a fost obținută valoarea forței care acționează asupra digului:

$$F = 118\,900\,000 \text{ N} = 11\,890 \times 10^3 \text{ daN}.$$

6.5 Concluzii

Analiza comparativă poate fi făcută în mai multe feluri:

- între valorile obținute utilizând similitudinea la două scări și cele pentru similitudinea normală (între experimentările pe “modelul” la două scări și cel la o singură scară);
- între rezultatele obținute în natură și pe “modelul” la una sau două scări.

Dacă ne referim numai la valoarea forței de acțiune a curentului asupra digului observăm o diferență a valorii totale de aproximativ 26 de procente între valoarea calculată pentru digul în “natură” și cel pe “modelul” la două scări, față de 11 procente în cazul similitudinii normale. Diferența este destul de mare și nu o putem pune numai pe seama celor două scări.

Dacă în cazul similitudinii normale diferența de 11% este acceptabilă ținând cont de faptul că numai unul din criterii este respectat, în cazul similitudinii la două scări se constată o diferență apreciabilă care reduce avantajele utilizării acestui tip de metodă numai la simularea grafică mai sugestivă. Acest lucru a fost observat și cu ocazia altor cercetări pe modele fizice la două scări în care similitudinea a putut fi aplicată cel mult parțial, pe anumite domenii (ex. aplicarea similitudinii la aripile portante – coeficientul C_y - este valabilă numai pentru un domeniu de variație a unghiului de atac [22]).

Totuși considerăm că metoda similitudinii la două scări nu trebuie abandonată, utilizarea criteriilor de similitudine fără restricții, într-un „stand virtual”, cu lichide exotice, aflate în zone cu accelerații gravitaționale diferite de cea a Pământului, putând aduce concluzii interesante.

7. Determinarea vitezei nivelului de lichid din ecluză la o variație liniară a debitului din conducta de umplere (golire)

7.1 Expunerea problemei

O modelare matematică cât mai exactă a fenomenului umplerii (golirii) unui rezervor cu lichid, în cazul nostru sasul unei ecluze, presupune rezolvarea ecuațiilor de curgere și de continuitate în condiții cât mai aproape de realitate.

Ecluza permite trecerea navelor între două biefuri, amonte și aval, având cote diferite. Prin intermediul sas-ului se realizează egalizarea acestor cote. Pentru aceasta el trebuie umplut (golit) cu apă. Umplerea sau golirea sas-ului cu apă se face de obicei gravitațional din sau către cele două biefuri. Ecluzele sunt dotate cu sisteme de umplere (golire) formate din conducte, vane, orificii de intrare-ieșire a apei etc. Aplicația demersului nostru matematic se va referi la cazul cel mai întâlnit – sistemul de umplere prin cădere liberă cu ajutorul unor galerii de ocolire a porților. Ne referim, de asemenea, la perioadele de tranziție când vanele se deschid sau se închid, pe rând sau toate odată, dar și la faptul că între biefuri și sas există conducte, uneori destul de lungi, care influențează procesul de umplere (golire) (Fig. 7.1).

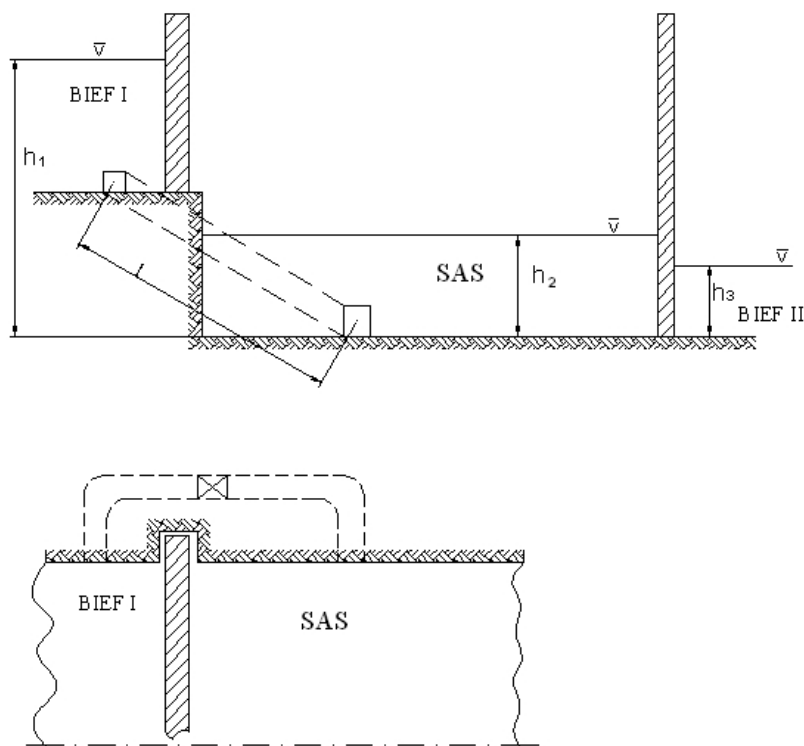


Fig. 7.1 Schema unei ecluze în vedere laterală și de sus.

Potențialul vector este o noțiune preluată din electrotehnică, de fapt o simbolizare necesară facilitării calculelor matematice (la câmpurile solenoidale $\nabla \bar{v} = 0$, ceea ce implică $\bar{v} = \text{rot} \bar{A}$, $\bar{A} = \bar{A}(x, y, z, t)$ fiind potențialul vector al câmpului dacă $\nabla \bar{A} = 0$), aparent fără semnificație fizică. Semnificația fizică a potențialului vector a fost pusă în evidență în lucrarea [67]: circulația potențialului vector pe perimetrul secțiunii de curgere este egală cu debitul de lichid prin acea secțiune.

Potențialul vector ne ajută în rezolvarea ecuațiilor Navier-Stokes pentru stabilirea distribuției vitezei în conductă. Pentru regimurile tranzitorii putem considera o variație liniară a debitului. În această situație, am calculat gradientul de presiune pe lungimea conductei de umplere (golire) a sasului ecluzei. Având acest gradient, am putut stabili modul de variație al presiunii hidrostatice respectiv viteza de deplasare a nivelului de lichid.

7.2 Utilizarea potențialului vector în studiul curgerii fluidelor.

Curgerea fluidului vâscos, incompresibil, în regim nestaționar, prin conductele de umplere (golire) ale ecluzelor o vom studia cu ajutorul ecuației generale de curgere, cu neglijarea forțelor masice, a lui Navier-Stokes și a ecuației de continuitate:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} = \nu \Delta \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p; \quad (7.1)$$

$$\nabla \bar{v} = 0.$$

În studiul nostru teoretic vom utiliza transcrierea acestor ecuații în coordonate cilindrice (r, θ, z), Oz axa de simetrie a conductei (Fig. 7.2):

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r};$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{v_r v_\theta}{r} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta}; \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z};$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0.$$

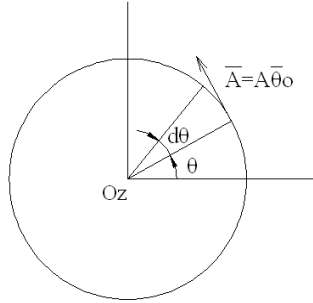


Fig. 7.2 Conducta în coordonate cilindrice

Mișcarea este axial-simetrică, iar axa conductei coincide, după cum am specificat, cu axa Oz. Componentele vitezei vor fi:

$$\begin{aligned} v_r &= v_\theta = 0, \\ v_z &= v(r, t). \end{aligned} \quad (7.3)$$

După cum se știe, câmpurile solenoidale (rotaționale) sunt caracterizate prin $\nabla \bar{v} = 0$, ceea ce implică

$$\bar{v} = \text{rot} \bar{A}, \quad (7.4)$$

în care \bar{A} este o funcție vectorială de punct (și, eventual, de timp), care reprezintă potențialul vector al câmpului dacă $\nabla \bar{A} = 0$.

Potențialul vector ce descrie mișcarea noastră va fi de forma:

$$\bar{A} = A(r, z) \bar{\theta}_0 \quad (7.5)$$

și se determină cu relația:

$$\Delta \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nu \Delta \bar{A} \right) = 0, \quad (7.6)$$

o particularizare pentru mișcarea axial-simetrică a ecuației mișcării fluidelor reale, incompresibile, exprimată cu ajutorul potențialului vector al câmpului de viteze.

Aplicând divergența relației (7.5), obținem:

$$\nabla \bar{A} = \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial \theta} = 0. \quad (7.7)$$

Ținând cont de (7.4) și (7.6), scriem componentele vitezei:

$$\begin{aligned} v_z &= (rot \bar{A})_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (A_\theta r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial \theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial (Ar)}{\partial r}; \\ v_r &= (rot \bar{A})_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} - \frac{\partial A_r}{\partial z} = \frac{\partial A}{\partial z}; \\ v_\theta &= (rot \bar{A})_\theta = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (7.8)$$

Știind că $v_r = v_\theta = 0, v_z = v(r, t)$ și folosind ecuațiile (7.8), obținem:

$$\begin{aligned} (rot \bar{v})_z &= 0, \\ (rot \bar{v})_r &= 0, \\ (rot \bar{v})_\theta &= -\frac{dv}{dr} = -\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (Ar) \right], \end{aligned} \quad (7.9)$$

pentru că:

$$\bar{v} = rot \bar{A} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (Ar) \bar{k} = v_z \bar{k}, \quad (7.10)$$

$$\bar{A} = grad div \bar{A} - rot rot \bar{A} = -rot \bar{v} = -rot (v_z \bar{k}) \quad (7.11)$$

Deci:

$$\bar{A} = \left\{ \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (Ar) \right] \right\} \bar{\theta}_0, \quad (7.12)$$

$$\Delta(\bar{A}) = \bar{\theta}_0 \frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (Ar) \right) \right] \right\}. \quad (7.13)$$

Ținând cont de (7.12) și (7.13), ecuația (7.6) devine:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\partial A}{\partial t} - \nu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (Ar) \right) \right) \right] \right\} = 0. \quad (7.14)$$

Integrând această ecuație în raport cu variabila r , obținem consecutiv:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} - \nu \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial (Ar)}{\partial r} \right] &= C_3(t)r + \frac{C_4(t)}{r}, \\ \nu \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial A}{\partial r} - \frac{\partial A}{\partial t} - \nu \frac{A}{r^2} &= C_3(t) + \frac{C_4(t)}{r}. \end{aligned} \quad (7.15)$$

Aplicând transformata Laplace ecuației (7.15) și ținând cont de condițiile inițiale:

$$t = 0, A(r, 0) = 0 \quad (7.16)$$

și la limită:

$$r = r_0, v_z = v = \frac{1}{r} \frac{\partial (Ar)}{\partial r} = 0, \quad (7.17)$$

obținem o ecuație de tip Bessel a cărei soluție este:

$$A^* = \frac{Q^*}{2\pi r_0} \frac{2I_1(p) - pI_0(p_0)}{2I_1(p_0) - p_0I_0(p_0)}. \quad (7.18)$$

În relația (7.18) am făcut următoarele notații:

$p = r\sqrt{\frac{s}{\nu}}$, $p_0 = r_0\sqrt{\frac{s}{\nu}}$, iar $A^* = A^*(r, s)$ reprezintă transformata Laplace a funcției $A(r, t)$.

I_0 și I_1 sunt funcțiile Bessel modificate, de ordinul 0, respectiv 1, de speța întâi.

Debitul de fluid, cunoscut, este egal cu circulația potențialului vector pe perimetrul secțiunii de curgere [67]:

$$Q(t) = \int_0^{2\pi} A(r_0, t) r_0 d\theta. \quad (7.19)$$

Aplicând transformata Laplace, obținem:

$$Q^*(s) = \int_0^{2\pi} A^*(r_0, s) r_0 d\theta. \quad (7.20)$$

Conform primei relații (7.8)

$$v = v_z = (rot \bar{A})_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(Ar)}{\partial r}. \quad (7.21)$$

Aplicând transformata Laplace relației de mai sus, obținem:

$$v^* = \frac{A^*}{r} + \frac{\partial A^*}{\partial r} \quad (7.22)$$

și, în final:

$$v^* = \frac{Q^*}{\pi r_0} \sqrt{\frac{s}{\nu}} \frac{I_0(p) - I_0(p_0)}{2I_1(p_0) - p_0 I_0(p_0)}. \quad (7.23)$$

Modulul potențialului vector și repartiția de viteze se determină cu ajutorul formulei de inversiune a lui Mellin-Fourier:

$$A(r, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{b-i\infty}^{b+i\infty} e^{st} A^*(r, s) ds, \quad (7.24)$$

respectiv:

$$v(r, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{st} v^*(r, s) ds. \quad (7.25)$$

7.3 Gradientul de presiune în cazul variației liniare a debitului

Presupunem o variație liniară a debitului în conducta de umplere (golire) a ecluzei. Ne propunem să evaluăm, în acest caz, variația nivelului de lichid în ecluză.

Observație:

Dacă analizăm datele experimentale la ecluza Cernavodă (vezi Fig. 3.12), observăm că există această situație în diferite perioade. În primele 120 de secunde avem o variație liniară, crescătoare, de ecuație:

$$Q = 1,66 t,$$

iar în următoarele 130 de secunde, o variație descrescătoare, tot liniară, de ecuație:

$$Q = -10/13 t + 3800/13.$$

Deci debitul variază liniar:

$$Q(t) = k_1 t + k_2. \quad (7.26)$$

Aplicând transformata Laplace, obținem:

$$Q^*(s) = \frac{k_1}{s^2} + \frac{k_2}{s} = \frac{k_1 + k_2 s}{s^2}. \quad (7.27)$$

Expresia potențialului vector devine:

$$A(r, t) = \frac{1}{2\pi i} \frac{1}{2\pi r_0} \int_{b-i\infty}^{b+i\infty} e^{st} \frac{k_1 + k_2 s}{s^2} \frac{2I_1(p) - pI_0(p_0)}{2I_1(p_0) - p_0 I_0(p_0)} ds. \quad (7.28)$$

Rezolvând integrala, vom avea:

$$A(r, t) = 2\pi i \frac{1}{2\pi i} \frac{1}{2\pi r_0} \sum \operatorname{Re} z = \frac{1}{2\pi r_0} \sum \operatorname{Re} z. \quad (7.29)$$

Polii funcției de sub integrală sunt:

$$s = 0, \text{ pol dublu, și } s = -\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 \left(n \in N^*, \alpha \in R \right), \text{ în care } \pm i\alpha_n = r_0 \sqrt{\frac{s_n}{\nu}} \text{ reprezintă}$$

soluțiile nenule ale ecuației:

$$2I_1(p_0) - p_0 I_0(p_0) = 0. \quad (7.30)$$

Știind că:

$$I_k(w) = i^{-k} J_k(w), \quad (7.31)$$

putem scrie:

$$I_k(iw) = i^{-k} J_k(w) \text{ și } I_0(iw) = J_0(w). \quad (7.32)$$

Facând înlocuirile în ecuația (7.30) pentru $w = p_0 = i\alpha$, vom avea:

$$2J_1(\alpha) = J_0(\alpha). \quad (7.33)$$

J_0 și J_1 sunt funcțiile Bessel, de ordinul 0, respectiv 1, de speța întâi.

Soluțiile nenule ale acestei ecuații, $\pm \alpha_n$, pot fi determinate grafic. Se obține:

$$\alpha_1 = 5,15; \alpha_2 = 8,40; \alpha_3 = 11,61; \alpha_4 = 14,83 \text{ etc.}$$

Reziduul polului dublu, $s = 0$, se calculează cu formula:

$$\operatorname{reziduul}(0) = \frac{d}{ds} \left[s^2 e^{st} \frac{k_1 + k_2 s}{s^2} \frac{2I_1(p) - pI_0(p)}{2I_1(p_0) - p_0 I_0(p_0)} \right]. \quad (7.34)$$

Pentru polul simplu $s = s_n = -\frac{\nu}{r_0^n} \alpha_n^2$ reziduul funcției de sub integrala expresiei (7.28)

va fi:

$$\text{reziduu}(s_n) = s^{-\frac{\nu \alpha_n^2}{r_0^2}} \frac{k_1 - k_2 \frac{\nu \alpha_n^2}{r_0^2}}{\frac{\nu^2}{r_0^4} \alpha_n^4} \frac{2I_1\left(i \frac{r}{r_0} \alpha_n\right) - i \frac{r}{r_0} \alpha_n I_0(i \alpha_n)}{\frac{d}{ds} [2I_1(p_0) - p_0 I_0(p_0)]_{s=s_n}}. \quad (7.35)$$

În final obținem expresiile potențialului vector și al vitezei în cazul unei variații liniare a debitului:

$$A(r, t) = \frac{1}{2\pi r_0} \left[(k_1 t + k_2) \frac{r}{r_0} \left(2 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) - k_1 \frac{r(r^2 - r_0^2)^2}{24\nu r_0^3} - 2 \frac{r_0^2}{\nu} \sum_{n=1}^m e^{\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t} \frac{k_1 - k_2 \frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2}{\alpha_n^4} \frac{2J_1\left(\frac{r}{r_0} \alpha_n\right) - \frac{r}{r_0} \alpha_n J_0(\alpha_n)}{J_1(\alpha_n)} \right]; \quad (7.36)$$

$$v(r, t) = \frac{1}{\pi r_0} \left[(k_1 t + k_2) \frac{1}{r_0} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) - k_1 \frac{r(r^2 - r_0^2)^2 (3r^2 - r_0^2)}{48\nu r_0^3} - \frac{r_0^2}{\nu} \sum_{n=1}^m e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t} \frac{k_1 + k_2 \frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2}{\alpha_n^3} \frac{J_0\left(\frac{r}{r_0} \alpha_n\right) - \frac{r}{r_0} \alpha_n J_1(\alpha_n)}{J_1(\alpha_n)} \right]. \quad (7.37)$$

Verificare:

Înlocuind $v(r, t)$ din relația (7.37) în expresia debitului:

$$Q(t) = \int_0^{r_0} 2\pi r v(r, t) dr \quad (7.38)$$

obținem

$$Q(t) = k_1 t + k_2, \text{ expresia de la care am pornit.}$$

Pentru determinarea gradientului de presiune, utilizăm ecuația lui Navier-Stokes, scrisă în coordonate cilindrice, cu neglijarea forțelor masice (a treia relație (7.2) în care:

$$v_r = v_\theta = 0, v_z = v(r, t):$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} - \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right). \quad (7.39)$$

Efectuând calculele ținând cont de faptul că

$$2J_1(\alpha) = J_0(\alpha); J_1'(w) = \frac{J_1(w)}{w} + J_0(w); J_0'(w) = -J_1(w)$$

obținem, în final, expresia gradientului de presiune în cazul unei variații cunoscute, liniare, a debitului:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{4\rho}{\pi r_0^2} \left[\frac{1}{3} k_1 + \frac{2\nu}{r_0^2} (k_1 t + k_2) - \sum_{n=1}^m e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t} \frac{k_1 - k_2 \frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2}{\alpha_n^2} \right]. \quad (7.40)$$

7.4 Viteza nivelului de lichid

După stabilirea formulei gradientului de presiune în cazul unei variații liniare a debitului, ne interesează modul în care variază nivelul de lichid din ecluză, viteza lui. Pentru aceasta, dotând cu $f(t)$ partea dreaptă a egalității (7.40), putem scrie:

$$dp = -f(t)dz. \quad (7.41)$$

Integrînd relația (7.41) pe lungimea conductei, obținem:

$$p_2 - p_1 = -f(t)(z_2 - z_1) \quad (7.42)$$

sau

$$p_1 - p_2 = f(t)l, \quad (7.43)$$

l fiind lungimea conductei.

În situația în care sas-ul ecluzei se umple, notăm cu $p_1 = \rho g h_1$ este presiunea hidrostatică din bieful amonte (pe care o putem considera constantă) și h_2 nivelul lichidului din ecluză (Fig. 7.1), vom avea succesiv:

$$\begin{aligned} p_1 - \rho g h_2 &= f(t)l; \\ \rho g h_2 &= p_1 - f(t)l; \\ u(t) &= \frac{h_2}{t} = \frac{1}{\rho g t} [p_1 - f(t)l]. \end{aligned} \quad (7.44)$$

$u(t)$ reprezintă viteza de urcare a nivelului de lichid din ecluză.

Înlocuind $f(t)$, vom avea:

$$u(t) = \frac{p_1}{\rho g t} - \frac{4l}{\pi g r_0^2} \left[\frac{1}{t} \left(\frac{k_1}{3} + \frac{2\nu k_2}{r_0^2} \right) + \frac{2\nu k_1}{r_0^2} - \sum_{n=1}^m \frac{1}{t} e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2} \frac{k_1 - k_2 \frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2}{\alpha_n^2} \right]. \quad (7.45)$$

Se poate demonstra ușor că ultimii doi termeni ai din paranteza pătrată ai relației (7.45) – cei de sub semnul sumei – sunt mult mai mici decât primii doi. Într-adevăr:

$$\frac{\frac{k_1}{3t}}{\frac{k_1}{t \sum_{n=1}^m e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t}}} = \frac{\sum_{n=1}^m e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t}}{3} \gg 1 \text{ și } \frac{\frac{2\nu k_2}{r_0^2 t}}{\frac{\nu k_2}{r_0^2 t \sum_{n=1}^m e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t}}} = 2 \sum_{n=1}^m e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2 t} \gg 1,$$

deoarece α_n are valori supraunitare (5,15; 8,4; 11,6; 14,83 etc.).

Aproximând putem scrie:

$$u(t) \cong \frac{C_1}{t} + C_2, \quad (7.46)$$

unde:

$$C_1 = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{4l}{\pi g r_0^2} \left(\frac{k_1}{3} + \frac{2\nu k_2}{r_0^2} \right) \text{ și } C_2 = \frac{8l\nu k_1}{\pi g r_0^4},$$

O variație hiperbolică în timp a vitezei nivelului de lichid către asimptota $u = \frac{8l\nu k_1}{\pi g r_0^4}$.

Observație:

Utilizând relația aproximativă (7.46), putem determina variația nivelului de lichid, evident tot aproximativ, care este o dreaptă de forma:

$$h(t) = C_1 + C_2 t.$$

Din datele experimentale (vezi Fig. 3.14) putem aproxima variația nivelului de lichid din ecluză cu o dreaptă pe porțiunea 0 – 200 secunde.

Ecuatia acestei drepte este:

$$h = 12,5 - 1/25 t.$$

În cazul golirii sas-ului prin cădere liberă, presupund că deversarea se face din sas în bieful II, vom avea:

$$\rho g \frac{h_2 - h_3}{t} = \frac{f(t)}{t} l.$$

h_2 - nivelul variabil al apei din ecluză, h_3 - nivelul constant al apei din bieful II (fig. 7.1).

$$u(t) = \frac{h_2 - h_3}{t} = \frac{l}{\rho g t} f(t); \quad (7.47)$$

$$u(t) = \frac{4l}{\pi g r_0^2} \left[\frac{1}{t} \left(\frac{k_1}{3} + \frac{2\nu k_2}{r_0^2} \right) + \frac{2\nu k_1}{r_0^2} - \sum_{n=1}^m \frac{1}{t} e^{-\frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2} \frac{k_1 - k_2 \frac{\nu}{r_0^2} \alpha_n^2}{\alpha_n^2} \right]. \quad (7.48)$$

Observăm că:

$$\lim_{t \rightarrow 0} u(t) = 0 \text{ și } \lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = \frac{8l\nu k_1}{\pi g r_0^4}. \quad (7.49)$$

7.5 Determinarea debitului necesar pentru o viteză constantă, impusă, a nivelului apei din ecluză

Pentru aceasta vom considera o variație liniară în timp a gradientului de presiune:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = at, \quad (7.50)$$

în care a este o constantă dimensională măsurată în $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-3}]$.

Relația (7.50) o putem scrie sub forma:

$$dp = atdz \quad (7.51)$$

și o putem integra pe lungimea conductei de umplere a sas-ului:

$$p_2 - p_1 = at(z_2 - z_1). \quad (7.52)$$

Putem scrie succesiv:

$$\frac{p_1 - p_2}{t} = -al, \quad (7.53)$$

$$\rho g \frac{h_1 - h_2}{t} = al. \quad (7.54)$$

Viteza constantă de umplere va fi: $u = \frac{h_1 - h_2}{t}$. Deci:

$$\rho g u = -al, \quad (7.55)$$

sau

$$u = -\frac{1}{\rho g} al = \text{const} \tan t. \quad (7.56)$$

Pentru aflarea debitului vom utiliza rezolvarea ecuației Navier-Stokes în condițiile curgerii nepermanente prin conducte, pentru o variație liniară a gradientului de presiune propusă în lucrarea [15]. A fost rezolvată de fapt forma simplificată a penultimei ecuații (7.2), scrisă în coordonate polare în condițiile prezentate în capitolul 7.1, pentru o variație liniară a gradientului de presiune, $\frac{\partial p}{\partial z} = at$:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} at + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right). \quad (7.57)$$

S-au obținut expresiile vitezei:

$$v = -\frac{a}{\rho \nu^2} \left[\frac{16\nu(r_0^2 - r^2)t - (3r_0^4 + r^4 - 4r_0^2 r^2)}{64} - 2r_0^4 \sum_{n=1}^m \frac{1}{\alpha_n^5} \frac{J_0\left(\alpha_n \frac{r}{r_0}\right)}{J_1(\alpha_n)} e^{-\frac{\nu \alpha_n^2}{r_0^2} t} \right] \quad (7.58)$$

și a debitului în conductă:

$$Q(t) = -\frac{2\pi a}{\rho \nu^2} r_0^4 \left(\frac{\nu t}{16} - \frac{r_0^2}{96} - 2r_0^2 \sum_{n=1}^m \frac{e^{-\frac{\nu \alpha_n^2}{r_0^2} t}}{\alpha_n^6} \right). \quad (7.59)$$

Ținând cont de (7.56), putem stabili cu exactitate formula debitului necesar pentru a asigura o umplere cu viteza constantă u a nivelului apei din sas-ul ecluzei:

$$Q(t) = \frac{2\pi g u}{l \nu^2} r_0^4 \left(\frac{\nu t}{16} - \frac{r_0^2}{96} - 2r_0^2 \sum_{n=1}^m \frac{e^{-\frac{\nu \alpha_n^2}{r_0^2} t}}{\alpha_n^6} \right). \quad (7.60)$$

7.6 Concluzii

Modelarea matematică ne-a permis rezolvarea unei probleme destul de fine: variația nivelului de lichid din sas-ul ecluzei în perioadele de tranziție, la deschiderea vanei de exemplu. Deschiderea vanei poate fi făcută în așa fel încât debitul să aibă o variație liniară. Demersul nostru matematic ne-a permis, prin rezolvarea ecuației lui Navier-Stokes cu ajutorul potențialului vector, să stabilim distribuția de viteze în conductă și apoi viteza de variație a nivelului apei. Corectitudinea calculului a fost verificată înlocuind în formula debitului prin conducte circulare expresia vitezei și obținând variația liniară a acestuia de la care am pornit.

Acest calcul matematic ne permite o modelare mai rafinată a procesului de umplere a sas-ului unei ecluze în situațiile de tranziție, excedând simplificările practice ale proiectării ingineresti.

Abordând în același mod problema, am putut determina viteza de variație a nivelului din sas-ul ecluzei în situația golirii acestuia în bief-ul II.

Problema se poate pune și invers: stabilind o anumită viteză, constantă, de variație a nivelului apei, să determinăm debitul necesar pentru obținerea acestei viteze. În această situație, gradientul de presiune are o variație liniară $\frac{\partial p}{\partial z} = at$, în care a este o constantă dimensională.

Utilizând rezolvarea problemei calculului distribuției de viteze în cazul unui gradient de presiune variabil în timp, am putut pune în evidență formula debitului în corelație cu valoarea constantă, u , impusă a vitezei nivelului de apă din sas-ul ecluzei.

Rezolvarea acestor două probleme, ne permite o abordare teoretică mai exactă a fenomenului curgerii prin conducte circulare, în situații tranzitorii, dar și a stabilirea cu exactitate a debitului necesar pentru o anumită cerință de proiectare – viteza nivelului de lichid din sas.

8. Contribuții personale și direcții de continuare a cercetărilor

Contribuții personale

1. O sinteză a forțelor care acționează asupra construcțiilor hidrotehnice: diguri, canale, baraje, ecluze etc.

Pentru a aborda în mod corect acțiunea apei asupra construcțiilor hidrotehnice trebuie să identificăm cât mai exact forțele care acționează asupra acestora. Forțelor de natură hidraulică li se adaugă cele de natură pneumatică – vânt sau mecanică – coliziunea cu navele sau cu alte obiecte plutitoare. Identificarea acestor forțe, modul în care acestea acționează, mărimea lor, variația acestei mărimi în funcție de diverși parametrii reprezintă un pas important în definirea modelului matematic fără de care un studiu teoretic, premergător acțiunii de proiectare, nu este posibil.

Metodele de studiu diverse trebuie analizate cu atenție în vederea adoptării celor mai convenabile demersului nostru. De aceea am considerat analiza acestora ca unul din punctele importante ale tezei, menit să aducă clarificările necesare unei abordări corecte a cercetărilor.

2. Simularea acțiunii vântului asupra părții emerse a digului.

După cum am specificat, digurile sunt solicitate la diferite forțe de tip hidro-aerodinamic (vânt, curent, valuri, interacțiuni cu navele), hidrostatic, dar și mecanic (ciocniri).

Acțiunea vântului asupra părții emerse s-a dovedit a fi nesemnificativă în raport cu acțiunea valului, dar mai ales cu acțiunea curentului.

3. Modelarea curgerii printr-un dig (baraj) rupt

Simularea curgerii apei printr-un baraj rupt ne-a permis să constatăm distribuția vitezelor în acea zonă, dar mai ales să evaluăm forțele care acționează asupra digului rămas în picioare. Această modelare ne poate ajuta la evaluarea efectelor unui dezastru de acest tip, dar și la preconizarea unor măsuri pentru evitarea lui. Studiul poate contribui la estimarea unor proceduri de remediere provizorie sau definitivă a digului (barajului).

4. Modelarea acțiunii curentului asupra digurilor

Acțiunea curentului asupra părții imerse a digului a fost calculată cu ajutorul programului FLUENT atât în mărime naturală cât și pe model. Compararea rezultatelor obținute ne-a permis să tragem niște concluzii referitoare la utilizarea programului FLUENT numai pentru studiu pe model urmând ca trecerea în natură să se facă cu ajutorul similitudinii. Această acțiune a curentului este cu atât mai importantă atunci când ne referim la digurile sau barajele situate pe ape interioare (râuri, fluvii).

Am completat cu modelarea acțiunii valurilor sinusoidale, de mică amplitudine, mai aproape de realitatea valurilor care apar pe apele interioare, provocate de ambarcațiuni care navigă în apropiere.

5. Utilizarea simulatorului FLUENT drept stand de probe

Prin compararea datelor am ajuns la concluzia că putem studia acțiunea curentului de apă asupra structurilor nemetalice – baraje, diguri – prin simulare pe model, utilizând proceduri de calcul mai simple, respectiv puteri de calcul și timpi de lucru mai mici, urmând a trece rezultatele, cu ajutorul teoriei similitudinii, pe prototip, în fenomenul real.

O idee interesantă ar fi efectuarea unor calcule pe „model” pentru fluide inexistente în natură, cu densități și viscozități care să corespundă criteriilor de similitudine Eu sau Re. Stand-ul de probe virtual poate merge mai departe putând plasa experimentul pe Lună - unde accelerația gravitațională este de șase ori mai mică – sau pe alte corpuri cerești. Similitudinea Fr poate avea și o scară a accelerațiilor gravitaționale.

Având în vedere aceste considerente, se poate spune că putem utiliza, în anumite situații, simulatorul FLUENT drept stand de probe, efectuând calculele pe un model la scară, rezultatele obținute putând fi trecute în natură cu ajutorul invarianțelor de similitudine.

Conceptul de stand de probe virtual prezintă nu numai avantajul ușurării calculului, dar și aplicarea mai bună, fără restricții de natura proprietăților fizice sau a constantelor terestre, a criteriilor de similitudine. De aici și avantajele financiare corespunzătoare.

Putem considera că însăși noțiunea de „stand de probe virtual” reprezintă o contribuție, a mea și a conducătorului de doctorat, la îmbogățirea vocabularului științific în domeniul teoriei similitudinii.

6. Similitudinea la două scări a digurilor

În aceeași gândire a simplificării calculelor, dar și a vizualizării intuitive mai bune a fenomenelor, am încercat aplicarea similitudinii la două scări a digurilor lungi. Calculele efectuate pe valorile obținute pe stand-ul de probe virtual nu corespund decât în parte, valorilor rezultate în urma calculelor efectuate în natură. Considerăm că avantajul major al similitudinii la două scări îl constituie în continuare reprezentarea „didactică” mai bună, legată de vizualizarea în condiții mai bune a fenomenului. Un studiu ulterior poate fi făcut în condițiile în care am putea modifica la scară și alte mărimi, conform celor prezentate în paragraful anterior. Este posibil ca să avem o corelație mai bună și în cazul similitudinii la două scări.

7. Gradientul de presiune la o variație liniară a debitului cu aplicații în determinarea variației nivelului de lichid din ecluză – model matematic.

Determinarea gradientului de presiune ne-a permis rezolvarea unei probleme destul de fine: variația nivelului de lichid din sas-ul ecluzei în perioadele de tranziție, la deschiderea vanei de exemplu. Deschiderea vanei poate fi făcută în așa fel încât debitul să aibă o variație liniară. Analiza datelor experimentale de la ecluza Cernavodă, efectuată în Capitolul 3, ne-a permis să observăm că există această situație în diferite perioade. Demersul nostru matematic ne-a condus, prin rezolvarea ecuației lui Navier-Stokes cu ajutorul potențialului vector, să stabilim distribuția de viteze în conductă și apoi viteza de variație a nivelului apei.

Calcul matematic ne permite o modelare mai rafinată a procesului de umplere a sas-ului unei ecluze în situațiile de tranziție, excedând simplificările practice ale proiectării inginerești.

Rezolvarea acestei probleme, ne conduce la o abordare teoretică mai exactă a fenomenului curgerii prin conducte circulare, în situații tranzitorii.

8. Determinarea debitului necesar pentru o viteză constantă, impusă, a nivelului din ecluză

Ținând cont de anumite cerințe de proiectare, putem pune problema invers: stabilind o anumită viteză, constantă, de variație a nivelului apei, să determinăm debitul necesar pentru obținerea acestei viteze. În această situație, gradientul de presiune are o variație liniară $\frac{\partial p}{\partial z} = at$, în care a este o constantă dimensională. Utilizând rezolvarea problemei calculului distribuției de

viteze în cazul unui gradient de presiune variabil în timp, am putut pune în evidență formula debitului în corelație cu valoarea constantă, u, impusă a vitezei nivelului de apă din sas-ul ecluzei.

Rezolvarea acestei probleme, ne permite stabilirea cu exactitate a debitului necesar pentru o anumită cerință de proiectare – viteza nivelului de lichid din sas.

Abordarea analitică a unor probleme, în plină epocă a metodelor numerice, ne ajută să înțelegem mai bine fenomenele, să avem o justificare corespunzătoare și, ca atare, să putem acționa într-un mod mai corect.

Direcții de continuare a cercetărilor

1. Simularea acțiunii apei asupra altor structuri

Ne referim aici în special la structurile hidrotehnice marine în care problema este destul complicată, atât datorită intensității forțelor de natură hidrodinamică cât și datorită efectului combinat al acestor forțe. Spre deosebire de apele interioare, la mare sau la ocean, forța valurilor este adesea combinată cu cea a curenților și a vântului.

2. Experimentări pe modele virtuale

Utilizarea simulatorului ANSYS FLUENT ne permite să considerăm în calcule fluide cu caracteristici diverse, unele chiar inexistente în natură. Cei care utilizează ca metodă de cercetare simularea pe modele fizice cunosc restricțiile pe care le impune, în trecerea de la model la natură cu ajutorul criteriilor de similitudine, același fluid de lucru. De exemplu apa pentru modelele navelor.

Considerăm că ar fi deosebit de interesant dacă, utilizând simulatorul ANSYS FLUENT ca stand de probe, am folosi lichide “exotice”, cu proprietăți fizice deosebite, care să permită aplicarea mai multor criterii de similitudine. Am putea considera, de asemenea, că experimentul se desfășoară în condiții deosebite de gravitație, mai mare sau mai mică decât cea normală, lucru deosebit de dificil de realizat pe modele fizice.

3. Studiarea altor modele matematice

Putem încerca determinarea analitică a gradientului de presiune în cazul altor tipuri de variație a debitului (hiperbolică, parabolică). De asemenea, putem pune problema stabilirii modului de variație a debitului pentru realizarea unui anumit tip de evoluție a nivelului de lichid din ecluză.

9. Concluzii finale

Apa a constituit încă de la începuturile istoriei omenirii o resursă extrem de importantă. Aproape că nu există domeniu al științei, al artelor ori al religiei care să nu se apropie sub o formă sau alta, cautând răspunsuri ascunse în ceea ce pare atât de „limpede” - un lichid incolor, inodor și insipid, aparent fără nici un secret.

Pentru a putea utiliza această resursă vitală oamenii au trebuit să o studieze, să-i cunoască caracteristicile. Dacă ne referim numai la apele de suprafață, acestea sunt caracterizate în principal prin niveluri și debite variabile, cu impact major asupra vieții locuitorilor de pe malurile lor.

În epoca modernă metodele de studiu s-au diversificat permițând o analiză exactă a fenomenelor de curgere și a acțiunii fluidelor asupra structurilor cu care intră în contact – structurile hidrotehnice.

Lucrarea de față abordează numai o parte a fenomenelor de acțiune a apei asupra acestor structuri, cu precădere acțiunea curentului asupra digurilor de pe apele interioare. De asemenea, analizăm în detaliu funcționarea sas-ului ecluzelor, mai precis umplerea sau golirea lor. Metodele utilizate sunt: metoda infinitezimală; metoda analizei dimensionale; similitudinea hidrodinamică metoda modelării hidraulice; calculul computerizat al curgerii fluidelor. Modelarea matematică referitoare la viteza de deplasare a nivelului de lichid din ecluză se bazează pe rezolvarea analitică a ecuațiilor diferențiale, deci o metodă infinitezimală. Analiza dimensională a stat la baza modelării hidraulice. Am utilizat pentru calculul computerizat al curgerii fluidelor simulatorul FLUENT (program care se bazează pe metoda volumului finit - FVM) pentru a analiza fenomenul atât în mărime naturală, cât și pe model. Aceste metode ne-au permis un studiu coerent al fenomenelor, cu rezultate interesante care pot fi folosite în proiectare sau în cercetările ulterioare.

Studiile hidrologice efectuate pe Dunăre de către Institutul de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare și I.P.T.A.N.A. - S.A. ne-au permis efectuarea unor analize comparative cu demersurile noastre matematice. Dacă analizăm datele experimentale la ecluza Cernavodă (vezi Fig. 3.11), observăm că situația preconizată de noi – variația liniară a debitului - există în diferite perioade. În primele 120 de secunde avem o variație liniară, crescătoare, de ecuație:

$Q = 1,66 \text{ t}$, iar în următoarele 130 de secunde, o variație descrescătoare, tot liniară, de ecuație:
 $Q = - 10/13 \text{ t} + 3800/13$.

De asemenea, aceste studii reprezintă elemente de bază pentru cunoașterea curgerii, în diferite perioade, a celui mai important fluviu european, a caror structuri hidrotehnice la analizăm. Problemele examinate pe modele de către Institutul de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare (care au reprodus la scara 1:100 și la scara 1:125 albia Dunării în zona Cernavodă pe o lungime de cca 3 km și primii 500 m din canal) au fost:

- cinematica curgerii apei în nodurile hidrotehnice în diverse condiții de exploatare;
- fenomenele hidraulice în porturile de așteptare în timpul ecluzarilor;
- navigația convoaielor împinse de 2 x 3 x 3000 tone prin nodurile hidrotehnice;
- staționarea convoaielor împinse în porturile de așteptare.

Sinteza noastră asupra forțelor care acționează asupra structurilor hidrotehnice ne-a adus la concluzia că ele pot fi grupate în două mari categorii: forțe naturale și forțe datorate traficului naval. Forțele naturale, fluido-dinamice, sunt provocate de vânt, curent și acțiunea valurilor. Trebuie să menționăm și forțele de tip hidrostatic, datorate presiunii, a căror valoare crește cu adâncimea. Traficul naval provoacă forțe de tip hidrodinamic – efect de vapor și mecanic, în cazul coliziunilor.

Analiza acțiunii forțelor asupra structurilor hidrotehnice a fost făcută în special cu ajutorul Computer Fluid Dynamics (CFD). Pentru a realiza o bună analiză CFD trebuie parcurși următorii pași principali: identificarea problemei și preprocesarea (definirea scopului modelării, identificarea domeniului ce urmează a fi modelat, proiectarea și crearea rețelei de celule - grid-ului); executarea calculului iterativ (introducerea datelor, calculul și monitorizarea soluțiilor); postprocesarea (examinarea rezultatelor, revizia modelului dacă este cazul).

Simularea acțiunii vântului asupra părții emerse, s-a dovedit a fi nesemnificativă în raport cu acțiunea valului, dar mai ales cu acțiunea curentului.

Acțiunea curentului este mai importantă atunci când ne referim la digurile sau barajele situate pe ape interioare (râuri, fluvii).

Simularea curgerii apei printr-un dig (baraj) rupt ne-a permis să constatăm distribuția vitezelor în acea zonă, dar mai ales să evaluăm forțele care acționează asupra digului rămas în picioare.

Acțiunea curentului asupra părții imerse a digului a fost calculată cu ajutorul programului FLUENT atât în mărime naturală cât și pe model. Compararea rezultatelor obținute ne-a permis să tragem niște concluzii referitoare la utilizarea programului FLUENT numai pentru studiu pe model urmând ca trecerea în natură să se facă cu ajutorul similitudinii. Diferența dintre valorile forțelor care acționează asupra digului obținute prin calculul digului în mărime naturală și valorile obținute prin calculul pe model și trecerea lui în natură cu ajutorul similitudinii Froude sunt foarte apropiate (în jur de 11 procente). Această diferență poate fi cauzată de mai mulți factori printre care: utilizarea unei similitudini incomplete, aproximarea calculului iterativ al programului FLUENT. Valoarea obținută prin similitudine este mai mare, deci un calcul de rezistență, ținând cont că valoarea reală ar fi mai mică, este acoperitor.

Se poate spune că putem utiliza, în anumite situații, simulatorul FLUENT drept stand de probe, efectuând calculele pe un model la scară, rezultatele obținute putând fi trecute în natură cu ajutorul invarianților de similitudine.

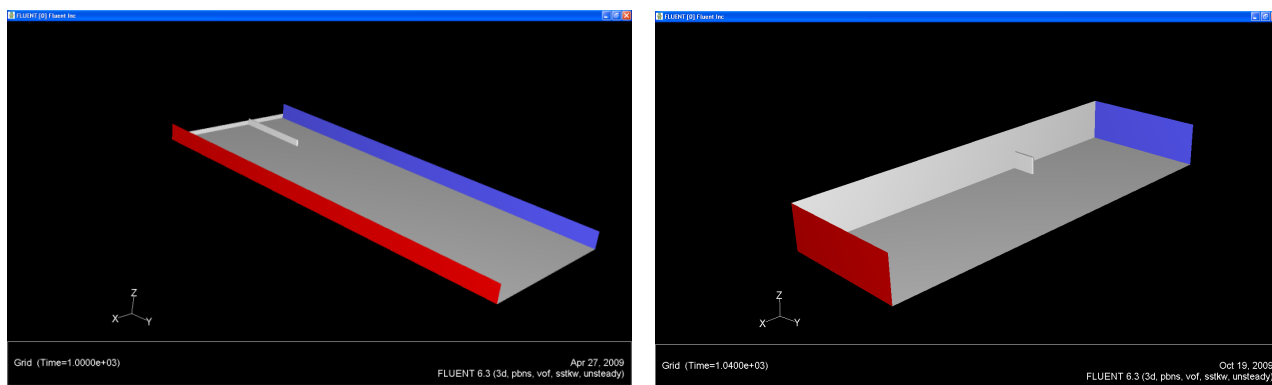
Curgerea printr-un baraj rupt și acțiunea curentului asupra părții imerse a unui dig așezat perpendicular pe direcția de curgere - studiate pe simulatorul FLUENT la scară rezultatele fiind trecute apoi în natură – au arătat modul în care teoria similitudinii, combinată cu CFD, poate fi folosită în studiul unor astfel de fenomene.

Există situații în care modelarea fizică a unei structuri nu poate fi realizată sau este dificil de realizat datorită diferenței mari dintre dimensiunile acesteia. În cazul nostru, digurile lungi ar fi mai bine modelate dacă vom utiliza două scări: una pentru lungime și alta pentru lățime și înălțime.

Utilizarea similitudinii la două scări este utilă și în reprezentările mai sugestive ale fenomenelor, dar mai ales în simulările computerizate care au devenit mai mult decât ilustrări ale diferitelor procese, au devenit, în urma perfecționării soft-urilor, adevărate metode de cercetare.

Cu ajutorul programului FLUENT am putut face o comparație între rezultatele acțiunii curentului de apă asupra unui dig lung în cazul similitudinii la o scară și la două scări, rezultate comparate între ele și cu calculele făcute pe digul în mărime naturală. Similitudinea normală a fost realizată la scara 1:25, iar cea distorsionată la două scări $k_x = k_z = 25; k_y = 200$.

În Fig. 9.1 sunt prezentate prin comparație cele două modele geometrice.



a.

b.

Fig. 9.1 Modelul la scara 1:25 și modelul distorsionat al digului

Referindu-ne numai la valoarea forței de acțiune a curentului asupra digului am observat o diferență a valorii totale de aproximativ 26 de procente între valoarea calculată pentru digul în “natură” și cel pe “modelul” la două scări, față de 11 procente în cazul similitudinii normale.

Dacă în cazul similitudinii normale diferența de 11% este una acceptabilă ținând cont de faptul că numai unul din criterii este respectat, în cazul similitudinii la două scări se constată o diferență apreciabilă care reduce avantajele utilizării acestei metode numai la simularea grafică mai sugestivă.

Considerăm că metoda similitudinii la două scări nu trebuie abandonată, utilizarea criteriilor de similitudine fără restricții, într-un „stand virtual”, putând aduce concluzii interesante.

Utilizarea teoriei similitudinii la una sau două scări în studiul fenomenelor de curgere a fluidelor poate aduce economii de timp și capacitate de calcul, cu o acuratețe a rezultatelor destul de bună în primul caz și acceptabilă în cel de-al doilea, cu avantajul reprezentării mai sugestive.

Modelarea matematică ne-a permis, prin rezolvarea ecuației lui Navier-Stokes cu ajutorul potențialului vector, să stabilim distribuția de viteze în conductă și apoi viteza de variație a nivelului apei în cazul, după cum am văzut întâlnit în practică, de variație liniară a debitului. Corectitudinea calculului a fost verificată înlocuind în formula debitului prin conducte circulare expresia vitezei și obținând variația liniară a acestuia de la care am pornit. Acest calcul matematic ne permite o modelare mai rafinată a procesului de umplere a sas-ului unei ecluze în situațiile de tranziție, excedând simplificările practice ale proiectării ingineresti.

Utilizând relația aproximativă de variație hiperbolică a vitezei, putem determina variația nivelului de lichid, evident tot aproximativ.

Din datele experimentale prezentate în Capitolul 3 reiese că putem aproxima variația nivelului de lichid din ecluză cu o dreaptă pe porțiunea 0 – 200 secunde.

Invers, stabilind o anumită viteză, constantă, de variație a nivelului apei, putem determina debitul necesar pentru obținerea acestei viteze. În această situație, gradientul de presiune are o variație liniară $\frac{\partial p}{\partial z} = at$, în care a este o constantă dimensională. Utilizând rezolvarea problemei calculului distribuției de viteze în cazul unui gradient de presiune variabil în timp, am putut pune în evidență formula debitului în corelație cu valoarea constantă, u , impusă a vitezei nivelului de apă din sas-ul ecluzei.

Utilizarea metodelor moderne de calcul și simularea acțiunii forțe hidrodinamice, dar și modelarea matematică cât mai exactă, este de mare actualitate și ne poate duce la concluzii interesante atât în ceea ce privește evoluția fenomenelor, cât și în ceea ce privește o proiectare cât mai corectă a structurilor hidrotehnice.

BIBLIOGRAFIE

- [1] ANDREI V. - „Mecanica fluidelor”, vol. I, II, III, Editura Fundației universitare „Dunărea de Jos”, Galați, 2005.
- [2] BAKKER A., “How Rapid Flow Modeling Benefits Product Design”, Fluent News, Vol. XV, ISSUE 2, 2006.
- [3] BAKKER A., „Extensive Multiphase Flow Capabilities”, ANSYS ADVANTAGE, Volume II, Issue 4, 2008.
- [4] BREABĂN V., “Amenajări hidroenergetice. Aspecte energetice și economice”, Universitatea „OVIDIUS” Constanța, 1997
- [5] BOAS, M. L., “Mathematical Methods in the Physical Sciences”, 2d ed., Wiley, 1983.
- [6] CARAFOLI E., CONSTANTINESCU V.N., „Dinamica fluidelor incompresibile”, Ed. Academiei, București, 1981.
- [7] CARAFOLI E., CONSTANTINESCU V.N., „Dinamica fluidelor compresibile”, Ed. Academiei, București, 1984.
- [8] COTEȚIU V. – „Mecanica fluidelor și acționări fluidice”, Ed. Risoprint, Cluj-Napoca, 2004
- [9] CIORBEA V., CUPȘA O. S. ș.a. - „Canalul Dunăre-Marea Neagră”, Ed. Ex Ponto, 2008.
- [10] CUPȘA O. S. - „Considerente generale privind stabilirea mecanismului acțiunii apei asupra construcțiilor hidrotehnice”, Referat I, iunie 2006.
- [11] CUPȘA O. S. - „Transformari reversibile si ireversibile ale materialelor nemetalice in contact cu apa” Referat II, septembrie 2008.

[12] **CUPȘA O. S.** - „Modele matematice de studiu a acțiunii hidrostatice și hidrodinamice a apei asupra materialelor nemetalice.” Referat III, septembrie 2009.

[13] **CUPȘA O. S., DINU D.** - „Considerations regarding the Use of Distortional Simulation for Studying Long Break-waters”, Constanta Maritime University Annals, Year XI, Vol. 13, 2010.

[14] **DINU D.** “Hydraulics and hydraulic machines”, Ed. Sigma Trading Metafora, 1999.

[15] **DINU D.** „Considerations regarding the Flow through Circular Conduits in the case of Linear Time Variation of Pressure Gradient”, The 5th International Scientific Conference on Naval Technologies TEHNONAV, Constanta, 2006.

[16] **DINU D., CUPȘA O. S.** „Using FLUENT as an Experimental Stand. Flow through a Broken Barrage”, Journal of Marine Engineering and Environment, Year II, Vol. 3, 2009.

[17] **DINU D., CUPȘA O. S.** „The Velocity of the Lock Water Level at a Linear Variation of the Flow in the Filling (Emptying) Conduit”, Journal of Marine Engineering and Environment, Year III, Vol. 1, 2010.

[18] **DINU D., STOIAN M.** - „Distortional Simulation in the Study of Flow through Circular Conduits”, Journal of Marine Engineering and Environment, Year I, Vol. I, 2008.

[19] **DINU, D., PETREA F.**, “Mașini hidraulice și pneumatice”, Institutul de Marină Civilă, Constanța, 1993.

[20] **DINU D.**, „Mecanica fluidelor pentru navigatori”, Editura Nautica, 2010.

[21] **DINU D.**, „The Brake Water under Current Action. A Distortional Simulation Approach”, The 2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems (MEQAPS 10), Constanta, 2010.

[22] **DINU D.** “Trecerea coeficienților C_x și C_y de la model la natura în teoria similitudini la două scări a aripilor hidrodinamice”, Buletin tehnic al Registrului Naval Român, nr.3, 1994.

- [23] DURRAN, D.R., “Numerical methods for wave equations in geophysical fluid dynamics”, New York : Springer, 1999.
- [24] FEISTAUER M., - „On the Mathematical and Numerical Study of Nonviscous axisymmetric channel flow”, Teubner, Leipzig, 1983.
- [25] FLOREA J., PANAITESCU V., - „Mecanica fluidelor”, Ed. Didactică și pedagogică și pedagogică, București, 1979.
- [26] GALPIN P., BAKKER A., - „The New Wave of Fluid Technology”, ANSYS ADVANTAGE, Volume II, Issue 2, 2008.
- [27] GARBRECHT G., “Ancient Water Works - Lessons from History, Impact of Science on Society”, No. 1, UNESCO, Paris, 1983.
- [28] GHOSAL S., „Analysis and Control of Errors in the Numerical Simulation of Turbulence”, Springer Netherlands, 2002.
- [29] GIURCONIU, M. ș.a. – “Hidraulica construcțiilor și instalațiilor hidroedilitare”, Editura Facla, Timișoara, 1989.
- [30] GUKHMAN A.A., - „Introduction to the Theory of Similarity”, Academic Press, New York – London, 1965.
- [31] HAUKE G., „An Introduction to Fluid Mechanics and Transport Phenomena”, Springer Netherlands, 2008.
- [32] HÂNCU C. D., „Căi navigabile”, Ed. Ovidius University Press, 1999.
- [33] HIRSCH C., „Numerical Computation of Internal and External Flows”, Vol.I și II, John Wiley and Son, 1990.
- [34] HUTCHINGS B., “Cluster Computing with Windows CCS - New Clustering Technology from Microsoft Speeds up Engineering Simulation”, ANSYS ADVANTAGE, Volume I, Issue 3, 2007.

- [35] IAMANCI C., PETRESCU V., DAMIAN R., SANDU L., ANTON A., “Hidraulica instalatiilor”, Editura Tehnica, Bucuresti, 1994.
- [36] IDELCIK I. E., - „Îndrumar pentru calculul rezistențelor hidraulice”, Editura Tehnică, București, 1984.
- [37] IONESCU GH. D., “Introducere în mecanica fluidelor”, Editura tehnică, București, 2004.
- [38] IMAOKA S., „Using New Meshing Features in ANSYS Workbench Simulation”, ANSYS ADVANTAGE, Volume II, Issue 2, 2008.
- [39] IVICSICS C., - „Hydraulic Models”, Research Institute for Water Resources Development, Budapest, 1975.
- [40] KLINE S. J., - „Similitude and Approximation Theory”, McGraw-Hill Book Company, New York, 1965.
- [41] KRUGER A. , **CUPSA O. S. ș.a.** - „INFOPEDIA – Enciclopedie ilustrată”, Consilier Capitol Transport, comunicații și industrie, Mladinska Knjiga, București, 2006.
- [42] KOBAYASHI H., „Marine Simulation and Ship Manoevrability”, MARSIM 96, Rotterdam, 1996.
- [43] LIGHTHILL J., „Waves in fluid”, Cambridge University Press, 1980.
- [44] LUGOR LEJU C, “Ancient Egyptian Farming and Tools”, electronic format, 2002
- [45] MAIER V., “Oscilațiile generale ale navei pe valuri în abordare deterministă”, Ed. Tehnică, 2005.
- [46] MAIOR, N., PAUNESCU, M. “Geotehnica si fundatii”, Editura didactica si pedagogica, Bucuresti, 1967.
- [47] MALHOTRA D.R., MALHOTRA N.K., “The Fluid Mecanics and Hydraulics”, Satya Parkasan Co., 1997.

- [48] MIROSHNIKOV A.N., RUMYANTSEV S.N., „Modelling of Control Systems of Transport Technical Means”, ed. Elmor, Sankt Petersburg, 1999.
- [49] MOOK K.S., NAYFEH A.H., “Numerical Simulation of Dynamic/Aerodynamic Interactions”, Computing System in Engineering, Vol. I, 1990.
- [50] MURRELL F., LANGE T. “The Democratization of Engineering Analysis”, ANSYS Advantage, Volume I, Issue 2, 2007.
- [51] OCKEDON H., TAYLER A., - “Inviscid Fluid Flow”, Springer-Verlag, New York-Heidelberg-Berlin, 1983.
- [52] OROVEANU T., - “Mecanica fluidelor vâscoase”, Editura Academiei, București, 1967.
- [53] PĂTRUȚ P., NICOLAE I., - “Acționări hidraulice și automatizări”, Editura Nausicaa București, 1998
- [54] PETREA F., DINU D., “Mecanica Fluidelor”, Institutul de Marină Civilă, Constanța, 1994.
- [55] POPOVICI A., POPESCU C., “Baraje pentru acumulări de apă”, Editura Tehnică, București, 1992.
- [56] ROMAN P., ISBĂȘOIU E.C., BĂLAN C. „Probleme speciale de hidromecanică”, Ed. Tehnică, București, 1987.
- [57] PRIȘCU R., - „Construcții hidrotehnice”, vol. I, vol. II, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1974
- [58] SAFFMAN, P.G., - “Vortex Dynamics”, Cambridge Univ. Press, 1992.
- [59] SIMA V., - „Metode noi în matematica aplicată”, Editura Științifică, București, 1992.

- [60] SINCERE S., - „Designing Against the Wind”, ANSYS ADVANTAGE, Volume III, Issue 1, 2009.
- [61] SLAGTER W., - „Explicit Dynamics Goes Mainstream”, ANSYS ADVANTAGE, Volume III, Issue 1, 2009.
- [62] SOARE S., “Procese hidrodinamice”, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [63] TIPLER F.J., „Fizica nemuririi”, Editura Tehnică, București, 2008.
- [64] TROFIN, E., “Hidraulica si hidrologie”, Editura didactica si pedagogica, Bucuresti, 1974.
- [65] TROSHKO A., MOHAN S., „Drag Laws”, FLUENT NEWS, Volume XIV, Issue 2., 2005.
- [66] VASILESCU AL. A. „Analiza dimensională și teoria similitudinii”, Ed. Academiei, București, 1979.
- [67] VASILESCU AL.A., PETREA F. „Sur l’emploi du potentiel vectoriel du champ des vitesses dans la mécanique des fluides”, Buletinul Universității din Galați, fascicol II, 1984.
- [68] VOINEA R., DINU B., „Elemente de mecanica mediilor continue”, Editura Ex. Ponto, Constanța, 2000.
- [69] Von WENDT J.F., „Computational Fluid Dynamics. An Introduction”, New York, Springer Verlag, 1996.
- [70] ZUYUAN L., XIEDONG Z., XIUHENG W., „Calculation of Manoeuvring Hydrodynamic Force Including the Effect of Viscosity”, MARSIM 96, Rotterdam, 1996.
- [71] Warsi Z.U.A., “Fluid Dynamics. Theoretical and Computation Approaches”, Boca Raton. CRC Press, 1993.
- [72] WITTFOGEL K. A., “The Hydraulic Civilization: Man's Role in Changing the Earth.” Chicago, IL - University of Chicago Press, 1956.

[73] WOLFE C., “FLUENT 6.3 – Major Advances in CFD Simulation”, Fluent News, Vol. XV, ISSUE 3, 2006.

[74] WOLFE C., STOKES J., „A Flood of Fluid Developments”, ANSYS ADVANTAGE, Volume III, Issue 1, 2009.

* * *

[75] **Program GAMBIT.**

[76] **Program ANSYS-FLUENT.**

[77] **www.fluentusers.com**

[78] **Institutul de Studii și Cercetări pentru Îmbunătățiri Funciare**, “Sinteza privind studiile și cercetările hidraulice în cadrul STE Canal Dunăre - Marea Neagră”, 1975.

[79] **I.P.T.A.N.A. - S.A.**, “Studiu privind morfologia lucrărilor hidrotehnice pe canalele navigabile”, București 1994.

[80] **TRANSAS MARINE Ltd.**, „NAVI-TRAINER 4000 Mathematical Models”, 2003.

